UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA DE PERFIL DE MODERNAS PLANTAS PARA RECICLAJE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

KÉVIN TIREL

PROFESOR GUÍA:

PATRICIO JORQUERA ENCINA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LEONEL NÚÑEZ LAZO

RODRIGO PALMA HILLERNS

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

POR: KÉVIN TIREL

FECHA: 24/01/2017

PROFESOR GUÍA: PATRICIO JORQUERA ENCINA

INGENIERÍA DE PERFIL DE MODERNAS PLANTAS PARA RECICLAJE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

El tratamiento de los neumáticos fuera de uso (NFU) es un gran desafío medioambiental. Se estima en 68 mil toneladas la cantidad de NFU generada anualmente en Chile. Sin embargo, 85% de los NFU tienen un "destino desconocido", lo cual significa que terminan en un vertedero informal o quemados al aire libre. Con la Ley de Responsabilidad Extendida al Productor, se pretende cambiar esta situación ya que las empresas productoras de neumáticos deben encargarse del tratamiento de los NFU. Existen varios métodos de tratamiento primario de los NFU, como reutilización sin tratamiento previo, trituración mecánica o tratamientos térmicos.

El objetivo principal de la siguiente memoria es proponer un perfil de una planta de valorización de neumáticos fuera de uso que entre en sinergia con lo que ya existe en Chile. Este se cumple mediante los siguientes objetivos específicos: Establecer la situación actual de Chile en cuanto a la valorización de los NFU, actualizar el estado del arte de los métodos de valorización de los NFU, elegir una tecnología y la zona de instalación de la planta, y finalmente, realizar el perfil de la planta.

Se presenta diagrama de flujo y lay-out para dos soluciones tecnológicas, las cuales corresponden a la pirolisis y la trituración criogénica. Como producto de entrada, se elige trabajar con granulados de caucho de la planta de Polambiente, para estimular sus ventas. Finalmente, se realiza el análisis económico de la planta de pirolisis, y se concluye que el proyecto no es viable ya que se obtiene un VAN de -698 millones de pesos para un periodo de 15 años.

Un motivo es el elevado precio de los granulados vendidos por Polambiente. Un análisis de sensibilidad al precio de los granulados demuestra que una reducción de 37,1% es necesaria para tener un proyecto al equilibrio. Por otra parte, se proponen soluciones para tener un proyecto viable económicamente. Primero, elegir una planta con mayor capacidad para beneficiarse del efecto de escala, y segundo, trabajar directamente con el NFU para no tener que comprar los granulados de Polambiente. Además, se sugiere la idea de trabajar con una planta modular, que toma en la entrada los NFU, los muele mediante un proceso de trituración mecánica a temperatura ambiente. Luego, muele los granulados finos y los convierte en polvo. Una última etapa se encarga de pirolizar los granulados más gruesos. De esta forma, se tiene una planta con varios tipos de productos terminados.

Agradecimientos

Antes de todo, quiero agradecer a mi profesor guía Patricio Jorquera, primero, por sus enseñanzas en sus clases que tuve los primeros semestres de mis estudios en la Universidad de Chile, y luego, por su ayuda durante toda la duración de este trabajo de título. Supo dejarme trabajar de forma independiente y darme las informaciones necesarias para que pudiera avanzar. ¡Y todo, en dos idiomas!

Quiero agradecer también a mi profesor co-guía, Leonel Núñez por su energía y su buena onda a lo largo del semestre. Siempre ha estado disponible para contestar a mis dudas, ¡y lo hizo siempre con la sonrisa!

Quiero agradecer a toda la Comunidad Internacional de Beauchef, y en particular a Viviana Ruiz, por su acogida y su apoyo a lo largo de estos dos años. A pesar de estar muy ocupada, siempre ha sido muy activa para ayudarnos a todos, y de forma eficiente.

Quiero agradecer a todos los chiquillos de mecánica que me acogieron con toda la buena onda del mundo. Lo pasé super bien gracias a ellos, nos reímos mucho y compartimos harto. En particular, quiero agradecer a dos amigos que cuentan mucho para mí: ¡A mi compadre de chela Seba y a mi jefecito Benja! ¡Son los mejores!

Quiero agradecer a mi gran amigo Nacho, mi hermono favorito, mi fils ingeniero. Gracias a ti, descubrí un montón de cosas sobre Chile, y aprendí mucho sobre la vida. En particular, que el Arbo es lo más grande. ¡Nos vemos en Europa hermano!

Quiero agradecer a todos los galleteros por sus pizzits en buena ondits para sobrevivir a la anguri.

Quiero agradecer a mi Belencita por haberme acompañado al final de mi experiencia en Chile. Esos últimos meses han sido maravillosos gracias a ti. ¡Mucho pollo con arroz nos espera en el futuro!

Quiero agradecer a mis amigos franchutes en general, con quienes lo pasé super bien aquí! En particular, a Titi, quien ha sido fundamental durante un año y medio, me encantó compartir conversaciones profundas y piscolas contigo, eres una persona maravillosa. Luego, a Camille y David, han sido mis mejores roomies, ¡les quiero mucho! A Nousnous, muchas gracias por tu buena onda, tu sonrisa y tus ensaladas redentoras. A Nico, muchas gracias por este fin de año, me encantó tener la oportunidad de conocerte más.

Por fin, quiero agradecer a mis padres que a pesar de la distancia siempre han sido presentes para apoyarme en los momentos difíciles. Si me título hoy día, es gracias a ustedes dos. Les amo.

Así se termina mi experiencia chilena, con mucha alegría y felicidad, les llevo a todos en mi corazón.

Tabla de contenido

Tabla de contenido iii
Índice de tablas v
Índice de ilustraciones vi
1 Introducción 1
1.1 Objetivo general 1
1.2 Objetivos específicos 1
1.3 Alcances 1
2 Metodología 2
3 Antecedentes 4
3.1 Contexto: La Responsabilidad Extendida del Productor (REP) específicos 4
3.2 Un objeto complejo: el neumático 5
3.3 ¿Por qué los neumáticos en particular? 6
3.4 La situación en Chile 7
3.5 Métodos de valorización de los NFU 9
3.5.1 La utilización directa del neumático 9
3.5.2 El tratamiento mecánico, la trituración 10
3.5.3 Tratamiento térmico 13
4 Resultados 18
4.1 Análisis de los antecedentes 18
4.1.1 Utilización directa del NFU 18
4.1.2 Trituración mecánica 18
4.1.3 Tratamiento térmico 19
4.2 Elección de tecnología y zona geográfica 20
4.3 Trituración criogénica 21
4.3.1 Diagrama de flujo de procesos 21
4.3.2 Cálculos de dimensionamiento 22
4.3.3 Lay-out tentativo 31
4.4 Pirolisis 34
4.4.1 Consideraciones 34
4.4.2 Diagrama de flujode procesos 36

4.4.3 Lay-out tentativo 37
4.5 Análisis económico 39
4.5.1 Costos de inversión 39
4.5.2 Costos fijos 40
4.5.3 Costos variables 40
4.5.4 Estructura de costos consolidada 41
4.5.5 Estrategia de inversión 43
4.5.6 Flujo de caja 43
5 Discusión 44
5.1 Factibilidad económica de la implementación de una planta de pirolisis 44
5.1.1 Impacto de la elección de la materia prima 44
5.1.2 Implementación de una planta que produce los granulados de caucho 45
5.1.3 Influencia de la capacidad de la planta de pirolisis 45
5.2 El funcionamiento modular como solución 47
6 Conclusión 49
Bibliografía 51
Anexo A: Algunas empresas que utilizan la pirolisis o la gasificación en el mundo 52
Anexo B: Extracto del catálogo de AirProducts 54
Anexo C: Imágenes / Lay-out / Esquemas de plantas de pirolisis 55
Anexo D: Tabla de reembolso de préstamo 57
Anexo E: Flujo de caja completo 59

Índice de tablas

Tabla 3.1: Comparación de estructura de neumáticos entre un vehículo liviano y un camión 5
Tabla 3.2: Composición química de un neumático 6
Tabla 3.3: Resumen de las aplicaciones de productos derivados del caucho triturado de un NFU 13
Tabla 4.1: Valores relativos al caucho para determinar la potencia calorífica Q 23
Tabla 4.2: Valores relativos al nitrógeno líquido para determinar el flujo másico de nitrógeno líquido 24
Tabla 4.3: Características del túnel de refrigeración 29
Tabla 4.4: Factores para calcular las dimensiones del ciclón en función de Dc [12]..... 30
Tabla 4.5: Dimensiones del ciclón 31
Tabla 4.6: Dimensiones de los equipos utilizadas en el Lay-out de trituración criogénica 31
Tabla 4.7: Espacio requerido para la oficina, el vestuario, el comedor y los baños..... 32
Tabla 4.8: Flujos másicos de los productos de la planta de pirolisis..... 35
Tabla 4.9: Dimensiones de los equipos utilizadas en el lay-out de la planta de pirolisis..... 37
Tabla 4.10: Costos de inversión 39
Tabla 4.11: Costos fijos 40
Tabla 4.12: Costos variables..... 41
Tabla 4.13: Estructura de costos consolidada..... 42
Tabla 4.14: Extracto del flujo de caja 43
Tabla 5.1: Análisis de sensibilidad respecto al precio de la materia prima..... 44
Tabla 5.2: Factores de escala entre los tres tamaños de planta..... 46
Tabla 5.3: Análisis de sensibilidad respecto a la capacidad de producción de la planta..... 46

Índice de ilustraciones

Figura 2.1: Esquema de bloques de la metodología 3
Figura 3.1: Composición y estructura de un neumático 5
Figura 3.2: Comercialización de neumáticos por zona [1] 8
Figura 3.3: Ejemplos de utilización de neumáticos sin procesos previos 9
Figura 3.4: Ejemplo de proceso de trituración a temperatura ambiente 11
Figura 3.5: Opciones de valorización de un NFU 17
Figura 4.1: Diagrama de flujo de procesos de la trituración criogénica 21
Figura 4.2: Obtención de los puntos para realizar la interpolación 25
Figura 4.3: Interpolación de los puntos obtenidos para evidenciar la ecuación vinculando Y y X26
Figura 4.4: Selección del valor de difusividad térmica del caucho 27
Figura 4.5: Representación de una extrusora que trabaja con una carga de 30% 27
Figura 4.6: Proceso de iteración para la determinación del valor de L 28
Figura 4.7: Lay-out de la planta de trituración criogénica 33
Figura 4.8: Diagrama de flujo de procesos de la planta de pirolisis 36
Figura 4.9: Lay-out de la planta de pirolisis 38
Figura 5.1: Ejemplo de planta modular de reciclaje de NFU 47

1 Introducción

El tratamiento de los neumáticos fuera de uso (NFU) es un gran desafío medioambiental. De hecho, los neumáticos tienen una composición muy compleja, siendo una mezcla de polímeros, aditivos, cargas minerales y alambres metálicos. Además, se estima en 68 mil toneladas la cantidad de NFU generada por año en Chile.

Por eso, el tratamiento de los NFU es un tema tan complejo como esencial. Con la Ley de Responsabilidad Extendida al Productor, los productores de neumáticos deben encargarse del tratamiento de los NFU. Aunque sea más sencillo exportar los neumáticos para que sean reciclados en países que tienen las infraestructuras adecuadas, sería aún mejor que Chile sea independiente en cuanto a sus desechos.

1.1 Objetivo general

El objetivo general es realizar un perfil de una planta de reciclaje de los neumáticos fuera de uso que entra en sinergia con lo que ya existe en Chile.

1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Establecer la situación actual de Chile en cuanto al reciclaje de los NFU.
- Actualizar el estado del arte de los métodos de valorización de los NFU.
- Elegir una(s) tecnología(s) según criterios de factibilidad para una futura planta de reciclaje.
- Elegir una zona geográfica relevante para instalar la planta.
- Realizar el perfil de la planta.

1.3 Alcances

Con “perfil de planta” se entiende realizar un diagrama de flujo de procesos, el lay-out de la planta, las evaluaciones de costos de inversión y operación, y un flujo de caja en un periodo relevante (15 años).

2 Metodología

La metodología consiste básicamente en seguir en el orden los objetivos específicos mencionados en la introducción. Las etapas son las siguientes:

- Establecer la situación actual de Chile en cuanto a la valorización de los NFU.

Primero, es necesario recopilar información reciente para poder ajustar el proyecto a las necesidades de Chile. Para su realización, se propone contactar personas relevantes en el ámbito del reciclaje (Ministerio del Medio Ambiente, Polambiente, EcoNus…).

- Actualizar el estado del arte de los métodos de valorización de los NFU.

Como se explica en la sección de antecedentes, las técnicas generales ya son conocidas. El punto del objetivo es enterarse de las mejoras de estas técnicas que existen actualmente. Para esto, se sigue la investigación de tecnología mediante artículos de empresas, papers y patentes.

- Elegir una tecnología según criterios de factibilidad técnica y económica para el diseño de la planta de valorización.

Según los dos puntos previos, es decir, las plantas de tratamiento de NFU que ya existen y las nuevas tecnologías desarrolladas, hay que elegir una opción tomando en cuenta la factibilidad y ~~la~~ viabilidad de la dicha opción con respecto a lo que ya existe en Chile y la demanda del mercado en cuanto a los productos terminados.

- Elegir una zona geográfica para instalar la planta.

Una vez elegida la tecnología, es necesario elegir un lugar donde instalar la planta de tratamiento de los NFU. El lugar tiene que encontrarse en los alrededores del resto de la cadena de tratamiento de los NFU para disminuir los costos del transporte.

- Proponer un perfil de la planta

Con la tecnología y el lugar geográficos definidos, se realiza el perfil de la planta, haciendo el diagrama de flujos de procesos (PFD), el lay out, una evaluación de los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX), y el flujo de caja. La evaluación de costos se hace mediante la cotización de los equipos y la ayuda de los profesores guía y co-guía.

A continuación en la Figura 2.1 se muestra un diagrama de bloque que presenta las cinco etapas de desarrollo de este trabajo, y los recursos necesarios para cumplir con cada etapa.

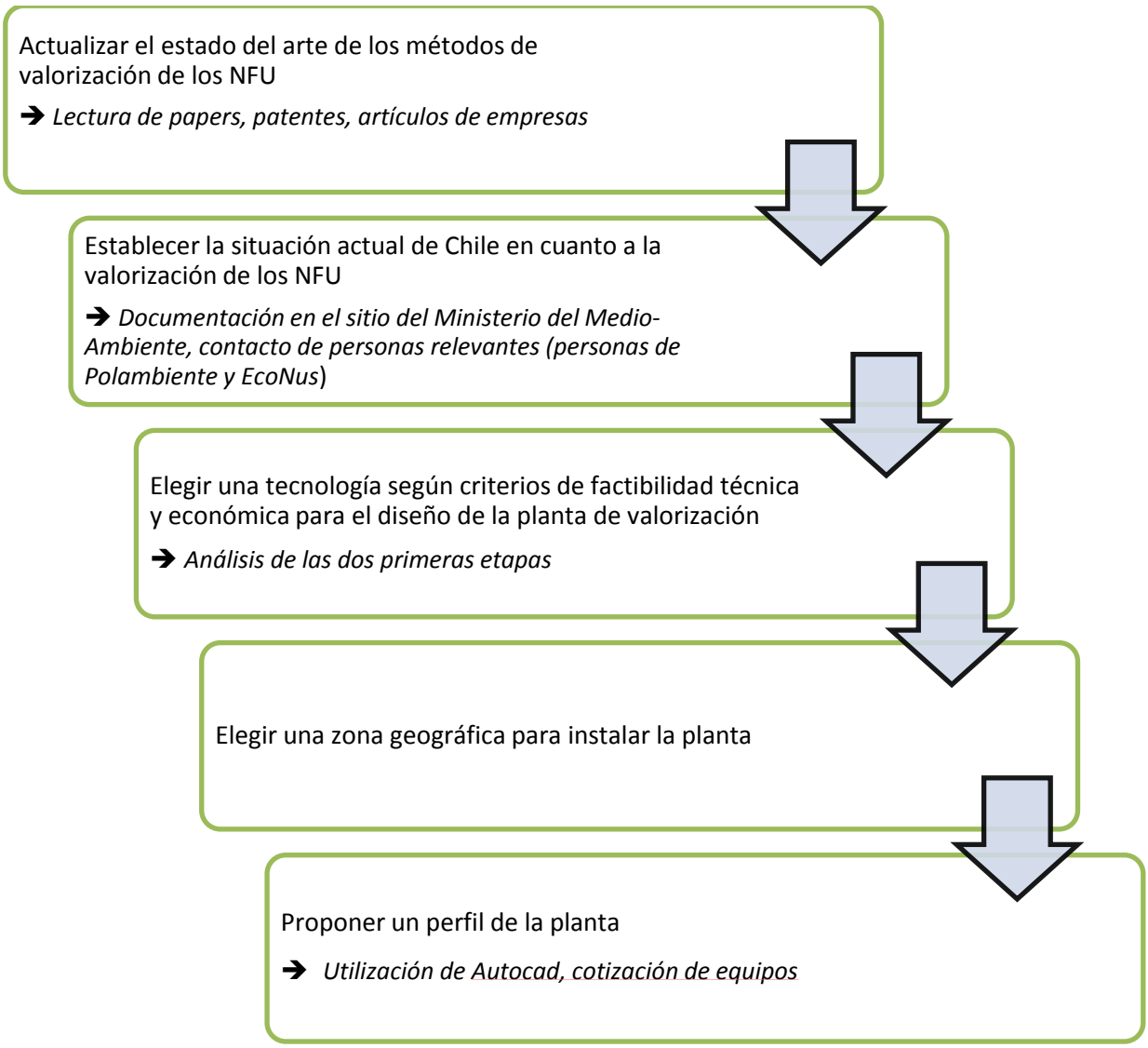


Figura 2.1: Esquema de bloques de la metodología

3 Antecedentes

3.1 Contexto: La Responsabilidad Extendida del Productor (REP) específicos

Hace pocos años, el gobierno chileno ha demostrado la voluntad de implementar la ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) mediante una ley general de residuos. Es en Mayo 2016 que entró en vigor. Esta ley obliga a los productores (que sean fabricantes o importadores) de productos prioritarios a hacerse cargo de los residuos derivados de sus productos al término de su vida útil [1]. Los productos prioritarios corresponden a los aceites lubricantes, los aparatos eléctricos y electrónicos, las baterías, los envases y embalajes, los neumáticos y las pilas. Los criterios para elegir estos productos son su consumo masivo, su volumen significativo, la generación de residuo peligroso, la factibilidad de valorización y la posibilidad de hacer una regulación comparada entre ellos. El Neumático Fuera de Uso (NFU) en particular cumple con todos los criterios a excepción del criterio "residuo peligroso".

Con dicha ley se pretende tener una mejor gestión al final del ciclo de vida de los productos, insistiendo en la mejora del sistema de recolección, almacenamiento y valorización de los materiales. En vez de abastecer los desechos por un lado o exportarlos para que otros países los reciclen, se propone tomar sus responsabilidades en cuanto a los desechos generados en Chile y aprovechar con esto al máximo los materiales.

De forma concreta, la ley REP es un instrumento económico de gestión de residuos. Ella define varios actores que tienen papeles y obligaciones complementarias para lograr dicha gestión. En primer lugar está el productor de producto prioritario que tiene que registrarse en un catastro público de productores de productos prioritarios, organizar y financiar la recolección y el tratamiento de los productos prioritarios, asegurándose que el tratamiento se realice por gestores autorizados. También, tiene que cumplir con algunas metas y obligaciones definidas por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Luego, está el consumidor de producto prioritario que tiene que entregar su producto prioritario que ya terminó su vida útil a un gestor oficial. Si se trata de un consumidor industrial, él puede valorizar por sí mismo sus residuos. Los gestores de residuos, por su parte, son entidades registradas en el MMA cuya misión es de declarar el tipo, la cantidad, los costos, el origen, el tratamiento y el destino de los residuos, para asegurar la trazabilidad de los residuos a largo plazo. Dentro de los gestores se encuentran los recolectores y los valorizadores. El MMA tiene como obligación establecer metas a seguir para los productos prioritarios, implementar y administrar el sistema de registro para la trazabilidad de los productos, elaborar un reglamento para regular todo el proceso que implica la ley REP, y proponer programas de educación ambiental, con el fin de que el reciclaje sea algo intrínseco en los consumidores.

3.2 Un objeto complejo: el neumático

Los neumáticos son productos bastante complejos ya que compuestos de polímeros, aditivos, cargas minerales y alambres metálicos, como se detalla en la Figura 3.1 a continuación:

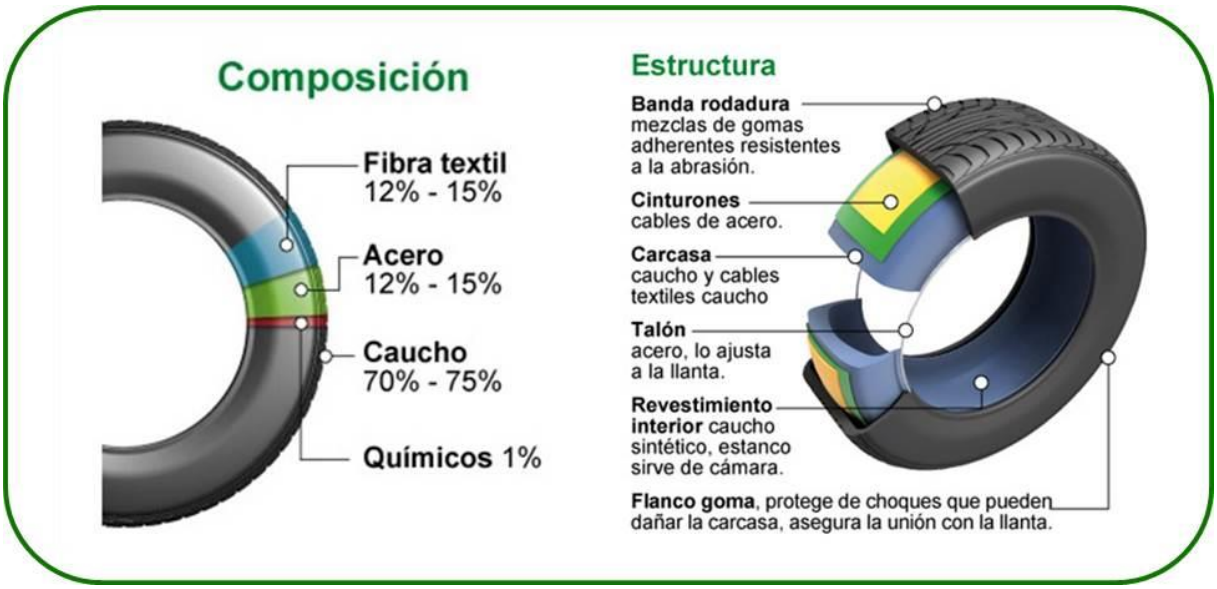


Figura 3.1: Composición y estructura de un neumático[1]

Los porcentajes presentados en la Figura 3.1 son indicativos y sirven para darse una idea de la complejidad de un neumático. Según el tipo de vehículo, el neumático tiene una estructura diferente para cumplir con la función deseada y las condiciones de utilización impuestas. La Tabla 3.1 muestra un ejemplo de las diferencias de composición que existen entre un vehículo liviano y un camión:

Tabla 3.1: Comparación de estructura de neumáticos entre un vehículo liviano y un camión

Componentes	Automóvil liviana [% del peso]	Camión [% del peso]	Función
Cauchos	48	45	Estructural – deformación
Negro de humo	22	22	Resistencia oxidación
Óxido de zinc	1,2	2,1	Catalizador
Material textil	5	0	Esqueleto estructural
Acero	15	25	Esqueleto estructural
Azufre	1	1	Vulcanización
Otros	12	-	-

Fuente: Cano Serrano, Encarnación; Cerezo García, Lidia; Fraile Urbina, Marina. Valorización Material y Energética de Neumáticos Usados. [España]: Vigilancia Tecnológica, 2007.[1]

[1] http://www.tnu.es/w/138/-como-es-un-neumatico-

Además, para insistir sobre la complejidad del neumático, se presenta en la Tabla 3.2 un ejemplo de composición química, composición que puede cambiar según el uso de dicho neumático:

Tabla 3.2: Composición química de un neumático

Elementos	Proporción [%]
Carbono	70-83
Hidrógeno	5-7,5
Azufre	1,2-1,9
Cloro	0,1-0,8
Nitrógeno	1,5
Oxígeno	5
Zinc	1,2-2,7
Hierro	5-18
Otros	5

Fuente: Cano Serrano, Encarnación; Cerezo García, Lidia; Fraile Urbina, Marina. Valorización Material y Energética de Neumáticos Usados. [España]: Vigilancia Tecnológica, 2007.[1]

Entonces, por su composición intrínseca compleja, los NFU son objetos en los cuales su reciclaje es muy complicado.

3.3 ¿Por qué los neumáticos en particular?

A pesar de que los NFU no aparezcan en el listado de residuos peligrosos [1], su almacenamiento en vertedores informales representa un riesgo ambiental importante. El peligro reside en la composición química compleja de los NFU y la gran cantidad presente en el territorio. Existen varios riesgos potenciales, entre los que se cuentan:

- La creación de un ámbito favorable a la proliferación de mosquitos, principales vectores de enfermedades como malaria o fiebre amarilla. De hecho, por su impermeabilidad y su habilidad a retener agua (por su forma hueca), los NFU acumulados en vertederos mantienen una cantidad de agua estancada.
- La creación de basurales clandestinos. Al abastecer NFU en vertederos informales, la gente comienza a dejar cualquier tipo de desechos en el mismo lugar. La formación y el crecimiento de vertedores informales pueden causar problemas de higiene.
- La quema ilegal de neumáticos, durante la cual se produce humo que contiene partículas nocivas e incluso cancerígenas para el ser humano, además, los suelos y el agua son también contaminados, como resultado del material aceitoso que se forma de esta práctica.

Por lo tanto, encontrar nuevas alternativas para la disposición de estos residuos es una necesidad de alta pertinencia, que requiere de la investigación científica y tecnológica, para enfrentar el desafío asociado a la reutilización y transformación de residuos de caucho.

3.4 La situación en Chile

Los neumáticos fuera de uso (NFU) son, entre otros, los residuos de material elastomérico que indudablemente se generan en mayores cantidades, no sólo por el recambio de este producto que exige la industria automotriz sino además, porque el 70% de todo el caucho que se produce en el mundo, ya sea natural o sintético, se emplea en la fabricación de neumáticos[2].

En Chile, un estudio realizado por el Consejo de Producción Limpia (CPL) y la Cámara de la Industria de Neumático de Chile (CINC) en 2008 [1], estima que se generan anualmente unas 47.500 toneladas de residuos elastoméricos provenientes de NFU[3]. De ese total, 3.000 toneladas se usan como estabilizadores de laderas de rellenos sanitarios, 2.000 toneladas son destinadas para uso agrícola, municipal e infraestructura y otras 2.200 toneladas se utilizan energéticamente por la co-incineración en cementeras. Se observa entonces, que el 85% de los NFU generados en el país tienen una disposición final desconocida, lo que equivale a unas 40.300 toneladas por año. El estudio [1] propone también una proyección de las toneladas de NFU que se van a generar en los próximos años. En 2015, se esperan 66.000 toneladas de NFU, y en 2020, son 80.000 toneladas. Los datos actualizados de 2015 confirman las estimaciones ya que se generaron 68.000 toneladas de NFU durante el año 2015[4], por lo cual la estimación es creíble y confirmada por la experiencia. Entonces, en 12 años, casi duplicaría la cantidad de NFU generada, y por lo tanto, son 68.000 toneladas de NFU previstos que terminarían en vertederos informales si todo sigue de esta forma. Por eso es necesario actuar desde ahora.

Además, en el mismo estudio se muestra una repartición geográfica de la comercialización de los neumáticos. Gracias a estos datos, se puede deducir cuáles son las regiones de Chile que generan la mayor cantidad de NFU, para enfocarse en las regiones críticas. Se presentan estas informaciones en la Figura 3.2.

[2] http://economia.elpais.com/economia/2015/05/22/actualidad/1432294855_616987.html
[3] El estudio sólo toma en cuenta los neumáticos que provienen de los vehículos livianos, camionetas, buses y camiones. No se consideran los NFU generados por la industria minera y agrícola.
[4] Fuente: conversación con Alejandro Navech, gerante de abastecimiento de NFU de Polambiente y Ivan Villar de EcoNus.

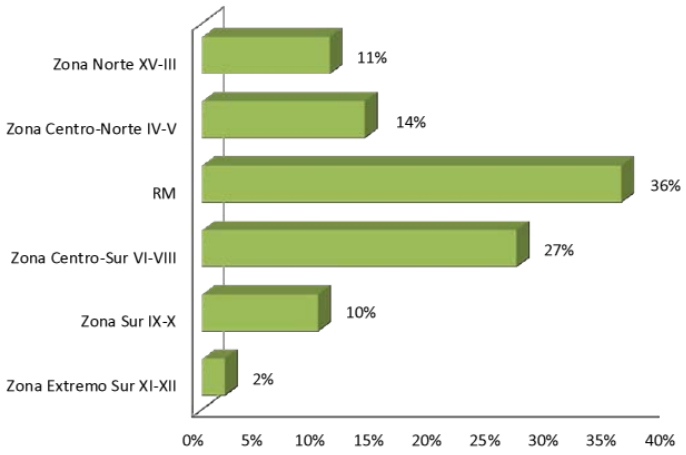


Figura 3.2: Comercialización de neumáticos por zona [1]

Es posible observar que la mayor parte de los NFU se generan en la región metropolitana, por lo cual esta zona constituye un candidato serio para la implantación del proyecto en la presente memoria.

En cuanto al reciclaje de los NFU, se encuentran dos empresas chilenas que actúan de forma activa en este momento. La primera es Cemento Melón que hizo un convenio con GoodYear en 2002 para reciclar aproximadamente 1.000 toneladas[5] al año. GoodYear entrega de forma gratuita los NFU a Cemento Melón que sólo tiene que pagar por su transporte. Luego, ocupa los NFU enteros como combustible alternativo en su horno de cementeras de la planta en La Calera [2]. Por otra parte, se encuentra Polambiente, que procesa los NFU por trituración mecánica y tiene una capacidad máxima de 7.000 toneladas[6] de NFU al año aproximadamente. Ellos producen granulados de caucho de varios tamaños, aparte de los residuos de acero y de fibras. En total, se pueden reciclar entre 7000 y 8000 toneladas de NFU al año en Chile, de los 68.000 generados por los vehículos livianos, buses y camiones. En otras palabras, se puede tratar actualmente hasta un 12% de los NFU generados en Chile.

Sin embargo, la planta de Polambiente no trabaja a su capacidad máxima. En 2014, la planta trató 6.369 toneladas de NFU, y en 2015, trató solamente 5.272 toneladas de NFU. Esta observación permite evidenciar el hecho de que el problema no es sólo reciclar los NFU, sino también obtener productos que se encuentren acorde con una demanda real del mercado. Así, según el señor Alejandro Navech, gerante de abastecimiento de NFU de Polambiente, lo que se necesita actualmente en Chile no es construir más plantas de trituración mecánica, sino encontrar tecnologías que utilicen los granulados de caucho producidos por trituración mecánica. Es por lo anteriormente señalado, que, en la sección de discusiones, se toma en cuenta este comentario, para cumplir con el objetivo de sinergia que busca el presente trabajo título.

[5] Fuente: conversación con Ivan Villar de EcoNus.
[6] Fuente: conversación con Alejandro Navech de Polambiente.

3.5 Métodos de valorización de los NFU

Existen varios métodos de valorización de los NFU. Se pueden clasificar en tres familias principales, las cuales son la utilización directa del neumático, los tratamientos mecánicos y los tratamientos térmicos. A continuación, se detalla cada una de estas familias, tratando de destacar sus ventajas/desventajas, y las aplicaciones posibles en cada caso.

3.5.1 La utilización directa del neumático

La idea de este método es el aprovechamiento de la estructura y las propiedades del neumático como objeto para cumplir con algunas funciones, sin tratamiento previo, o solamente una limpieza superficial. El neumático entero (o casi entero) se puede ocupar para construir barreras de protección en circuitos de seguridad, reductores de altura de ola y muros de contención. También se pueden utilizar para rehabilitar canteras[7]. La Figura 3.3 presenta algunos ejemplos de utilizaciones directas de NFU.

Figura 3.3: Ejemplos de utilización de neumáticos sin procesos previos

[7] http://www.signus.es/archivos_web/file/aplicaciones-neumaticos-reciclados.html

3.5.2 El tratamiento mecánico, la trituración.

Este proceso consiste en moler el neumático para obtener un polvo o un material granulado para ocuparlo de varias maneras. Para hacerlo, existen dos alternativas: la trituración mecánica a temperatura ambiente o la trituración criogénica.

3.5.2.1 Trituración mecánica a temperatura ambiente

El método más utilizado es la **trituración mecánica a temperatura ambiente** [3]. Este proceso es más común por su facilidad de instalación. Se habla de "temperatura ambiente" porque todas las operaciones se efectúan sin ningún tipo de refrigeración. Una planta típica de trituración mecánica a temperatura ambiente cuenta con varias etapas. Primero, el neumático pasa por un molino grande que lo tritura, en donde se obtienen copos de 150 [mm] aproximadamente. Luego, los copos pasan por una granuladora de la cual salen copos de un tamaño promedio de 10 [mm]. Después de la etapa de granulación, se extrae el acero de forma magnética y la fibra con la utilización de un tamiz. Esos copos gruesos se utilizan principalmente en aplicaciones civiles (mejoramiento de la capacidad de amortiguación del hormigón por ejemplo). En general, se requiere disminuir el tamaño de los dichos copos. Por eso, los copos pasan sucesivamente por granuladoras secundarias, molino de cuchillas de alta velocidad y extrusora. Se obtienen en general un rango de tamaño entre 0,6 y 4 [mm] según el tipo de máquina y la cantidad de procesos. Se ilustra un ejemplo de planta de trituración mecánica a temperatura ambiente en la Figura 3.4.

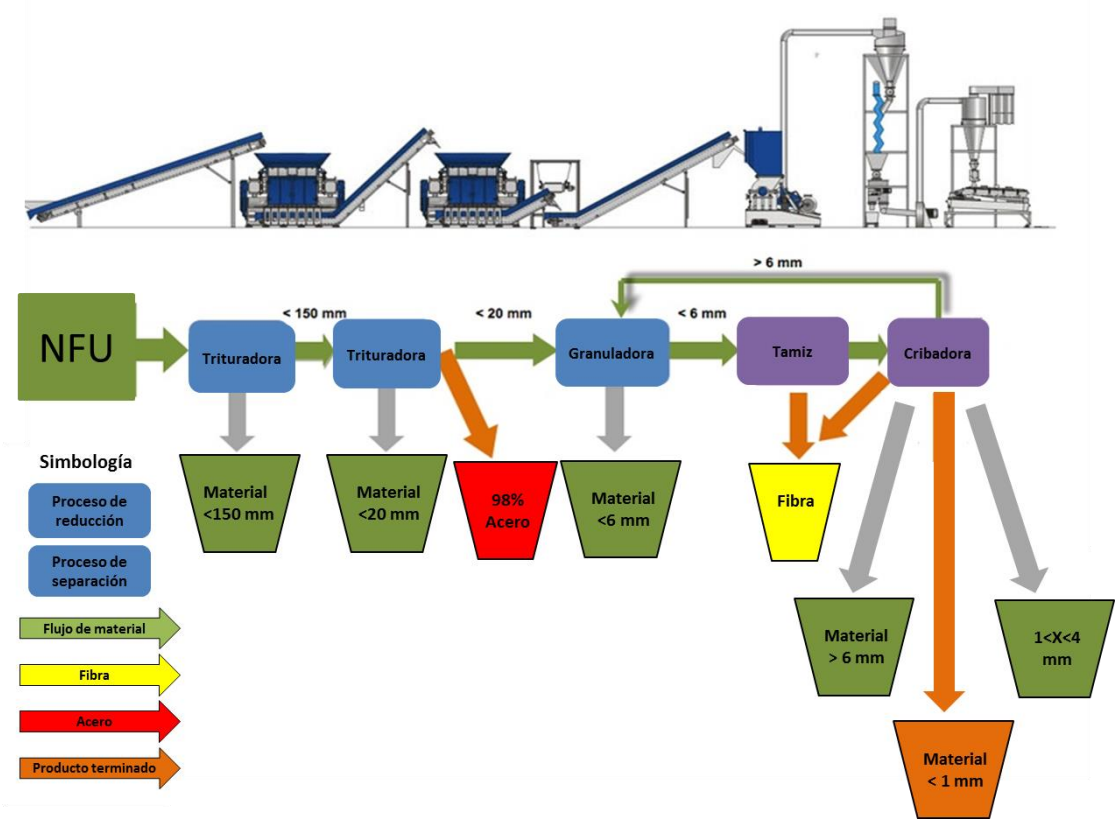


Figura 3.4: Ejemplo de proceso de trituración a temperatura ambiente[8]

En general, las plantas de trituración mecánica a temperatura ambiente ocupan una serie de procesos parecida a la de la Figura 3.4. La diferencia entre ellas queda en los modelos de molinos y granuladoras, que impactan en la cantidad de neumáticos que se puede reciclar, la calidad del producto final, la mantención y el consumo de energía. Algunas plantas tienen una etapa previa en la cual se saca la fibra y el acero del neumático antes de triturarlo. Así, se evita la fase de filtración y separación después de la trituración. La empresa Beston[9], por ejemplo, propone esta solución como un pre-tratamiento en su planta de pirolisis.

La trituración a temperatura ambiente presenta las siguientes ventajas:

- Es una tecnología bien desarrollada a nivel industrial, por lo cual es bastante fácil de implementar.
- Se presenta en forma modular: cada máquina trituradora siendo independiente, se puede agregar otra máquina según las necesidades.
- No genera residuos peligrosos
- Se aprovecha todo el material, en la medida de que se recupera en forma separada el caucho, el acero y la fibra.

En cambio, esta tecnología presenta las siguientes desventajas:

[8] Esquema inspirado de http://www.tires2powder.com
[9] http://www.bestongroup.com/

- Trabaja a alta temperatura. De hecho, para obtener los granulados más pequeños, las herramientas pueden alcanzar temperaturas cercanas a 100°C. Esto provoca a la vez una alteración de las propiedades del caucho y un desgaste prematuro de las máquinas. Este desgaste implica la necesidad de una inversión importante en mantenimiento de los equipos.
- Alto consumo de energía.

3.5.2.2 Trituración criogénica

Por otro lado, la **trituración criogénica** [3] es un proceso que consiste en llevar el neumático o los granulados bajo la temperatura de transición vítrea del caucho para luego reducir su tamaño utilizando martillos. De hecho, con las bajas temperaturas, el caucho se vuelve frágil y se necesita una energía mucho menor para reducir el neumático en granulados. Se suele trabajar a 173K o equivalentemente -100°C. Las principales ventajas de este proceso son la facilidad de separación de los tres tipos de granulados luego de la trituración (acero, fibra y caucho) y el tamaño de granulados que se obtiene. Concretamente, a la salida del proceso se recupera un polvo constituido por partículas de un tamaño del orden de decenas de micrómetros. Además, ya no se necesitan tantas etapas como en la trituración a temperatura ambiente, por lo tanto, este proceso consume menos energía. De hecho, hay solamente dos equipos principales. Primero, el túnel de refrigeración (o máquina extrusora) que enfría el neumático entero o en forma de granulados a medida que avanza. El segundo es la máquina trituradora, que reduce el neumático a un polvo cuyas partículas tienen un tamaño del orden de 10 micrómetros. Entonces, la capacidad de la trituración criogénica se define por la capacidad conjunta del túnel de refrigeración y de la máquina trituradora. En cambio, la principal desventaja es la necesidad de ocupar un fluido refrigerante como el nitrógeno líquido lo cual encarece la inversión y el mantenimiento global de la planta. De hecho, los equipos son más complejos y es necesario comprar el refrigerante regularmente [4]. En Chile, existen por lo menos dos proveedores que son Air Liquide[10] y Praxair[11].

Ambos procesos de trituración, a parte del caucho, generan copos de acero y de fibra. El estudio [3] explica que el acero se puede ocupar de forma directa como refuerzo en el hormigón armado, o fundirlo y volver a producir reforzamiento para aplicaciones en ingeniería civil. Por otra parte, la fibra se suele quemar o utilizar en aplicaciones de ingeniería civil. Por ejemplo, tiene buenas propiedades de aislación acústica.

En cuanto al caucho, existen varias aplicaciones según al tamaño del producto que sale de la trituración. Los copos de un tamaño inferior a 30 centímetros se pueden mezclar al cemento para mejorar sus propiedades de amortiguación sísmica [5] y acústica, los gránulos del orden del milímetro pueden ser usados como aditivo al asfalto para mejorar sus propiedades a menor costo, o pueden servir a la producción de suelos sintéticos (para pista de atletismo, gimnasio, hospitales

[10] http://www.airliquide.cl/
[11] http://www.praxair.cl/

entre otros)[12]. Ambos copos y granulados pueden ser quemados como combustible. Finalmente, el polvo de un tamaño cercano del micrómetro se puede mezclar a algunos termoplásticos para producir nuevas piezas de plástico sin alterar las propiedades mínimas y a la vez, haciendo bajar el costo de su producción[13]. Por lo cual, es posible producir un pellet de termoplástico constituido por un termoplástico base (polietileno de alta o baja densidad, polipropileno) y este polvo[14]. El pellet obtenido sirve para la producción de nuevas piezas de plástico.

En la Tabla 3.3 se muestra un resumen del tipo de aplicaciones que existen para los granulados de caucho según su tamaño promedio.

Tabla 3.3: Resumen de las aplicaciones de productos derivados del caucho triturado de un NFU

Producto	Tamaño	Aplicaciones
Copo	≈ 1 cm	Mejora de las propiedades de amortiguación del hormigón Aplicaciones en ingeniería civil Materia prima para pirolisis Combustible sólido
Gránulo	≈ 1 mm	Aditivo para el asfalto Suelos sintéticos Pasto sintético Aislante acústico Materia prima para pirolisis
Polvo	≈ 10 μm	Aditivo para piezas de plástico Materia prima para neumáticos de alta calidad

Fuente: Elaboración propia en base a informaciones del sitio www.signus.es

3.5.3 Tratamiento térmico

El tratamiento térmico (o termoquímico) consiste en tomar el NFU entero o en forma granulada, y elevar la temperatura para generar materia prima y/o calor según el proceso. Existen tres tipos de tratamientos térmicos: la incineración, la pirolisis y la gasificación.

3.5.3.1 Incineración

Lo más común y fácil de hacer es la incineración. La incineración consiste en quemar el neumático para aprovechar su potencial calorífico. Es el tratamiento térmico más simple ya que el neumático no se trata previamente. Esta técnica se ocupa por ejemplo, en las cementeras porque la combustión de los neumáticos mejora las características del hormigón, disminuye el costo de combustible asociado y no afecta las emisiones de gases en el aire de manera significativa[15] (en comparación con un combustible tradicional). En cambio, se pierde el material. Además, por su composición, la combustión del neumático libera gases peligrosos, así que es necesario invertir en sistemas de filtración.

[12] http://www.signus.es/archivos_web/file/aplicaciones-neumaticos-reciclados.html
[13] http://phys.org/news/2012-12-rubber-quality-products.html
[14] http://www.rticryocanada.com/
[15] http://www.scraptirenews.com/tdf.php

3.5.3.2 Pirolisis

El proceso siguiente es la **pirolisis** [6]. La pirolisis es un proceso endotérmico que induce la descomposición del material en una atmosfera sin oxígeno. El calor se transfiere de forma indirecta a través de las paredes del reactor en el cual se encuentra el material. Se eleva la temperatura por sobre los 400°C para provocar la generación de los siguientes productos:

- Gases no condensables, o gas de síntesis
- Gases condensables, con los cuales se puede producir combustible líquido
- Negro de humo, que es el residuo sólido

Los gases no condensables se suelen quemar para proveer el calor suficiente al proceso de pirolisis [6]. El combustible líquido se recupera, se refina y se puede mezclar a un diésel para utilizarlo en un motor de combustión interna [6]. Este nuevo combustible no afecta tanto el rendimiento del motor y mejora la calidad de sus emisiones. El negro de humo está utilizado en la producción de caucho, de tinta y como aditivo en la producción de varios plásticos. Además, un estudio reciente [7] muestra que el negro de humo obtenido por pirolisis de NFU tiene muy buenas propiedades para la producción de los ánodos de baterías de sodio. Este dato es importante porque las baterías de sodio parecen ser una alternativa viable a las baterías de litio. De hecho, las reservas de litio están muy bajas[16], por lo cual se prevé un aumento del precio de las baterías de litio, que están presente en la mayoría de los aparatos eléctricos. En cambio, el sodio se encuentra presente en abundancia en el planeta y es de bajo costo. Además, se logró producir una batería de tamaño estándar con propiedades parecidas a las de la batería de sodio, por lo tanto, la factibilidad técnica ha sido demostrada.

De forma general, se puede decir que la fracción gaseosa consiste en un 60% del peso inicial de caucho y la fracción sólida en un 40%. Esas proporciones pueden variar según las condiciones en que se realiza la pirolisis. En total, los factores importantes de la pirolisis son:

- Temperatura
- Presión
- Gradiente de temperatura
- Tamaño de las partículas
- Tiempo de permanencia dentro del reactor

Al variar los valores de estos factores, se puede influir sobre la composición de los productos finales de la pirolisis, tanto en su proporción como en su calidad. Teniendo tantos grados de libertad para ejecutar una pirolisis, existen una gama amplia de tecnologías de reactores [6], entre otros, el reactor por lote, reactor de lecho fijo, el reactor con horno giratorio o el reactor de lecho fluidizado. Las diferentes tecnologías se diferencian por la velocidad de reacción (se habla de pirolisis lenta que favorece la producción de residuo sólido y la pirolisis rápida que favorece la producción de líquido), por la cantidad de materia que se puede calentar, por la forma de hacer la

[16] http://www.planetoscope.com/matieres-premieres/671-production-mondiale-de-lithium.html

pirolisis (continua, semi-continua o por lote) y por lo que se puede recolectar luego de la pirolisis. El estudio [6] indica que de un punto de vista industrial los reactores con horno giratorio y de lecho fluidizado son los más relevantes porque pueden tratar material de forma continua y en cantidades importantes, del orden de una tonelada por hora. También, existen varias posibilidades para generar el calor necesario al buen desarrollo de la pirolisis. Se puede realizar mediante la combustión externa de un combustible, la combustión del combustible que aparece durante la pirolisis, la utilización de resistencias eléctricas, la utilización de micro-ondas, de plasma, entre otros. ([6], [8]) Entonces, esta tecnología se puede adaptar de manera precisa según las necesidades requeridas.

Además, la pirolisis presenta las siguientes ventajas [6]:

- El proceso en sí limita las emisiones de gases corrosivos porque retiene álcalis y metales pesados en forma de residuos sólidos
- El azufre se concentra en la parte sólida, por lo cual los combustibles gaseosos y líquidos tienen muy poco azufre.
- La combustión de los combustibles obtenidos mediante la pirolisis genera emisiones menos contaminantes que la combustión del neumático entero, emitiendo menos hidrocarburos aromáticos policíclicos.
- Ya que se concentra el carbono en la parte sólida (negro de humo), la combustión del combustible obtenido genera menos CO_2 que los combustibles fósiles tradicionales.
- Si se logra utilizar el negro de humo como material para la producción de caucho, se puede ahorrar la generación de CO_2 asociada a la producción industrial de negro de humo.

En cambio, la pirolisis presenta los siguientes límites:

- Tener una temperatura uniforme dentro del reactor es un desafío técnico.
- En general, se necesita refinar los combustibles antes de poder usarlos.

El estudio [6] afirma que la pirolisis no tiene mucho éxito en cuanto a las aplicaciones industriales. Sin embargo, como se puede ver en anexo A, un estudio de 2006 muestra que existen varias empresas que utilizan la pirolisis o la gasificación a escala semicomercial o comercial, por lo cual, la pirolisis sería factible. A continuación, se presentan algunas patentes y empresas de plantas de pirolisis.

La empresa Pyrocrat[17] propone una planta de pirolisis con horno rotatorio en cuatro tamaños diferentes para procesar neumáticos, que son 3, 6, 12 o 24 toneladas por día. A la salida, se obtiene entre 30% y 35% de negro de humo, entre 40% y 45% de aceite, y entre 20 y 30% de gas que está directamente consumido por el proceso. Su solución tecnológica se destaca por su baja temperatura de proceso (425°C), y su tiempo bastante corto por una pirolisis lenta (45 minutos). Además, la planta está automatizada y trabaja de forma continua.

[17] http://pyrolysisplant.com/

La patente [9] presenta por una parte, un diseño de reactor de lote con sistemas anexos de tratamiento de los sólidos, líquidos y gases que resultan de la pirolisis, y además, un sistema de control automático de los procesos. Un reactor puede procesar 180 neumáticos enteros y hasta el equivalente de 400 neumáticos granulados, lo cual corresponde a una carga que se encuentra entre 1,5 y 2,5 toneladas. El ciclo base consiste en una etapa de calentamiento de 4 horas y una etapa de enfriamiento de los residuos sólidos y del horno de 4 horas. En la primera fase, los gases son emitidos de forma continua. Una parte de los gases se condensa para obtener un combustible líquido mientras otra parte sirve para alimentar el reactor. Al final de las 4 horas, la temperatura alcanza unos 880°C. Luego empieza la fase de enfriamiento durante la cual se enfría el negro de humo para poder extraerlo, y se enfría el interior del reactor para poder insertar la carga siguiente. El autor indica que el diseño permite un funcionamiento continuo de 24 horas, lo cual corresponde a 3 ciclos diarios. Además, si fuese necesario, el autor propone una configuración modular de planta con varios hornos dispuestos en línea que comparten una cámara de combustión. Los productos de pirolisis son 24% de combustible líquido, 29% de gases y 47% de negro de humo.

3.5.3.3 Gasificación

Por último, la gasificación [10] es un proceso muy parecido a la pirolisis en lo que su objetivo es obtener un gas a partir del neumático elevando la temperatura. La principal diferencia es que la reacción se produce en presencia de oxígeno, hidrógeno o vapor de agua. Además, al final de la gasificación, sólo se obtiene un combustible gaseoso. Entonces, las ventajas y desventajas son las mismas. La elección entre pirolisis y gasificación depende esencialmente del tipo de producto que se desea obtener a la salida del proceso.

La Figura 3.5 presenta un esquema que detalla el ciclo de reciclaje de un NFU. Cuando falla un neumático, primero se chequea su condición. Si se puede renovar con un recauchaje, el neumático vuelve a cumplir su función inicial. Si no es el caso, se considera como NFU y entra en el ciclo de reciclaje, que consiste en las tres vías que se presentaron, es decir, la reutilización directa, los tratamientos mecánicos o los tratamientos térmicos.

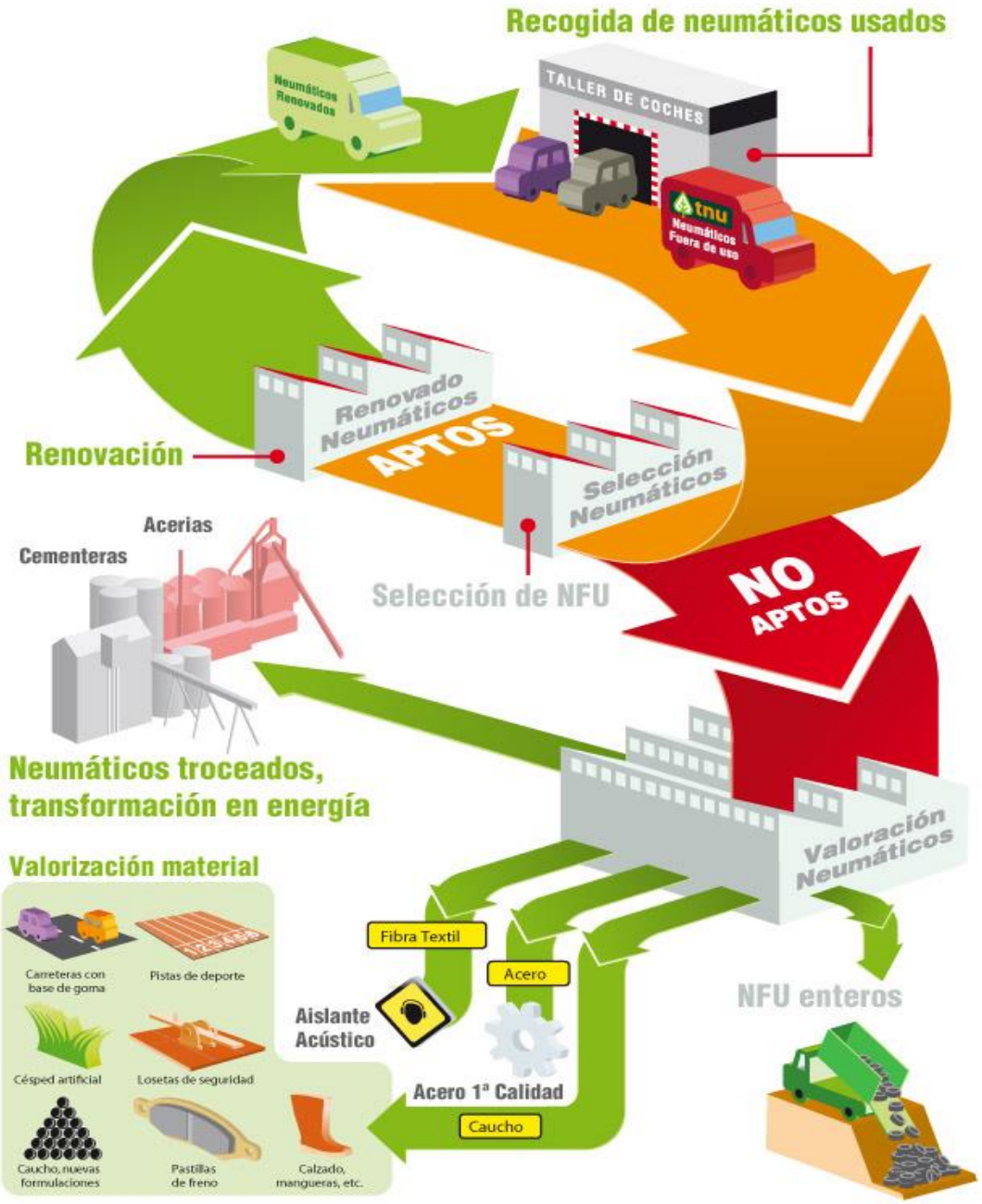


Figura 3.5: Opciones de valorización de un NFU[18]

[18] http://www.tnu.es/w/18/gestion-y-tratamiento-del-los-nfu

4 Resultados

4.1 Análisis de los antecedentes

Es necesario comparar las diferentes opciones y evaluar cuál solución presenta mayores ventajas para su desarrollo en Chile.

Primero, cabe observar que el reciclaje en Chile es aún incipiente. De hecho, sólo dos empresas (Polambiente y Melón) tratan los NFU, lo cual corresponde apenas a un 12% de la cantidad total de NFU que se generan anualmente. Entonces, se podría pensar que cualquier tipo de tecnología convendría en la medida que quedan muchos neumáticos por reciclar. Dado lo anterior, la presente memoria pretende proponer una solución que sea pertinente tanto a corto plazo como a largo plazo. Por lo cual se hace a continuación un análisis comparativo de las soluciones presentadas en los antecedentes, y se vincula con la situación actual de Chile.

4.1.1 Utilización directa del NFU

Esta solución, aunque tenga ventajas, no es viable a largo plazo porque sus aplicaciones son demasiado puntuales. Es una buena idea para deshacerse de forma rápida y sin mayor costo de una pequeña cantidad de NFU, sin embargo, se entiende que no sirve para reciclar de forma continua varias toneladas de neumáticos durante varios años. Hay una cantidad finita de posibilidades. Por eso, no se elige esta solución en esta memoria.

4.1.2 Trituración mecánica

Esta solución parece más viable ya que produce materia prima a partir de neumáticos. Luego, según el tamaño del granulado, se puede ocupar para varios tipos de proyectos, tal como se explica en la sección de antecedentes. La solución más simple sería proponer una planta de trituración a temperatura ambiente. De hecho, es una tecnología bien desarrollada a nivel industrial y se obtiene un producto que tiene varias aplicaciones sencillas en ingeniería civil. Por otra parte, responde a la problemática del almacenamiento de los NFU. Hoy, un problema mayor en Chile es la proliferación de vertederos informales. Triturar los NFU permite facilitar su almacenamiento ya que disminuye el espacio requerido. Es más simple almacenar granulados que NFU. De esta forma, se puede transformar poco a poco los vertederos informales en reservas de granulados. Esos granulados pueden ser utilizados de varias maneras según su tamaño.

Como lo muestra el estudio [5], poner una capa de dos metros de mezcla de tierra y copos de NFU (≈ 15 [cm]) a una altura de 30% del volumen total mejora de forma significativa la amortiguación de las ondas sísmicas. Chile siendo uno de los países con mayor sismicidad en el mundo, se podría imaginar una nueva legislación imponiendo el uso de esta capa de amortiguación bajo cualquier nueva estructura. De esta forma, se asegura la utilización de los productos que salen de la planta, creando una demanda por una decisión política.

De la misma manera, se podría imponer la utilización de los granulados de NFU como aditivo en el asfalto para mejorar la vida útil y las propiedades de las carreteras a lo largo del país. De

hecho, hoy no se ocupa este aditivo porque la duración de las licitaciones de las carreteras no incentiva a ocuparlos. Concretamente, una licitación dura 20 años, y sin aditivo, es necesario cambiar el asfalto cada 10 años. Sin embargo, con aditivo, la vida útil del asfalto pasa a 14 años, por lo cual, si se cambia dos veces el asfalto durante una licitación, él que paga este cambio paga una vida útil de 28 años aunque tenga la licitación sólo por 20 años. Entonces, un cambio en la duración de las licitaciones permitiría incentivar la utilización de los granulados de NFU como aditivo en el asfalto[19].

Otra solución más innovadora sería optar por la trituración criogénica y trabajar a partir de los granulados de Polambiente. De hecho, lo que resulta de las entrevistas es que el problema hoy no es producir los granulados sino que venderlos. Optar por la trituración criogénica da la oportunidad de crear una demanda de granulados y de esta forma, la planta de este trabajo de título entra en sinergia con lo que ya tiene Chile. Además, producir un polvo muy fino de caucho da la oportunidad de posicionarse como proveedor de materia prima para la producción de piezas de plástico reciclado, lo cual es seguramente el futuro del reciclaje de los NFU. De hecho, se puede ocupar hasta un 80% de polvo de caucho reciclado para la producción de algunas piezas de plástico. Al usar una gran cantidad de caucho reciclado proveniente de NFU en las piezas de plástico permite disminuir el consumo de plástico nuevo. De esta forma, la producción de piezas de plástico se acerca un poco más a un funcionamiento circular en vez de ser lineal. Sin embargo, esta tecnología siendo bastante joven aun, acarrea un riesgo de no tener beneficios en los primeros años de funcionamiento de la planta, ya que no muchas empresas ocupan este tipo de mezcla todavía.

4.1.3 Tratamiento térmico

El primer tratamiento térmico presentado, la incineración, no es una solución muy recomendable a largo plazo. Esta solución, aunque sea la más simple, tiene varias limitaciones. Primero, sólo se aprovecha el valor energético del NFU. Luego, no cualquier tipo de horno puede ocupar copos de NFU como combustible. Al final, al quemar el caucho directamente se generan humos peligrosos que hay que tratar de alguna forma. Entonces, no parece relevante invertir en una planta de incineración.

En cambio, la gran ventaja de elegir la pirolisis o la gasificación, es que ambos producen combustibles más limpios que los combustibles fósiles. Mediante una refinación previa, estos combustibles se pueden utilizar en motores o turbinas para generación de energía. O se pueden vender en el mercado, mediante una campaña de comunicación para informar a la gente que este combustible de sustitución tiene ventajas ciertas. Entonces, es una inversión bastante segura. Ahora, por tema de anticipación y de innovación, la pirolisis parece más atractiva por la producción de negro de humo que ofrece. De hecho, como lo explica [7], el negro de humo que proviene de los NFU es un candidato muy atractivo para servir de ánodo para las futuras baterías de sodio, que pueden reemplazar las baterías de litio en los próximos años. Invertir ahora en una planta capaz de producir un negro de humo de buena calidad da la oportunidad a Chile de ser en

[19] Este análisis surgió durante una conversación con Ivan Villar de EcoNus.

el futuro uno de los proveedores preferenciales de negro de humo, y tal vez, desarrollar la industria de las baterías de sodio. Y si no resulta, el negro de humo sigue siendo interesante para la producción de caucho o de tinta, o como aditivo en la producción de plástico por ejemplo. Además, todos los tratamientos térmicos trabajan tanto con los neumáticos enteros como con los granulados producidos por Polambiente.

4.2 Elección de tecnología y zona geográfica

Como se explicó en la sección anterior, la trituración criogénica y la pirolisis lenta parecen muy interesantes, en particular por sus productos finales. Por un lado, la trituración criogénica produce un polvo de caucho que parece tener un futuro prometedor para la producción de piezas de plástico. Al utilizar una mezcla de este polvo y de plástico nuevo, se disminuye la necesidad y por lo tanto el consumo de materia plástica nueva, por lo cual se ahorra material a gran escala. Por otro lado, la pirolisis parece atractiva por la producción de negro de humo. A largo plazo, el negro de humo parece ser un buen candidato como material del ánodo de la batería de sodio. A corte plazo, sirve para la producción de caucho, tinta y sirve de aditivo en la producción de plásticos. Por otra parte, la pirolisis genera combustible más limpio que los combustibles fósiles, que pueden ser utilizados como diésel mediante un refinamiento previo. Por todas estas razones, se decide desarrollar ambas soluciones de la siguiente manera: se propone en ambos casos un diagrama de flujo de proceso y un lay-out, y luego, sólo se realiza el análisis económico para la pirolisis.

Además, se elige desarrollar tecnologías que trabajan con granulados de caucho que se compran a Polambiente. De esta forma, este proyecto pretende dinamizar la actividad de Polambiente utilizando los granulados para obtener productos de mayor demanda. Ya que la planta de Polambiente parece no trabajar en su punto óptimo, probablemente por falta de demanda, se prefiere tratar de estimular la actividad de la planta existente en vez de generar una competencia directa mediante la implementación de otra planta de trituración mecánica. En otras palabras, se agrega un eslabón a la cadena de reciclaje que existe en Chile, en vez de empezar otra cadena desde cero. Siguiendo esta lógica, la planta propuesta se instalaría en la comuna de Lampa, para quedar cerca de la planta de Polambiente y así reducir los tiempos de transporte entre las dos plantas.

4.3 Trituración criogénica

En esta sección se presentan los procesos asociados a la trituración criogénica, cálculos primarios de dimensionamiento y un lay-out de la planta.

4.3.1 Diagrama de flujo de procesos

La Figura 4.1 presenta el diagrama de procesos (PFD) de la trituración criogénica.

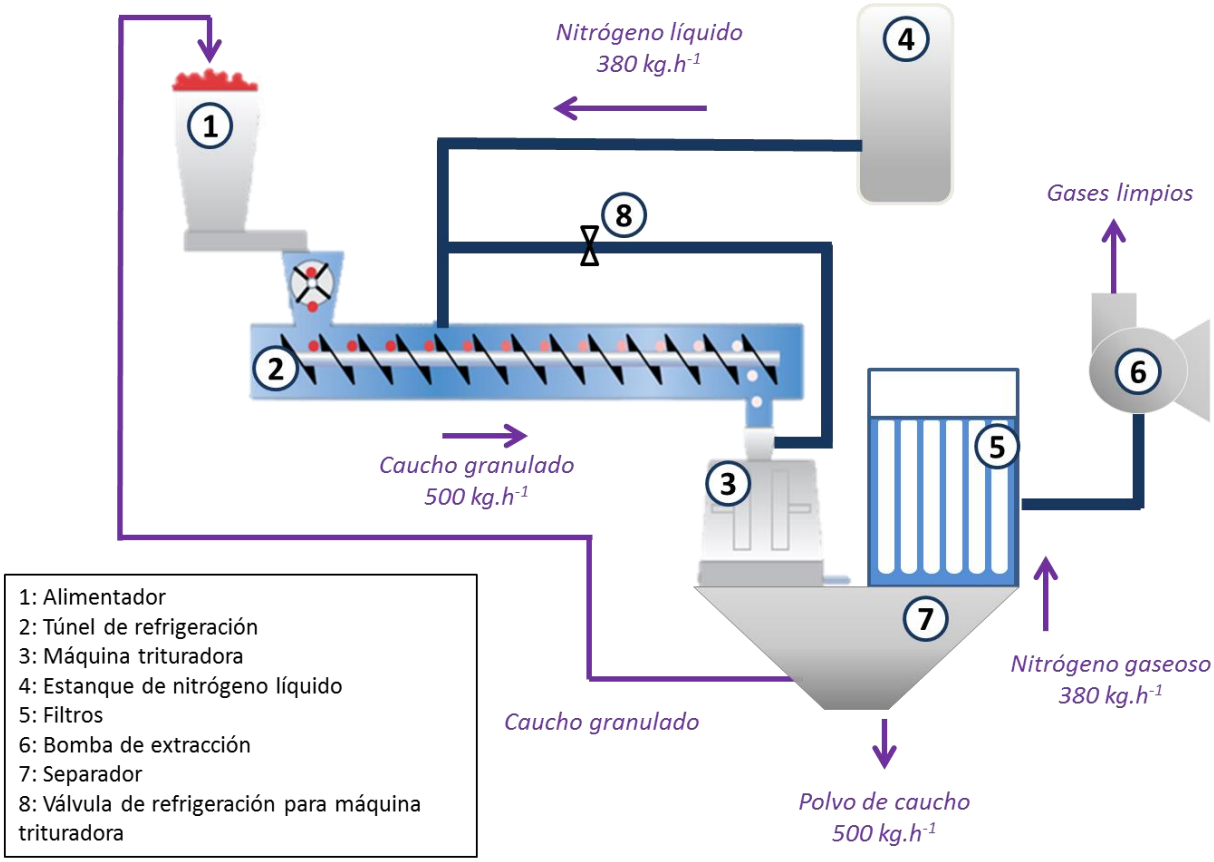


Figura 4.1: Diagrama de flujo de procesos de la trituración criogénica[20]

Los residuos de caucho en forma de granulado de un tamaño aproximado de 5 mm se acumulan en un alimentador. El alimentador libera los granulados de forma continua en el túnel criogénico. En este túnel, un transportador tipo sin fin (o cinta transportadora según el modelo) hace avanzar los granulados, mientras se inyecta de forma continua nitrógeno líquido. Pasando en el túnel, la temperatura de los granulados baja hasta que el caucho se vuelve frágil. Lo anterior se produce a una temperatura de -100°C aproximadamente. Luego, los granulados pasan por una máquina trituradora que los pulveriza. A la salida, un separador filtra los granulados que no tienen el

[20] Esquema del autor realizado a partir de imágenes encontradas en los sitios www.airproducts.com y www.messer.fr

tamaño deseado. Esos granulados se recuperan y se devuelven al alimentador. Por otra parte, se obtiene un polvo de caucho.

Por su parte, el nitrógeno líquido enfría los granulados en el túnel por conducción y por calor latente al evaporarse. En forma gaseosa, sigue enfriando el caucho, y enfría también la máquina trituradora. En la salida, el gas pasa por un ciclón y un filtro de mangas para extraer el polvo que conlleva. Finalmente, se diluye el nitrógeno antes de liberarlo en la atmosfera.

4.3.2 Cálculos de dimensionamiento

4.3.2.1 Túnel de refrigeración

En esta sección se presenta un dimensionamiento simple del equipo crítico que es el túnel de refrigeración. La idea es dimensionar de forma teórica el túnel de refrigeración, y averiguar si existe un modelo en el mercado que coincida con los valores teóricos. En este caso, se considera el catálogo de la empresa Airproducts, que propone cuatro modelos diferentes de túnel de refrigeración (un extracto de este catálogo está presentado en el Anexo 2). El desarrollo de este cálculo se hace de la manera siguiente: se fijan algunas hipótesis simplificadoras, se determina el calor a disipar del caucho, el flujo másico de nitrógeno líquido, el tiempo mínimo de residencia en nitrógeno líquido para que un granulado alcance la temperatura objetivo, las dimensiones mínimas del túnel, y al final, se comparan esas dimensiones a modelos reales de túneles de refrigeración.

➢ Hipótesis de cálculo

El cálculo de transferencia de calor se hace bajo ciertas hipótesis simplificadoras:

- Se considera que todos los granulados están sumergidos en el nitrógeno líquido. En realidad, el nitrógeno se evapora a los -195°C. En su forma gaseosa, el nitrógeno participa al enfriamiento del caucho por supuesto. Sin embargo, esta hipótesis da un resultado conservador en cuanto al consumo de nitrógeno líquido. En otras palabras, se obtiene un valor máximo de consumo de nitrógeno líquido.
- Se considera que el intercambio de calor se hace mediante conducción y evaporación del nitrógeno líquido. Se omite de forma voluntaria el fenómeno de convección.
- Se considera que los granulados se aglomeran al llegar en el túnel. Entonces, todo pasa como si el tornillo sin fin del túnel hiciera avanzar un sólido de caucho, lo cual hay que enfriar. En forma más específica, el objetivo es de enfriar la parte central del sólido aglomerado.
- Se supone que el caucho se encuentra a temperatura ambiente cuando entra en el túnel.
- No se pudo obtener datos precisos de Polambiente en cuanto a la cantidad de granulados que podría abastecer la planta de trituración mecánica. Por lo cual, se decide trabajar con 1.000 toneladas de granulados anuales, lo cual corresponde a un 15% de la capacidad de reciclaje de la planta de Polambiente. Sabiendo que Polambiente tiene problemas para vender sus granulados, este número no parece demasiado grande. En un año, hay

aproximadamente 253 días laborales, lo cual da un flujo de 4 toneladas por día de granulados que hay que procesar. Considerando un día de 9 horas laborales, y un tiempo muerto de puesta en marcha / parada de planta de 1 hora diaria, la planta tiene que procesar 500 [kg.h^{-1}]. Este valor no parece demasiado grande ya que existen procesos que tratan 2.725 [kg.h^{-1}] de granulados[21].

- Cálculo del calor a disipar

La potencia calorífica $\dot{Q}$ que hay que disipar para llevar el caucho a su estado frágil se calcula de la forma siguiente:

$$\dot{Q} = C_{p_{caucho}} \frac{\dot{m}_{caucho}}{3600} \Delta T_{caucho} = \frac{\dot{m}_{nitrógeno}}{3600} \left(C_{p_{nitrógeno}} \Delta T_{nitr\,ógeno} + L_{hv_{nitrógeno}} \right) \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}$: Potencia calorífica interna del caucho [W]
$C_{p_{caucho}}$: Capacidad térmica del caucho [J.kg^{-1}.K^{-1}]
$C_{p_{nitrógeno}}$: Capacidad térmica del nitrógeno [J.kg^{-1}.K^{-1}]
$L_{hv_{nitrógeno}}$: Calor latente de evaporización del nitrógeno [J.kg^{-1}]
$\dot{m}_{caucho}$: Flujo másico de caucho [kg.h^{-1}]
$\dot{m}_{nitrógeno}$: Flujo másico de nitrógeno [kg.h^{-1}]
ΔT_{caucho} : Diferencia de temperatura del caucho entre la entrada y la salida del túnel refrigerante [K]
$\Delta T_{nitr\,ógeno}$: Diferencia de temperatura del nitrógeno entre la entrada y la salida del túnel refrigerante [K]

Por otra parte, se conoce los valores siguientes relativos al caucho:

Tabla 4.1: Valores relativos al caucho para determinar la potencia calorífica $\dot{Q}$

$C_{p_{caucho}}$ [22]	1.380	[J.kg^{-1}.K^{-1}]
$\dot{m}_{caucho}$	500	[kg.h^{-1}]
$T_{i_{caucho}}$ [20]	293	[K]
$T_{f_{caucho}}$ [20]	173	[K]
ΔT_{caucho}	120	[K]

Fuente: Elaboración propia

[21] http://www.rticryocanada.com/technologies/fine-mesh/
[22] http://www.engineeringtoolbox.com/

La temperatura inicial $T_{i_{caucho}}$ es de 293K porque se supone que el caucho está a temperatura ambiente antes de entrar al túnel de refrigeración. La temperatura final $T_{f_{caucho}}$ corresponde a la temperatura a la cual el caucho se vuelve frágil.

Con esos datos y la ecuación (1), se determina que la potencia calorífica que hay que disipar vale $\dot{Q}$ = 23.000 W.

- Cálculo del flujo másico de nitrógeno líquido

Luego, se determina el flujo de nitrógeno líquido necesario para disipar $\dot{Q}$:

$$\dot{m}_{nitrógeno} = \frac{3600 * Q}{\left(C_{p_{nitrógeno}} \Delta T_{nitr\,ógeno} + L_{hv_{nitrógeno}}\right)} \qquad (2)$$

Conociendo los valores siguientes relativos al nitrógeno líquido:

Tabla 4.2: Valores relativos al nitrógeno líquido para determinar el flujo másico de nitrógeno líquido

$C_{p_{nitrógeno}}$ [23]	2.040	[J.kg^{-1}.K^{-1}]
L_{hv} [21]	198.300	[kg.h^{-1}]
$T_{i_{nitrógeno}}$ [21]	68	[K]
$T_{f_{nitrógeno}}$ [21]	78	[K]
$\Delta T_{nitr\,ógeno}$	10	[K]

Fuente: Elaboración propia

La temperatura inicial $T_{i_{nitrógeno}}$ corresponde a la temperatura del nitrógeno al salir del estanque. La temperatura final $T_{f_{nitrógeno}}$ corresponde a la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido. No se toma una temperatura más alta porque se supone que el proceso trabaja a presión ambiente y según las hipótesis tomadas, sólo se trabaja con nitrógeno líquido. Con una temperatura más alta, el nitrógeno es gaseoso.

Con esos datos, se determina que el flujo másico de nitrógeno líquido necesario para disipar el calor Q = 23.000 [W] vale $\dot{m}_{nitrógeno}$ = 380 [kg.h^{-1}]. Entonces, se obtiene un consumo de 0,76 kilogramos de nitrógeno líquido por cada kilogramo de caucho. Sabiendo que en promedio, el consumo de este tipo de instalaciones vale entre 0,5 y 1 kilogramos de nitrógeno líquido por cada kilogramo de caucho[24], el resultado tiene sentido.

[23] https://technifab.com/
[24] http://entire-engineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf

- Tiempo de residencia en nitrógeno líquido y dimensionamiento del túnel de refrigeración

En su artículo [11], M.W. Biddulph propone una curva experimental para determinar el tiempo de residencia en nitrógeno líquido de materiales con baja difusividad térmica. Esta curva se hizo con resultados experimentales sobre Teflon y Perspex, que son dos materiales de baja difusividad térmica. Evidencia una relación exponencial entre Y y X, donde:

$$Y = \frac{T' - T}{T' - T_b} \quad ; \quad X = \frac{\alpha\theta}{L^2} \tag{1}$$

Donde:

T' : Temperatura del ambiente [K]
T : Temperatura del punto de interés [K]
T_b : Temperatura inicial uniforme del cuerpo estudiado [K]
α : Difusividad térmica [m².s^{-1}]
θ : Tiempo de residencia [s]
L : Mitad del espesor del cuerpo estudiado [m]

Se utiliza la curva de M.W. Biddulph [11] para determinar la ecuación que vincula Y y X. Se puede observar en la Figura 4.2 los puntos utilizados para determinar los parámetros de la dicha ecuación y en la Figura 4.3 la interpolación realizada con el software Excel:

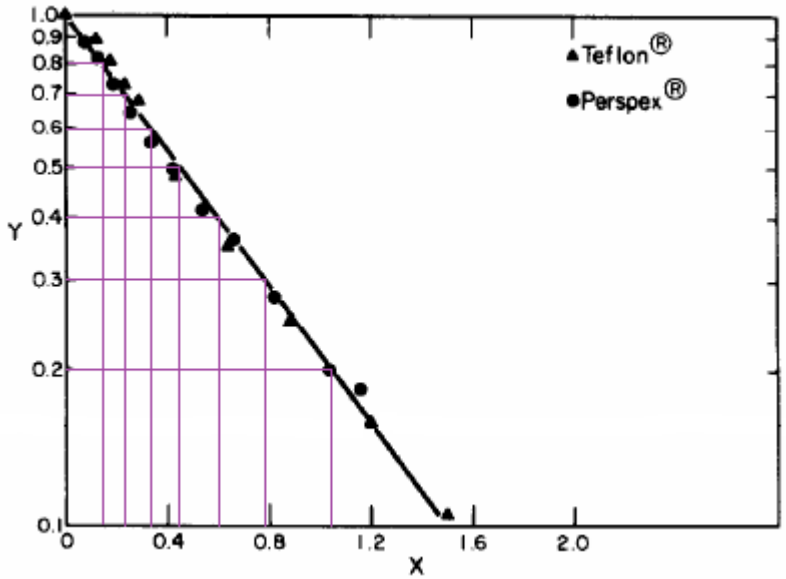


Figura 4.2: Obtención de los puntos para realizar la interpolación

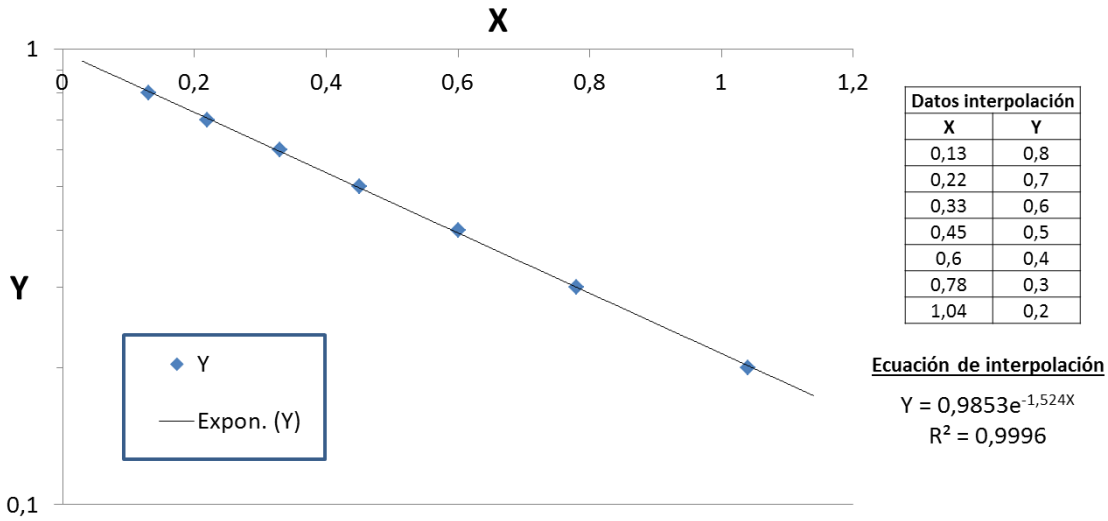


Figura 4.3: Interpolación de los puntos obtenidos para evidenciar la ecuación vinculando Y y X

La ecuación obtenida se escribe en forma lineal:

$$\ln(Y) = \ln(0{,}9853) - 1{,}524\, X \tag{2}$$

Luego, utilizando las notaciones de la ecuación (1), se obtiene una expresión del tiempo de residencia del caucho en nitrógeno líquido:

$$\theta = \frac{L^2}{1{,}524\, \alpha}\left(\ln(0{,}9853) - \frac{T_{nitrógeno} - T_{f_{caucho}}}{T_{nitrógeno} - T_{i_{caucho}}}\right) \tag{3}$$

Donde:

θ : Tiempo de residencia en nitrógeno líquido [s]
L : Mitad del espesor del cuerpo aglomerado de caucho [m]
α : Difusividad térmica del caucho [m².s^{-1}]
$T_{nitrógeno}$: Temperatura del nitrógeno líquido [K]
$T_{i_{caucho}}$: Temperatura inicial del caucho [K]
$T_{f_{caucho}}$: Temperatura final del caucho [K]

Para calcular el tiempo de residencia en nitrógeno líquido θ del cuerpo aglomerado de caucho, es necesario conocer la difusividad térmica de dicho caucho. Por eso, se utiliza el resultado del estudio realizado en el artículo [11]:

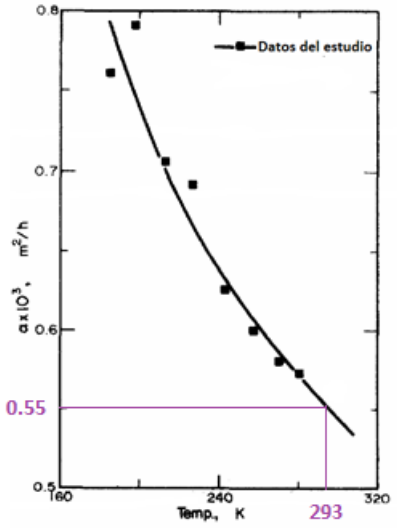


Figura 4.4: Selección del valor de difusividad térmica del caucho

En la Figura 4.4, se puede observar que la difusividad térmica α del caucho toma un valor de $5{,}5x10^{-4}$ [$m^2.h^{-1}$] a temperatura ambiente. A medida que baja la temperatura, α aumenta, es decir que el caucho se opone cada vez menos a la transferencia de calor. Para simplificar este fenómeno, se conserva un valor constante de α igual a su valor a temperatura ambiente. De esta manera, se calcula un valor conservador del tiempo de inmersión del caucho en nitrógeno líquido.

Luego, hay que fijar el espesor del sólido aglomerado para poder fijar el valor de *L*, que es la mitad del espesor del dicho sólido aglomerado. Para hacer eso, es necesario definir la carga recomendada para un trasportador tipo sin fin. La carga depende en particular del material transportado. Para el caso del caucho, se recomienda una carga de 30%[25]. Se ilustra en la Figura 4.5 lo que representa una carga de 30% para un transportador sin fin y se representa el largo *L*:

Figura 4.5: Representación de una extrusora que trabaja con una carga de 30%[26]

El valor de *L* se determina con el proceso iterativo presentado en la Figura 4.6:

[25] http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/screw-conveyor-capacity.htm
[26] Imagen del sitio http://www.kwsmfg.com modificado por el autor de este trabajo

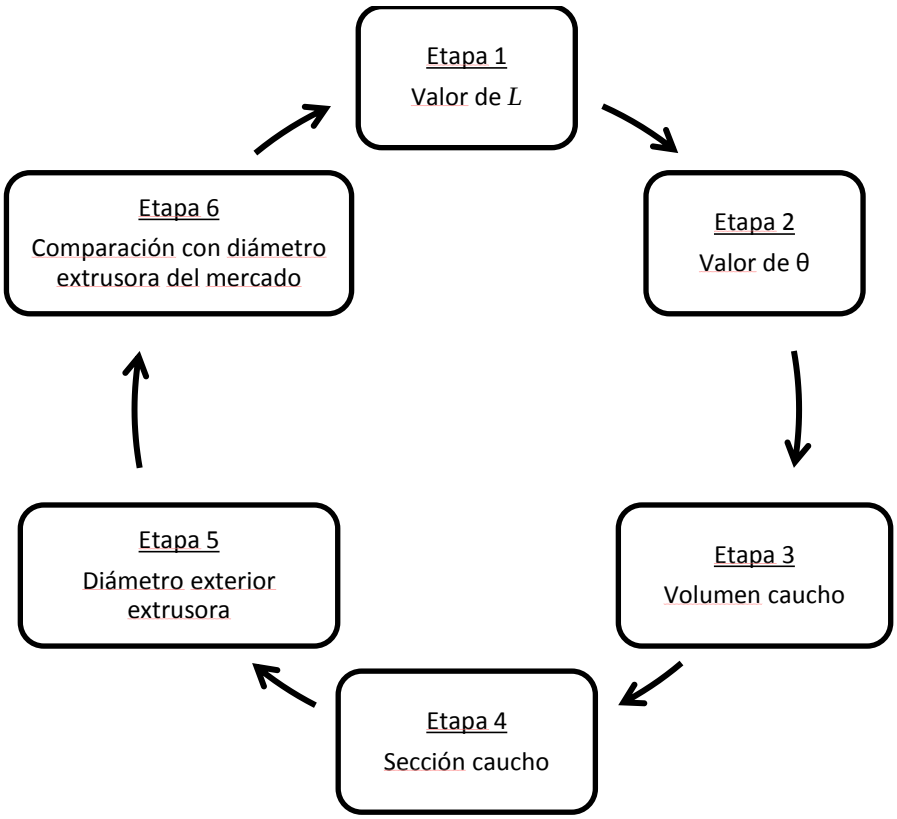


Figura 4.6: Proceso de iteración para la determinación del valor de L

El proceso de iteración se desarrolla de la forma siguiente:

Etapa 1: Se fija de forma arbitraria un valor de la mitad del espesor del sólido aglomerado L

Etapa 2: Con la ecuación (5), se calcula el valor del tiempo de residencia en nitrógeno líquido θ

Etapa 3: A partir del flujo másico de caucho, se deduce el flujo volumétrico de caucho asociado. Se multiplica el flujo volumétrico por el tiempo de permanencia para conocer el volumen de caucho que está dentro del túnel de refrigeración a un instante dado.

Etapa 4: Se divide el volumen obtenido por el largo estimado del túnel. El túnel con mayor capacidad del catálogo tiene un largo de 6 metros. La sección obtenida es la sección que aparece en marrón en la Figura 4.5.

Etapa 5: Se fija el diámetro interno del tornillo sin fin a lo que encuentra en el catálogo (0,3 [m]), y se busca el diámetro del túnel de refrigeración de tal modo que la sección obtenida en la etapa 4 represente un 30% del área de la corona útil del túnel. Se habla de corona porque no se considera el área central que ocupa el eje del tornillo. Al fin de esta etapa, se obtiene el diámetro grande de la corona.

Etapa 6: Se compara el diámetro obtenido en la etapa 5 con el diámetro de la máquina extrusora más grande del catálogo. Se vuelve a la etapa 1 si el diámetro obtenido en la etapa 5 es más grande o mucho más pequeño que el diámetro del túnel del catálogo.

Al final de este proceso, se presentan en la Tabla 4.3 las características del túnel de refrigeración:

Tabla 4.3: Características del túnel de refrigeración

Flujo másico caucho	500	[$kg.h^{-1}$]
L	0,0165	[m]
Θ	15,1	[min]
Carga	30%	-
Largo túnel	6	[m]
Diámetro interior	0,3	[m]
Diámetro exterior	0,405	[m]
Velocidad avance caucho	0,4	[$m.min^{-1}$]
Velocidad de rotación del tornillo	1	[RPM]

Fuente: Elaboración propia

Entonces, la teoría indica que el túnel de refrigeración E300-XL propuesto en el catálogo de la empresa Air Products sirve para el flujo de entrada definido al principio.

4.3.2.2 Estanque de nitrógeno líquido

Se necesita un flujo másico de 380 [$kg.h^{-1}$] de nitrógeno líquido. Como la densidad del nitrógeno líquido corresponde a 807 [$kg.m^{-3}$], se necesita un flujo volumétrico de 0,47 [$m^3.h^{-1}$]. Con un día de trabajo de 8 horas, se necesita un flujo de 3,78 [$m^3.h^{-1}$] diario. La empresa Airproducts propone estanques de nitrógeno líquido hasta 50 [m^3] de capacidad[27]. Un estanque de este tamaño otorga 13 días de autonomía. Entonces, con dos de estos estanques, se tiene una autonomía de trabajo de 26 días, lo cual corresponde a más de un mes en término de días hábiles. Además, ocupar dos estanques con dos bombas en paralelos aumenta de forma considerable la disponibilidad y la confiabilidad del proceso. Lo anterior es así debido a que, si uno está vacío, el otro puede seguir funcionando mientras se llena el primero, o si falla una bomba, la segunda línea sigue asegurando el enfriamiento necesario al proceso.

En cuanto a la dimensión de dicho estanque, no se pudo obtener a partir de los datos disponibles en el catálogo de Airproducts, por lo cual se debe evaluar. Se elige tomar un diámetro de 3 metros, lo cual corresponde a una altura de 5,6 metros. Seguramente, se puede tener un diámetro más pequeño, sin embargo, se prefiere ser conservador en cuanto al espacio necesario horizontal, que es un factor más limitante que la altura en un galpón.

4.3.2.3 Ciclón

Se sigue el método de diseño descrito en [12]. Este método permite calcular las dimensiones principales del ciclón mediante el conocimiento del flujo de entrada, el fluido de trabajo y el tipo de partículas. Primero, se elige el tipo de ciclón en función del tamaño promedio de las partículas

[27] http://www.airproducts.fr/products/Gases/supply-options/bulk-deliveries-and-storage-systems/typical-bulk-liquid-storage-systems.aspx

y de su distribución. En este caso, no se conoce la distribución de los varios tamaños de las partículas, sin embargo, el producto final siendo un polvo de partículas de 10 [μm] en promedio, se recomienda trabajar con un ciclón de alta eficiencia. Las dimensiones importantes de un ciclón de alta eficiencia se pueden calcular a partir del diámetro principal Dc del ciclón. Se presenta en la Tabla 4.4 la relación entre cada dimensión del ciclón y Dc:

Tabla 4.4: Factores para calcular las dimensiones del ciclón en función de Dc [12]

Longitud	Valor / Dc
Altura entrada, a	0,5
Ancho entrada, b	0,2
Altura salida, S	0,5
Diámetro salida, Ds	0,5
Altura parte cilíndrica, h	1,5
Altura parte cónica, z	2,5
Altura total del ciclón, H	4
Diámetro salida partículas, B	0,375

Fuente: Elaboración propia

Ahora, hay que definir el diámetro del ciclón Dc. Para eso, se debe seleccionar una velocidad de entrada Vi. En el método de diseño [12] recomienda trabajar con 15 [$m.s^{-1}$] para maximizar la eficiencia. Además, el flujo de nitrógeno gaseoso es de 380 [$kg.h^{-1}$], lo cual corresponde a un flujo volumétrico Q_{vol} de 0,09 [$m^3.s^{-1}$]. Con estos dos datos, se puede deducir el área del ducto de entrada, y luego, el valor de Dc de la forma siguiente. El área primero se calcula como el flujo Q_{vol} dividido por la velocidad Vi:

$$Area\ ducto\ entrada = \frac{Q_{vol}}{V_i} = \frac{0{,}09}{15} = 0{,}006\ [m^2] \tag{4}$$

También, el ducto de entrada siendo rectangular, el área se puede expresar como la multiplicación de la altura de entrada a por el ancho de entrada b, cuales se pueden expresar en función de Dc:

$$Area\ ducto\ entrada = ab = (0{,}5D_c) * (0{,}2D_c) = 0{,}1D_c^2 \tag{5}$$

Entonces, se obtiene el valor del diámetro Dc:

$$D_c = \sqrt{\frac{0{,}006}{0{,}1}} = 0{,}246\ m = 246\ [mm] \tag{6}$$

Con este dato, se deducen todas las medidas del ciclón, que se resumen en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: Dimensiones del ciclón

Longitud	Valor [mm]
Diámetro ciclón, Dc	256
Altura entrada, a	123
Ancho entrada, b	49,2
Altura salida, S	123
Diámetro salida, Ds	123
Altura parte cilíndrica, h	369
Altura parte cónica, z	615
Altura total del ciclón, H	984
Diámetro salida partículas, B	92,3

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Lay-out tentativo

Para dibujar el lay-out, es necesario conocer las dimensiones de todos los equipos. Desgraciadamente, no se pudo encontrar o calcular todas las dimensiones, por lo cual, se hace una estimación de los tamaños que faltan mediante lay-outs existentes, imágenes y fotos encontradas en internet. Ya que este trabajo es una ingeniería de perfil, este tipo de aproximación parece tolerable.

Siempre se sobrestima los tamaños de los equipos para ser más conservador en cuanto al espacio necesario. En la Tabla 4.6, se presentan las dimensiones utilizadas en el lay-out.

Tabla 4.6: Dimensiones de los equipos utilizadas en el Lay-out de trituración criogénica

Equipos	Largo [mm]	Ancho [mm]
Alimentador	2.000	2.000
Bomba	2.000	1.000
Estanque de nitrógeno líquido	3.000	3.000
Filtros	2.000	2.000
Máquina trituradora	3.000	2.000
Túnel de refrigeración	7.000	1.000

Fuente: Elaboración propia

Para la bodega, se sugiere poder contener un mes de materia prima en reserva y un mes de productos, pensando que es necesario reducir el número de ida y vuelta de los camiones de transporte. Se transforman 4 toneladas de granulados en 4 toneladas de polvo cada día, por lo cual son 84 toneladas de granulados y 84 toneladas de polvo que hay que almacenar. El caucho teniendo una densidad de 1.200 [$kg.m^{-3}$], se estima a 140 [m^3] el volumen total a almacenar. Considerando pilas de material de 2 metros de altura, se necesitan por lo menos 70 [m^2] en bodega.

Por fin, se presenta en la Tabla 4.7 una estimación del espacio necesario para la oficina, los baños, el comedor y un vestuario, sabiendo que la planta tiene un gerente y entre 3 y 5 operarios:

Tabla 4.7: Espacio requerido para la oficina, el vestuario, el comedor y los baños

Salas	Area [m²]
Oficina	6
Vestuario	8
Comedor	12
Baños	10
Total	**36**

Fuente: Elaboración propia

Con todos estos datos, se expone en la Figura 4.7 el lay-out de la planta de trituración criogénica:

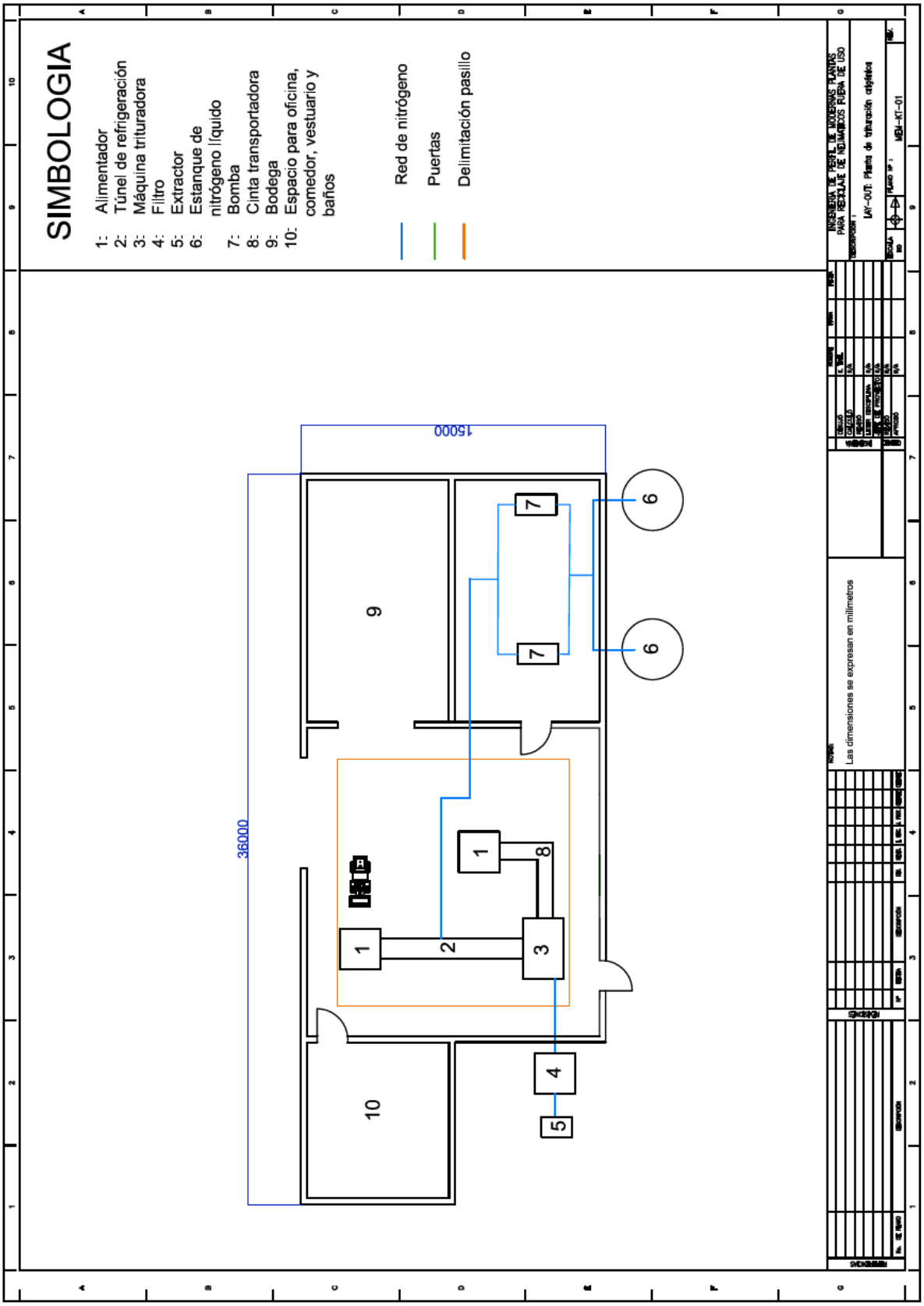


Figura 4.7: Lay-out de la planta de trituración criogénica

La operación de la planta procede como sigue:

- Un camión descarga los granulados en la entrada de la planta
- Un cargador frontal recolecta los granulados en el piso y los agrega en el alimentador.
- Los granulados son liberados en el túnel de refrigeración poco a poco.
- El tornillo sin fin empuja a los granulados mientras se enfrían con el contacto del nitrógeno líquido.
- Después de 16 minutos, los granulados alcanzan el final del túnel y caen dentro de la máquina trituradora.
- Bajo de ésa, un separador tipo tamiz filtra los granulados más gruesos. El polvo cae en una cinta transportadora que lleva al polvo hasta un alimentador bajo el cual está un sistema de almacenamiento tipo maxisaco. El saco se lleva a mano por el operador.

4.4 Pirolisis

En esta parte se presentan los procesos asociados a la pirolisis, algunos cálculos de dimensionamiento y un lay-out de la planta. Luego, se realiza un análisis económico de la solución.

4.4.1 Consideraciones

Se elige la tecnología de la empresa Pyrocrat por su baja temperatura de operación, su funcionamiento continuo y su alta producción de negro de humo.

Se cotizó una planta de capacidad diaria de 6 toneladas. Considerando los 253 días hábiles, se obtiene una cantidad de granulados a procesar en entrada de 1.518 toneladas anuales. Esta cantidad corresponde a un 25% de la producción anual de Polambiente. Es necesario precisar que la planta de pirolisis trabaja obligatoriamente con neumáticos triturados. El tamaño máximo de granulado es de 25 [mm]. Entonces, cualquier granulado de la planta de Polambiente puede ser utilizado.

En cuanto a los productos de la planta, se obtiene entre 40 y 45% de petróleo, entre 30 y 35% de negro de humo y entre 20 y 30% de gases. Para facilitar los cálculos, se considera el caso más favorable que consiste en una producción máxima de petróleo y de negro de humo. Ya que se procesan 1.518 toneladas anuales de granulados, se obtienen 683,1 toneladas de petróleo, 531,3 toneladas de negro de humo y 303,6 toneladas de gases anuales. Sabiendo que la planta trabaja de forma continua durante 24 horas, los flujos másicos asociados se presentan en la Tabla 4.8:

Tabla 4.8: Flujos másicos de los productos de la planta de pirolisis

Item	Flujo másico [$kg.h^{-1}$]
Caucho granulado	250
Petróleo	112,5
Negro de humo	87,5
Gases	50

Fuente: Elaboración propia

La planta está hecha para trabajar con tres turnos de 8 horas, y funciona casi de forma automatizada, por lo cual se requieren pocas personas en cada turno. Según los documentos de la cotización, en cada turno se necesitan un ingeniero y dos operadores para hacer funcionar de forma correcta la planta.

En cuanto a la normativa, la planta tiene que respetar el decreto supremo N160 según la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC). Este decreto impone lo siguiente:

- Se almacena el petróleo en estanques enterrados o fuera de los edificios
- El punto de carga de los camiones tiene que estar a más de 4 metros de distancia de los estanques y edificios

Los estanques de combustible permiten un almacenamiento de una semana de productos aproximadamente, por lo cual un camión tiene que pasar cada semana para llevar el petróleo.

4.4.2 Diagrama de flujo de procesos

La Figura 4.8 presenta el diagrama de flujo de procesos de la pirolisis:

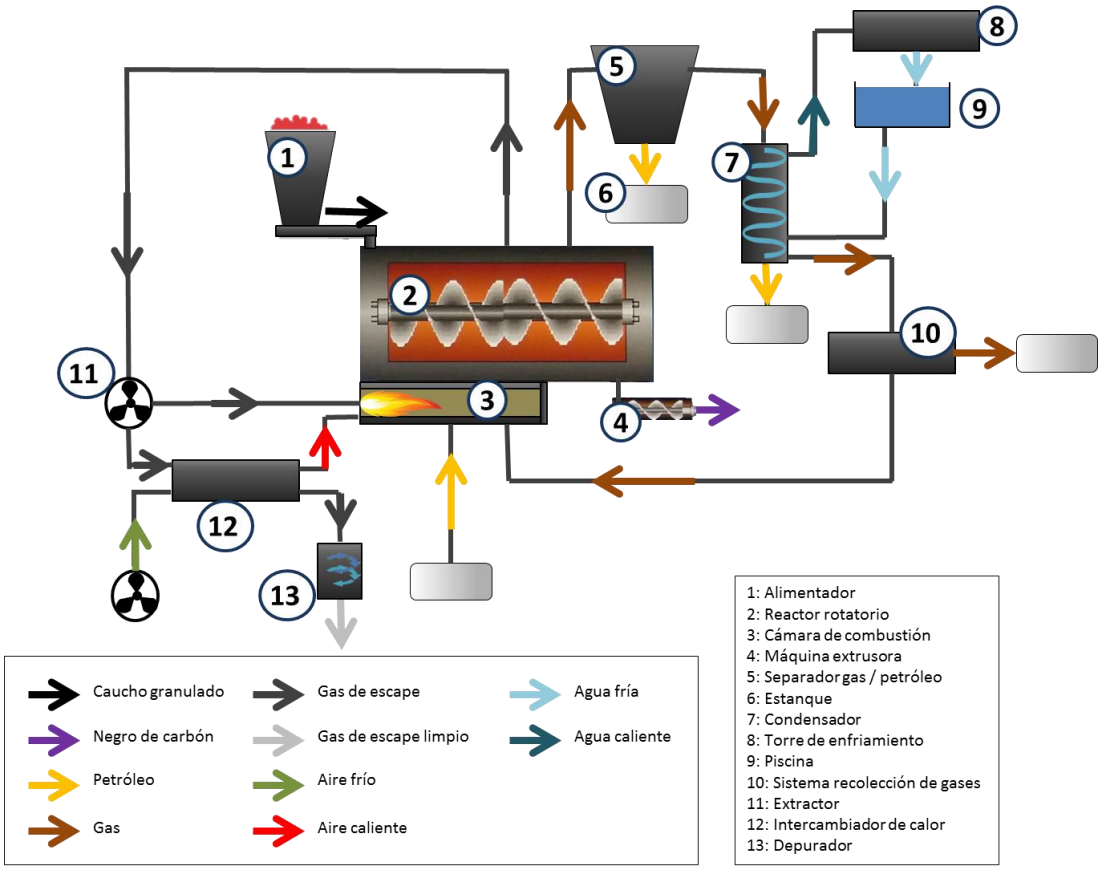


Figura 4.8: Diagrama de flujo de procesos de la planta de pirolisis[28]

Los granulados de caucho se ubican en un alimentador con cierre hermético, que permite una separación hermética entre el reactor de pirolisis y el exterior. De esta forma, se impide la entrada de oxígeno dentro del reactor. Es necesario impedir la entrada del oxígeno porque éste disminuye la calidad de los productos de pirolisis. Luego, los granulados son dirigidos hasta el reactor de tipo giratorio en lo cual se realiza la pirolisis. Los residuos sólidos son transportados por abajo con una máquina extrusora. Los gases se dirigen hasta un separador gas/petróleo que extrae el petróleo pesado, lo cual se almacena inmediatamente. Los gases siguen luego a una serie de tres condensadores. En esos, la parte condensable de los gases se condensa en petróleo liviano, y se estanca bajo los condensadores. Los gases que quedan se llevan a un sistema de recolección de gases que envía esos gases hasta la cámara de combustión o un estanque de gases.

[28] Esquema del autor realizado a partir de imágenes encontradas en los sitios de las empresas RESEM, KingTiger y Pyrocrat.

Los condensadores reciben agua fría de una piscina, y devuelven el agua caliente a una torre de enfriamiento ubicada en la misma piscina. Una vez enfriada, el agua se devuelve a la piscina, de tal modo que no se pierda agua.

La energía de los gases de escape se aprovecha de la siguiente manera. Una parte de los gases se inyectan directamente en la cámara de combustión para quemar los gases como el monóxido de carbono por ejemplo. La otra parte pasa por un intercambiador de calor que precalienta el aire que se va hacía la cámara de combustión. Al precalentar el aire se mejora la eficiencia de la combustión. Después del intercambiador, los gases de escape pasan por un depurador antes de ser devueltos al medio ambiente.

Es necesario tener un estanque de petróleo conectado a la cámara de combustión para iniciar el proceso de pirolisis. Luego, el proceso se autosostiene gracias a los gases producidos.

4.4.3 Lay-out tentativo

Desafortunadamente, los datos del tamaño de los equipos no se encontraron. Sólo se encontró el tamaño del reactor. Por lo tanto, a partir de imágenes y esquemas de varias empresas, se aproximan los tamaños de los diferentes equipos, comparándolos con el reactor. Se pueden encontrar dichas vistas de planta de pirolisis en el Anexo C. Se obtiene la Tabla 4.9:

Tabla 4.9: Dimensiones de los equipos utilizadas en el lay-out de la planta de pirolisis

Equipos	Largo [mm]	Ancho [mm]	Altura [mm]
Reactor rotatorio	6.000	3.000	3.000
Estanques	4.000	1.500	1.500
Condensadores	3.800	700	1.350
Piscina	4.300	4.300	1.350
Cámara de combustión	6.000	3.000	-
Torre de enfriamiento	4.300	2.000	2.600
Depurador	1.200	1.200	3.600
Intercambiador de calor	4.000	1.000	1.000
Separador gas/petróleo	800	800	1.800
Sistema de recolección de gases	800	800	1.800

Fuente: Elaboración propia

Es necesario mencionar que la cámara de combustión está bajo el reactor, por lo cual no se puede ver en el lay-out. Se presenta en la Figura 4.9 el lay-out de la planta de pirolisis:

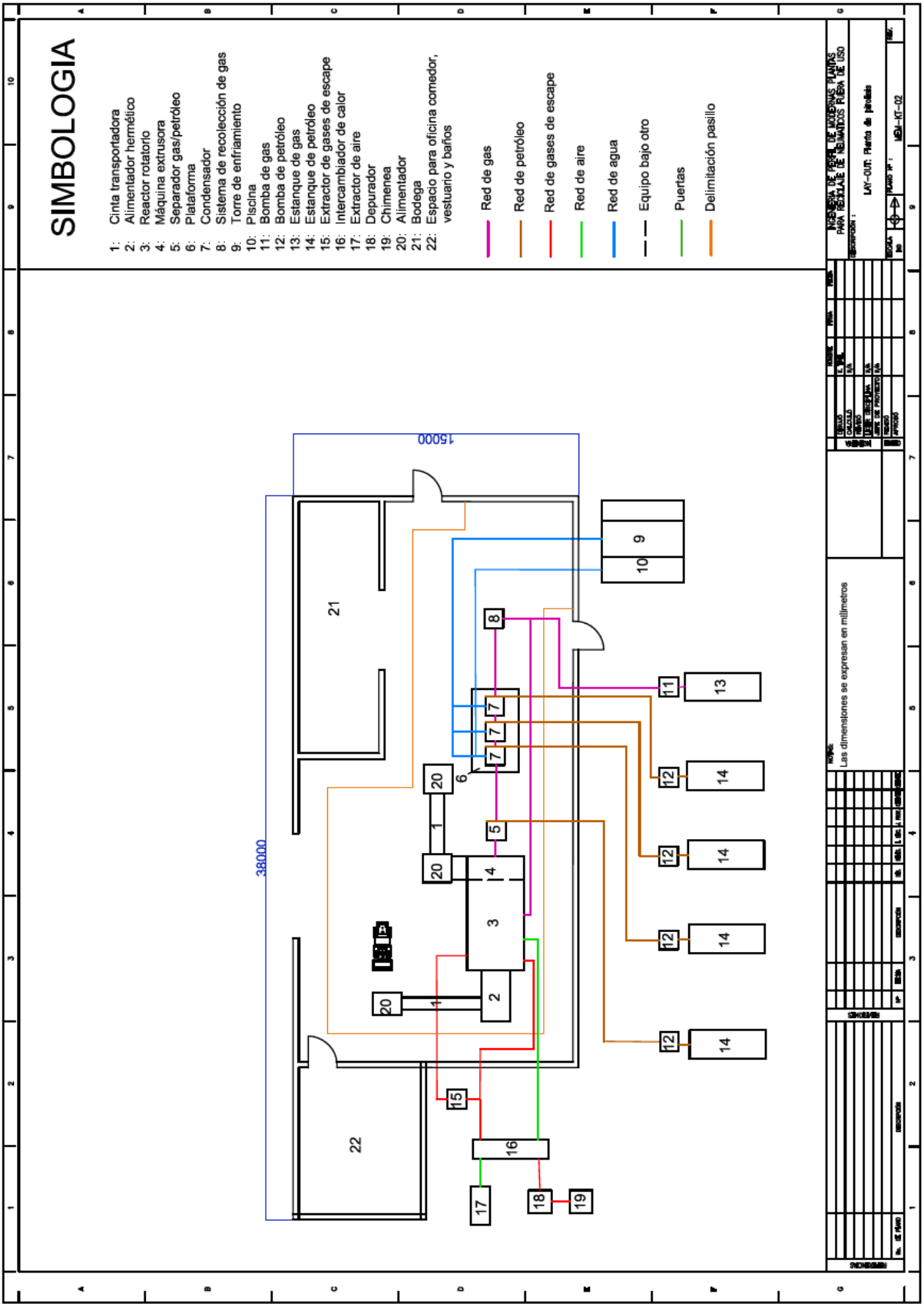


Figura 4.9: Lay-out de la planta de pirolisis

La operación de la planta procede de la siguiente forma:

- Un cargador frontal recolecta los granulados en el piso y les pone en el alimentador.
- Los granulados son transportados en la cinta transportadora hasta el alimentador hermético del reactor.
- El reactor se calienta gracias a la cámara de combustión que está por debajo.
- Después de una hora aproximadamente, se puede sacar el negro de humo gracias al tornillo sin fin 4. Mediante dos alimentadores y una cinta transportadora, el negro de humo se almacena en contenedores. Esos contenedores se llevan hacia la bodega con un transpaleta.
- Todo el proceso de tratamiento de gases de pirolisis y del petróleo se realiza de forma automática.

4.5 Análisis económico

Se elige hacer el análisis económico de la planta de pirolisis ya que se obtuvo una cotización más completa de parte de la empresa Pyrocrat. En esta parte, se presentan los costos de inversión, los costos fijos, los costos variables, los beneficios previstos, y finalmente, la estructura de costo consolidada. Se expone también la estrategia de inversión y el flujo de caja en un periodo de 15 años, periodo que corresponde a la vida útil de la planta indicada por el proveedor. Todos los precios se expresan en pesos chilenos.

4.5.1 Costos de inversión

La inversión toma en cuenta el precio de los equipos, el costo del transporte, el costo de instalación y los gastos de overhaul cada tres años de la planta entera. El costo de transporte se estima a un 20% del costo de los equipos, el costo de instalación se estima a un 30% del costo de los equipos, y el costo de overhaul se estima a un 20% del costo de los equipos. Se presentan en la Tabla 4.10 el resumen de los costos de inversión.

Tabla 4.10: Costos de inversión

COSTOS DE INVERSION	
Costo total equipos	$269 341 200
Costo transporte	$53 868 240
Costo instalación	$80 802 360
Costo del overhaul	$53 868 240

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Costos fijos

Los costos fijos se resumen a los salarios de todos los empleados y el arriendo del galpón en Lampa. En cuanto a los empleados, se siguen las indicaciones dadas en la cotización, es decir que se consideran un jefe de planta, tres ingenieros (1 por cada turno), 6 operadores (2 por cada turno) y un empleado para el aseo. Los sueldos que aparecen en la tabla provienen del estudio del Instituto Nacional de Estadísticas del año 2007. En cuanto al galpón, los precios promedios para un galpón de 570 m² con espacio adicional para los estanques y otros equipos están alrededor de 100 UF[29]. Los costos fijos se presentan en la Tabla 4.11:

Tabla 4.11: Costos fijos

COSTOS FIJOS				
CARGO	SALARIO, $	NUMERO	VALOR MENSUAL	VALOR ANUAL
JEFE DE PLANTA	$1.800.000	1	$1.800.000	$21.600.000
INGENIERO	$1.000.000	6	$6.000.000	$72.000.000
OPERADOR	$610.000	12	$7.320.000	$87.840.000
ASEO	$230.000	2	$460.000	$5.520.000
TOTAL PERSONAL:			**$15.580.000**	**$186.960.000**
ARRIENDO				
ARRIENDO			VALOR MENSUAL	VALOR ANUAL
Arriendo de un galpón de 570 m² en Lampa			**$2.634.000**	**$94.824.000**
TOTAL COSTOS FIJOS				
TOTAL MENSUAL			**TOTAL ANUAL**	
$18.214.000			**$281.784.000**	

Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Costos variables

Los costos variables agrupan los costos de materia prima, los costos de energía y los costos de mantenimiento. En este caso, la materia prima se subdivide en los granulados de caucho, el agua y los fungibles. En cuanto al mantenimiento, se recomienda hacer dos paradas de 10 días en el año, por lo cual hay 233 días de producción efectivos durante los cuales se consume materia prima y se produce petróleo, negro de humo y gases. Este factor tiene un impacto en los costos anuales. Además, se evalúa en un 5% del precio de las instalaciones el costo anual de mantenimiento. Los costos variables se presentan en la Tabla 4.12:

[29] http://www.todogalpon.cl/

Tabla 4.12: Costos variables

COSTOS VARIABLES						
ITEM	CANT. DIARIA	UNIDAD	PRECIO UNIT.	UNIDAD	DIARIO, $	ANUAL, $
Caucho granulado	6.000	kg	240	$/kg	$1.440.000	$335.520.000
Agua	0,4	m³	2.131	$/m³	$..853	$198.655
Fungibles	67	kg	717	$/kg	$.48.052	$11.196.209
Total materia prima	-	-	-	-	$1.488.905	$346.914.864
ENERGIA						
ITEM	CANT. DIARIA	UNIDAD	PRECIO UNIT.	UNIDAD	DIARIO, $	ANUAL, $
Electricidad	68	kW	66	$/kWh	$107.141	$24.963.806
MANTENIMIENTO						
ITEM	PORCENTAJE		PRECIO EQUIPOS	COSTO ANUAL		
Mantenimiento anual	5%		$269.341.200	$13.467.060		
TOTAL COSTOS VARIABLES ANUALES						
$385.345.731						

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la compra del caucho a Polambiente predomina el costo variable. Representa aproximadamente un 87% de los costos variables. Viene luego el costo de la energía y el mantenimiento.

4.5.4 Estructura de costos consolidada

La estructura de costos consolidada es una tabla que presenta los ítems siguientes: precio de venta, costo fijo, costo variable, costo de gestión, administración y venta, el costo total de producción y el margen realizado. El precio de venta de un kilogramo de producto en este caso se calcula de la manera siguiente:

$$Precio\ venta = \frac{\dot{m}_{petróleo} P_{petróleo} + \dot{m}_{negro\ humo} P_{negro\ humo}}{\dot{m}_{petróleo} + \dot{m}_{negro\ humo}} \quad (7)$$

Donde:

$\dot{m}_{petróleo}$: Flujo másico de petróleo producido [kg.h^{-1}]
$\dot{m}_{negro\ humo}$: Flujo másico de negro de humo producido [kg.h^{-1}]
$P_{petróleo}$: Precio de un kilogramo de petróleo en el mercado [$/kg]
$P_{negro\ humo}$: Precio de un kilogramo de negro de humo en el mercado [$/kg]

Es necesario calcular el precio de venta de esta forma porque no se genera la misma cantidad de petróleo y de negro de humo. Para el precio del petróleo se toma como referencia el precio

promedio del petróleo diésel en la región metropolitana, que vale $479[30] por un litro. Además, en el artículo [6] se encuentra una aproximación de la densidad de un petróleo de pirolisis obtenido con NFU de vehículos particulares. La densidad vale 950 $kg.m^{-3}$, por lo cual se deduce que el precio másico del petróleo es $504. Para el precio del negro de humo, se toma el valor de 0,8[31] dólares el kilogramo, lo cual corresponde a $522.

Por otra parte, el costo de gestión de administración y venta se suele tomar entre un 3% y un 12% del precio de venta. En este caso, se considera un 5%.

En la Tabla 4.13, se presenta la estructura de costos consolidada que permite comparar el precio de venta de los productos a los diferentes costos calculados previamente. De esta comparación, se destaca en particular el margen realizado. Además, se puede apreciar la influencia de cada costo en el costo total.

Tabla 4.13: Estructura de costos consolidada

ESTRUCTURA DE COSTOS CONSOLIDADA					
ITEM	kg	MENSUAL	ANUAL	% COSTO	% SOBRE PV
PRECIO DE VENTA	$512	$190.805.907	$2289.670.888		100%
COSTO FIJO	$63	$23.482.000	$281.784.000	15%	12%
COSTO VARIABLE	$345	$32.112.144	$385.345.731	69%	67%
G ADM +VENTA + COM	$26	$2.385.074	$28.620.886	5%	5%
COSTO TOTAL	$501	$46.731.218	$560.774.617	100%	98%
MARGEN BRUTO	$10	$970.259	$11.643.105		2%

Fuente: Elaboración propia

La primera columna presenta los diferentes ítems que toma en cuenta la estructura de costos consolidada, la segunda presenta el valor del ítem considerado por 1 kg de producto terminado, la tercera columna presenta el costo mensual, la cuarta el costo anual, la quinta la proporción de cada costo frente al costo total y la última la proporción de cada ítem frente al precio de venta. Así, en términos de porcentaje del costo total, el costo fijo representa un 25%, el costo variable un 69% y los costos de gestión de administración, venta y comunicación un 5%. Tener un costo variable es preferible porque significa que la mayor parte de los costos de la planta siguen la evolución de la producción.

Por otra parte, se evidencia que el costo total de producción corresponde a un 98% del precio de venta, o, en otras palabras, sólo se realiza un margen bruto de 2%, lo cual es bajo. Este resultado ya permite predecir que este proyecto no es viable. El flujo de caja lo va a confirmar.

[30] www.copec.cl
[31] www.alibaba.com

4.5.5 Estrategia de inversión

La inversión inicial vale $457.880.040. Se elige hacer un préstamo por un 33% de este monto, se busca otro 33% con inversionistas y el último 33% viene de fondos propios y del Estado. El préstamo se reembolsa en 5 años, con una tasa de interés anual de 10%. Estos parámetros dan una cuota mensual de $3.242.866 y anual de $38.914.391. Los detalles del cálculo del préstamo se encuentran en el Anexo D: Tabla de reembolso de préstamo.

4.5.6 Flujo de caja

Se presenta en la Tabla 4.14 un extracto del flujo de caja del proyecto de planta de pirolisis. El flujo completo está presentado en el Anexo E: Flujo de caja completo. Se evalúa la viabilidad del proyecto e un horizonte de 15 años.

Tabla 4.14: Extracto del flujo de caja

CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	1 118 400 kg/año															
% DE USO DE LA CAPACIDAD	*0*	*50*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*
ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
INGRESOS																
PRODUCCIÓN (kg/año)		559 200	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400
INGRESOS TOTALES (M$)		286	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572
EGRESOS (M$)																
Costo Fijo	0	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136
Costos Variables de Producción		193	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385	385
Gastos. de Adm., Ventas y Comercialización		14	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
EGRESOS TOTALES (M$)	0	400	607	607	607	607	568	568	568	568	568	568	568	568	568	568
RECUPERACION DE LA INVERSION	-515	-645	-661	-786	-802	-818	-904	-882	-861	-947	-925	-903	-989	-967	-945	-940
FLUJO NETO CAJA (M$)	-515	-130	-16	-70	-16	-16	-32	22	22	-32	22	22	-32	22	22	60
MARGEN	-	-45%	-3%	-12%	-3%	-3%	-6%	4%	4%	-6%	4%	4%	-6%	4%	4%	10%
RESULTADOS																
T.I.R.	**-14,1%**															
V.A.N. (12%)	**-698**															

Fuente: Elaboración propia

En el año 0, se realiza la inversión y se instala la planta, por lo cual no se produce nada. Luego, en el año 1, se considera solamente un 50% de capacidad de producción. A partir del año 2, todos los años tienen una producción máxima de 1.118.400 kilogramos de producto (a modo de recordatorio, el producto considerado es un conjunto {petróleo, negro de humo}). En los cinco primeros años, es necesario reembolsar el préstamo, por lo cual el margen durante este periodo siempre esta negativo: la planta genera deuda. Además, cabe recordar que cada tres años, una inversión masiva es necesaria para realizar un overhaul de la planta. Eso explica que en el año 6, todavía se tiene un margen negativo. Luego, un ciclo se instala, ciclo constituido por dos años seguidos con margen positivo y un año con margen negativo debido al overhaul.

Con esta descripción, es bastante obvio que los indicadores clásicos son malos. Se puede observar que después de quince años, todavía no se ha recuperado la inversión. Además, se obtiene un VAN de -698 millones de pesos en un periodo de 15 años, lo cual demuestra que este proyecto de planta no es viable económicamente.

5 Discusión

En esta sección, se propone discutir los resultados obtenidos.

5.1 Factibilidad económica de la implementación de una planta de pirolisis

5.1.1 Impacto de la elección de la materia prima

En esta memoria, se busca trabajar únicamente con los granulados entregados por Polambiente. De hecho, una de las motivaciones principales ha sido de entrar en sinergia con lo que ya existe en Chile. Tomando como referencia a la empresa Polambiente, que es la única planta de trituración del país, se quiso tratar de dinamizar sus ventas para ayudar a esta empresa a crecer. Los datos entregados por Alejandro Navech traducen una dificultad de encontrar demanda por los granulados de caucho. Se nota que la producción de la planta apenas se mantiene o disminuye. Este constato ha motivado la decisión de generar demanda comprando sus granulados.

Esta elección se justifica a priori la trituración criogénica y algunas tecnologías de como la de Pyrocrat requieren trabajar con una materia prima granulada y pura. Sin embargo, el VAN de -698 millones de pesos obtenido en la sección de análisis económico indica que trabajar con los granulados de Polambiente no es viable. Se puede buscar una condición para alcanzar un punto de equilibrio, es decir, un VAN nulo, haciendo variar el costo de la materia prima, es decir, los granulados de caucho de la planta de Polambiente. Se presenta en la Tabla 5.1 un análisis de sensibilidad respecto al precio de la materia prima. Básicamente, se disminuye el costo de los granulados de caucho hasta alcanzar un VAN nulo.

Tabla 5.1: Análisis de sensibilidad respecto al precio de la materia prima

Análisis de sensibilidad	Q, kg/año	PV, $/kg	CF, M$	CV, $/kg	TIR, %	VAN, M$
Caso Base	1.118.400	512	136	345	-14%	-698
Reducción costo granulados de 10%	1.118.400	512	136	315	-4%	-498
Reducción costo granulados de 20%	1.118.400	512	136	285	3%	-314
Reducción costo granulados de 30%	1.118.400	512	136	255	8%	-130
Reducción costo granulados de 37,1%	1.118.400	512	136	233	12%	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.1, se evidencia que para que el proyecto esté al equilibrio económico, es necesario que el precio de los granulados baje de un 37,1%. Obtener una reducción de precio tan alta es poco creíble por lo cual es necesario buscar otra palanca para que el proyecto sea viable económicamente.

El costo de la materia prima siendo el punto crítico que se destaca del análisis económico, es necesario encontrar un medio de bajar este costo, o de aumentar los ingresos para compensar el costo alto de los granulados. En general, cuando la materia prima es muy cara, se suele tratar de internar el proceso de producción de dicha materia prima para no tener que comprarla a un

proveedor externo. En este caso, la materia es el granulado de caucho. Entonces, la solución sería de incorporar una planta de trituración mecánica a temperatura ambiente para producir los granulados de caucho que consume el proceso de pirolisis. Por otra parte, se suele aumentar el tamaño de una planta para beneficiar de un efecto de escala y tener una cantidad mayor de producto para la venta. Pues, los dos ejes-de mejoramiento son por un lado invertir en una planta que produzca los granulados de caucho, y por otro lado, invertir en una planta con una capacidad de procesamiento más grande.

5.1.2 Implementación de una planta que produce los granulados de caucho

La hipótesis de trabajar con los granulados de caucho de Polambiente no parece relevante, debido al alto costo de estos. Una solución posible sería la de trabajar directamente con los NFU. De hecho, como se dijo en los antecedentes, Chile tiene muchos NFU que quedan botados. Dentro de las opciones factibles para trabajar con NFU, a continuación se presentan dos:

La primera es de quemar el NFU entero, y luego, separar los componentes. Esta solución tiene la ventaja de no necesitar tratamiento previo. Sin embargo, la calidad de los productos finales puede verse afectada.

La segunda consiste en tener una etapa previa de trituración mecánica y de separación del caucho, del acero y de la fibra. Luego, se realiza la pirolisis del caucho y se obtiene de esta forma productos de mayor calidad. El acero y la fibra se pueden tratar aparte. Al final, se puede vender los combustibles obtenidos de la pirolisis del caucho, el acero y la fibra.

5.1.3 Influencia de la capacidad de la planta de pirolisis

Una solución sería de invertir en una planta que pueda procesar más toneladas de granulados de caucho. Como se dijo en los antecedentes, la empresa Pyrocrat propone también plantas capaces de procesar 12 y 24 toneladas diarias de granulados. Para armar un análisis de sensibilidad de la factibilidad económica de la implementación de una planta de pirolisis en función de su capacidad, es necesario estimar la evolución de los gastos y costos en función de la capacidad de producción. Para el análisis económico presentado previamente, se cotizó la planta de 6 toneladas diarias. Pues, la etapa siguiente es lograr a vincular los gastos y costos de la planta de 6 toneladas a las plantas de 12 y 24 toneladas. Se presentan en la Tabla 5.2 los factores de escala entre las plantas de 6, 12 y 24 toneladas diarias.

Tabla 5.2: Factores de escala entre los tres tamaños de planta

	6 toneladas diarias	12 toneladas diarias	24 toneladas diarias
Capacidad	1	2	4
Espacio requerido	1	1,8	3
Potencia consumida	1	1,7	3,3
Mano de obra requerida	1	1,3	2
Inversión	1	1,7	3,1

Fuente: Elaboración propia

Los factores de la Tabla 5.2 cuantifican la capacidad, el espacio requerido, la potencia consumida, la mano de obra requerida para operar la planta y la inversión en equipos para cada tipo de planta, relacionado a la planta de 6 toneladas diarias. Por ejemplo, para instalar una planta de capacidad 12 toneladas diarias, la inversión necesaria es 1,7 veces superior a la inversión necesaria para instalar una planta de 6 toneladas diarias.

Esos factores son indicativos. Se calcularon mediante informaciones del catálogo de Pyrocrat. Los valores presentados a continuación en la Tabla 5.3 tienen un papel referencial. Solamente se quiere obtener una idea del impacto de la capacidad de producción de la planta de pirolisis sobre la factibilidad económica del proyecto.

Con los factores de la Tabla 5.2, se realiza de nuevo el flujo de caja para las plantas de 12 y 24 toneladas, y se determinan el valor de los indicadores TIR y VAN en ambos casos. Los resultados se presentan en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3: Análisis de sensibilidad respecto a la capacidad de producción de la planta

Análisis de sensibilidad	Q, kg/año	PV, $/kg	CF, M$	CV, $/kg	TIR, %	VAN, M$
Caso Base (6 toneladas diarias)	1.118.400	512	136	345	-14%	-698
12 toneladas diarias	2.236.800	512	186	332	4%	-494
24 toneladas diarias	4.473.600	512	282	325	11%	-91

Fuente: Elaboración propia

Al aumentar la capacidad de producción aumentan los costos fijos porque es necesario arrendar un galpón más grande y contratar a más operarios. Por otro lado, los costos variables, expresados en pesos por kilogramo, disminuyen poco porque dependen esencialmente del costo de la materia prima. Al fin y al cabo, se evidencia el ahorro asociado al efecto de escala: si se aumenta la capacidad productiva de la planta, el VAN va subiendo. Sin embargo, con la planta más grande de 24 toneladas diarias, el VAN sigue siendo negativo, con un valor de -91 millones de pesos. Entonces, para trabajar únicamente con la materia prima de Polambiente, sería necesario trabajar con una planta de mayor capacidad. A este nivel, parece más conveniente elegir un tipo de planta que pueda trabajar con el NFU de forma directa sin tratamiento previo.

5.2 El funcionamiento modular como solución

Ambas plantas de pirolisis y de trituración criogénica tienen dos puntos en común. Primero, trabajan únicamente con granulados de caucho en entrada, y segundo, tienen una capacidad relativamente baja comparado a lo que existe en el mundo. La inversión en este tipo de equipos empieza a ser más viable a mayor escala. Sin embargo, los tamaños relativamente pequeños de los equipos de ambas plantas se prestan bien a un funcionamiento modular. De hecho, en cuanto a la pirolisis, la patente [9] describe una planta de pirolisis que funciona con varios reactores, y en cuanto a la trituración criogénica, se puede instalar varios túneles refrigerante en paralelo. Por otra parte, ambas tecnologías entran en una buena sinergia con una planta de trituración mecánica a temperatura ambiente ya que ambas trabajan con neumáticos triturados. Como se mostró en los antecedentes, una planta de trituración mecánica a temperatura ambiente ya funciona de forma modular ya que consiste en la sucesión de varios procesos que se pueden instalar uno tras otro.

Entonces, ya que todos los procesos pueden trabajar de forma modular, se puede imaginar plantas modulares, que toman un NFU en entrada, y producen varios tipos de productos finales. Se presenta un ejemplo de planta en la Figura 5.1:

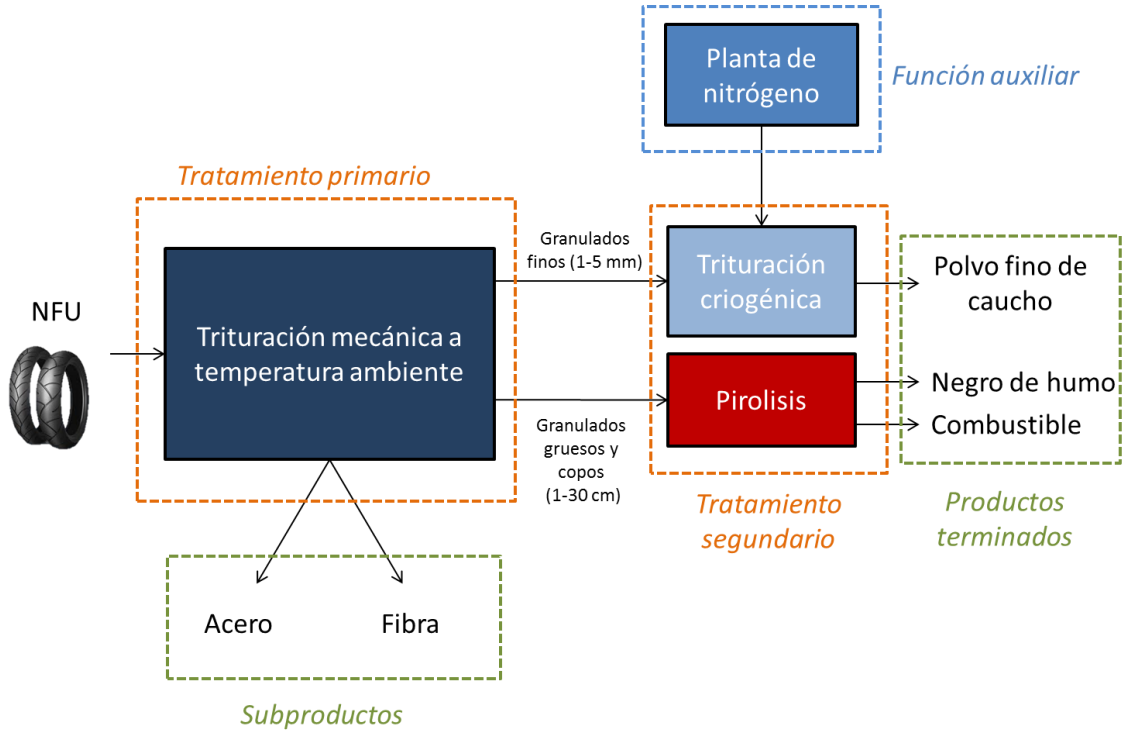


Figura 5.1: Ejemplo de planta modular de reciclaje de NFU

El NFU entra en la parte de trituración mecánica a temperatura ambiente. Se obtiene por una parte el acero y la fibra, y por otra parte, el caucho en varios tamaños. Los más finos (del orden del milímetro) se mandan a la trituración criogénica para obtener a la salida un polvo fino, que sirve a la producción de piezas de plástico. Por otra parte, los granulados más gruesos y copos

(del orden del centímetro o de la decena de centímetros) se llevan a la parte pirolisis para obtener negro de humo y combustible. Por otra parte, se puede instalar una planta de generación de nitrógeno líquido para abastecer el túnel de refrigeración de la parte de trituración criogénica. De esa forma, se tiene una planta completa y poco dependiente de recursos exteriores caros. Además, el tamaño de cada tipo de proceso (trituración mecánica a temperatura ambiente, trituración criogénica y pirolisis) se puede adaptar según la demanda del mercado. El estudio de la factibilidad de este tipo de planta parece relevante para un futuro proyecto.

6 Conclusión

Se realizó un estudio del estado del arte de las tecnologías comunes e innovadoras en cuanto al reciclaje de los NFU. Las más prometedoras e interesantes son la trituración criogénica y la pirolisis lenta. La primera porque el polvo obtenido se puede mezclar a otros termoplásticos para formar una materia prima explotable para la fabricación de nuevas piezas de plástico. Así, se disminuye el consumo de plástico nuevo. La segunda genera un combustible más limpio que los combustibles fósiles a partir de los NFU, y aparte, produce el negro de humo que tiene un papel importante en el desarrollo de las baterías de sodio. Por lo tanto, se desarrollaron ambas tecnologías.

En paralelo, se estableció la situación de Chile en cuanto al reciclaje de los NFU. Todavía no se encuentran muchas empresas involucradas en este ámbito. Sólo están Cemento Melón, que ocupa los NFU como combustible para los hornos de sus cementeras, y Polambiente, que tiene la única planta de trituración mecánica de Chile. Polambiente teniendo problema de demanda por sus granulados de caucho, se optó ocupar dichos granulados como materia prima de las dos plantas de estudio. Por eso, se decidió instalar las plantas en un terreno en Lampa, cerca de Polambiente, para reducir los costos de transporte y los problemas de logística.

Se dimensionó la planta criogénica para un flujo másico de entrada de 500 [$kg.h^{-1}$]. El consumo de nitrógeno líquido asociado es de 380 [$kg.h^{-1}$]. Los equipos necesarios al buen funcionamiento del proceso de trituración criogénica caben en un galpón de 540 [m^2] aproximadamente. Se obtiene en la salida 500 [$kg.h^{-1}$] de polvo fino de caucho.

Se obtuvo una cotización de una planta de pirolisis cuya materia prima debe ser granulados de caucho. La capacidad de la planta es de 6 toneladas diarias, con un funcionamiento de 24 horas por día, cinco días a la semana. Lo cual corresponde a un flujo másico de 250 [$kg.h^{-1}$] en entrada, y a la salida, se obtiene 112,5 [$kg.h^{-1}$] de petróleo, 87,5 [$kg.h^{-1}$] de negro de humo y 50 [$kg.h^{-1}$] de gas de pirolisis. La planta funciona de forma casi automática, sólo se necesitan un ingeniero y dos operadores en cada turno. Gracias a la cotización, se realizó el análisis de prefactibilidad económica de la dicha planta. Resultó que el proyecto no es viable: se obtuvo un VAN de -698 M$ para un periodo de estudio de 15 años, periodo que coincide que la vida útil de la planta. La principal causa es el precio muy alto de los granulados de caucho vendidos por Polambiente. Para tener un proyecto al equilibrio, se necesitaría un descuento de 37,1%.

Para obtener un proyecto viable, se estudian varias posibilidades. Primero, instalar una planta de trituración mecánica a temperatura ambiente para no tener que comprar los granulados de Polambiente, ya que se demostró que el costo de la materia prima es la causa principal que hace que el proyecto no sea viable. Otra solución es de implementar una planta que trabaja con cantidades grandes de NFU, para beneficiar del efecto de escala. Al fin y al cabo, la solución de planta modular parece muy atractiva. De hecho, las tecnologías de trituración mecánica y de pirolisis pueden adaptarse a un funcionamiento modular. La principal ventaja es poder ajustar la capacidad productiva a la demanda del mercado, y en este caso, proponer una diversidad de

productos terminados: combustible, negro de humo o polvo fino de caucho. Cada producto teniendo su propia aplicación.

Bibliografía

[1] E. Serrano, L. García, and M. Fraile, "Valorización Material Y Energética De Neumáticos Fuera De Uso," CIMTAN, Informe de vigilancia tecnológica, Madrid, 2007.

[2] C y V Medioambiente LTDA, "Diagnóstico Fabricación, Importación y Distribución de Neumáticos y Manejo de Neumáticos Fuera de Uso," Report, Santiago, 2008.

[3] A. Pehlken and E. Essadiqi, "Scrap Tire Recycling in Canada," CANMET-MTL, Report, Canada, 2005.

[4] P. Miguel and L. Morocho, "Estudio de la aplicación potencial de cómpuestos obtenidos con residuos de caucho reciclado provenientes de continental Tire Andina como materiales estructurales," Universidad Politécnica Salesiana, 2013.

[5] S. Brunet, J. C. de la Llera, and E. Kausel, "Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 85, pp. 134–145, 2016.

[6] J. D. Martínez, N. Puy, R. Murillo, T. García, M. V. Navarro, and A. M. Mastral, "Waste tyre pyrolysis - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 179–213, 2013.

[7] Y. Li *et al.*, "Tire-derived carbon composite anodes for sodium-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 316, pp. 232–238, 2016.

[8] P. T. Williams, "Pyrolysis of waste tyres: A review," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 8, pp. 1714–1728, 2013.

[9] C. S, Lengsfeld, R. A, and Shoureshi, "Batch Pyrolysis system," US 2006/0163053, 2006.

[10] C. Peace *et al.*, "Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis , Gasification , and Liquefaction," *Integr. Waste Manag. Board*, no. March, pp. 1–97, 2006.

[11] M. W. BIDDULPH, "Cryogenic Embrittlement of Rubber," in *Conservation & Recycling, Vol.1*, Pergamon P., Great Britain, 1977, pp. 169–178.

[12] C. A. Londoño Echeverri, "Diseño Óptimo De Ciclones," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 5, no. 9, pp. 123–139, 2006.

Anexo A: Algunas empresas que utilizan la pirolisis o la gasificación en el mundo

Company	Technology	Status of Technology	State/Region	Country
ACM Polyflow	Pyrolysis	Pilot plant	Ohio	USA
Alycon Engineering S.A.	Pyrolysis	Reference plant operating		Switzerland
Ande Scientific	Pyrolysis – bench scale	Not actively promoted	West Midlands	UK
Beven Recycling	Pyrolysis	Demonstration plant – no longer used	Whitney	UK
BPI	Pyrolysis – demo	Not active		UK
Conrad Industries Inc.	Pyrolysis	Pilot plant	Washington	U.S.
Environmental Waste International	Microwave Pyrolysis	Pre-commercial	Ontario	Canada
Hebco International	Pyrolysis	Design - Not actively promoted	Quebec	Canada
Theroux Environmental Consulting Services	Plasma arc gasification	Pre-commercial	California	U.S.
Traidec	Pyrolysis	Pilot scale—status unknown		France
Weidleplan (LIG)	Pyrolysis	Status unknown		Germany

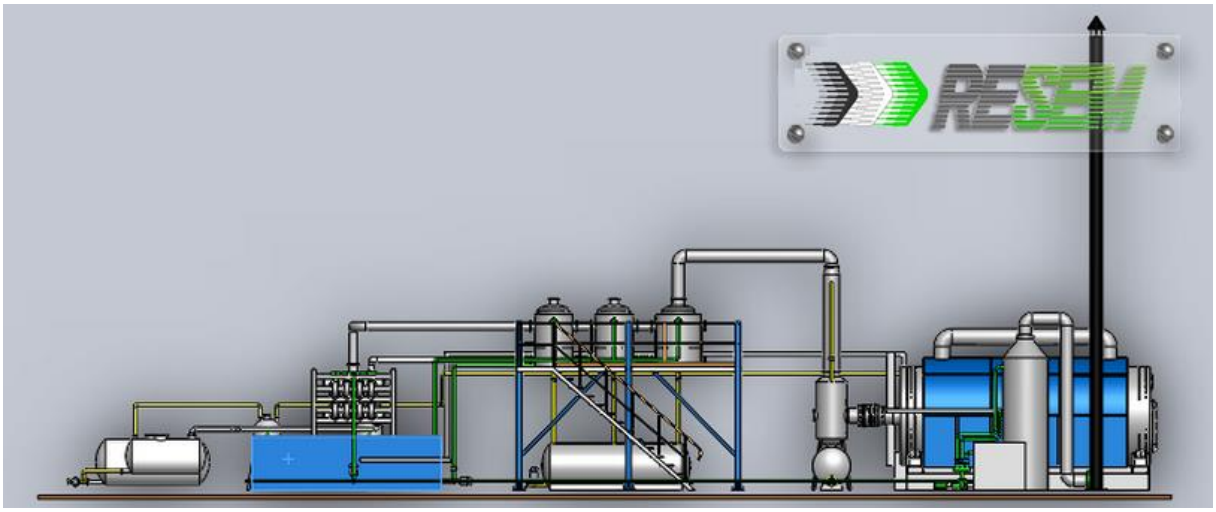
Company That Developed Technology	Technology	Status of Plant or Technology	State	Country
Solena Group Inc.	Plasma torch	Semi-commercial	Wash. DC	U.S.
SVZ	Gasification	Commercial		Germany
Thermoenergy			WA	U.S.
Thermogenics, Inc.	Gasification		NM	U.S.
Thide Environmenal	Pyrolysis	Semi-commercial		France
Von Roll	Pyrolysis	Semi-commercial		Germany
WasteGen/Technip		Commercial		UK

Company That Developed Technology	Technology	Status of Plant or Technology	State	Country
Adherent Technologies, Inc	Pyrolysis			U.S.
Bioengineering Resources, Inc (BRI)	Gasification/Fermentation	Pilot-pre commercial	AR	U.S.
Compact Power	Pyrolysis + Gasification	Semi-commercial		UK
Ebara/Alstrom	Gasification	Commercial		Japan, France
Emery Energy Company, LLC	Gasification	Pre-commercial		U.S.
Enerkem	Gasification	Semi-commercial		Canada
Foster Wheeler	Gasification	Semi-commercial		Finland
Graveson Energy Management (GEM)	Thermal cracking	Pre-commercial	NJ	U.S.
IET Energy Ltd.	Gasification & Combustion		WA	UK / U.S.
Improved Converters (ICI)		Prototype	CA	U.S.
International Environmental Solutions	Pyrolysis	Semi-commercial	CA	U.S.
Interstate Waste Technologies, Inc/Thermoselect	Gasification	Commercial	PA	U.S.
Mitsui-Babcock/Takuma	Pyrolysis	Commercial		Japan, UK
North American Power	Pyrolysis	Semi-commercial	NV	U.S.
Nippon Steel	Gasification	Commercial		Japan
Phoenix Solutions	Plasma		MN	U.S.
PKA	Pyrolysis + Gasification	Semi-commercial		Germany
Pyromex – ILS	Pyrolysis	Commercial		U.S.,Germany
Renewable Oil International, Inc.	Pyrolysis	Commercial	Ontario	Canada
Serpac Environmental	Pyrolysis	Semi-commercial		France

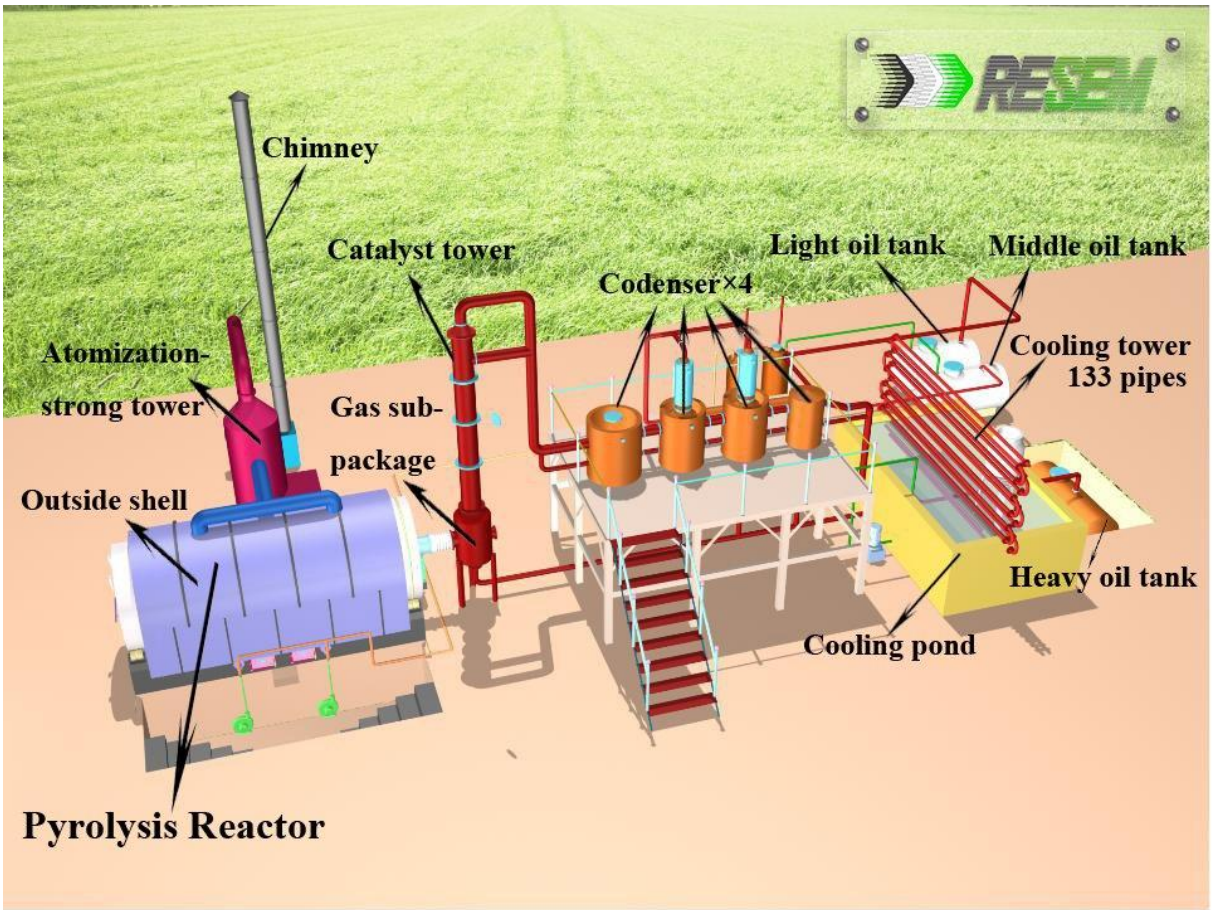
Anexo B: Extracto del catálogo de AirProducts

Tipo	Diámetro tornillo sin fin (interno) [mm]	Diámetro túnel [mm]	Largo exterior [mm]	Largo interior [mm]
E-100	100	219	4.000	3.000
E-150	150	256	4.000	3.000
E-300	300	406	4.000	3.000
E-300XL	300	406	7.000	6.000

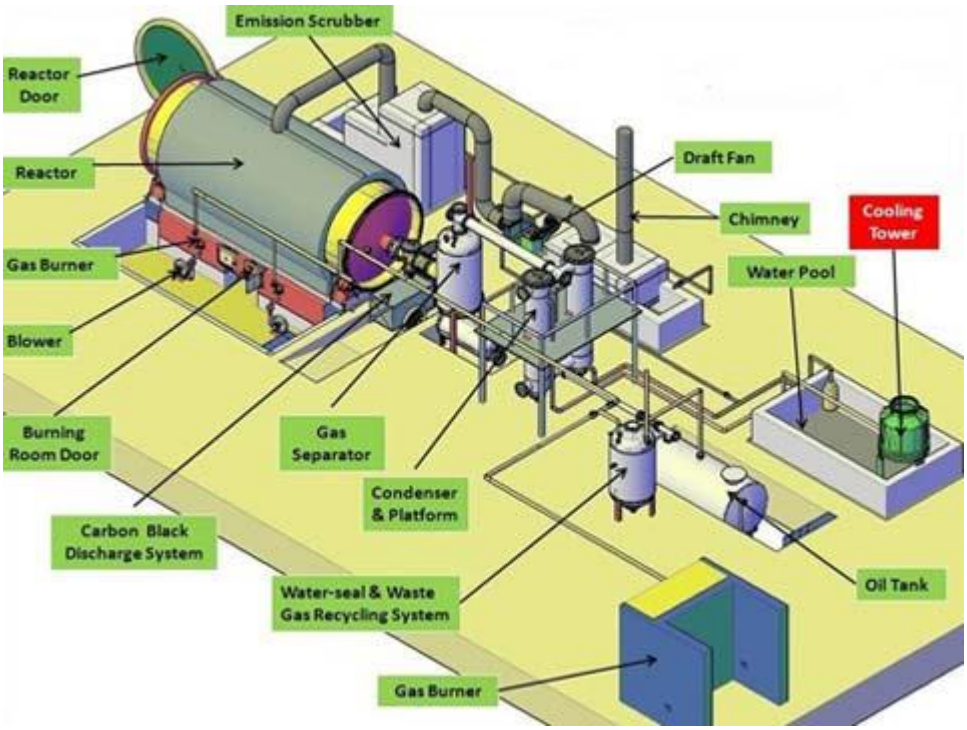
Anexo C: Imágenes / Lay-out / Esquemas de plantas de pirolisis



Fuente: RESEM



Fuente: RESEM



Fuente: KingTiger group

Anexo D: Tabla de reembolso de préstamo

Deuda	Cuota	Interés	Amortización	Periodo	
$152.626.680	$3.242.866	$1.271.889	$1.970.977	Mes 1	Año 1
$148.668.301	$3.242.866	$1.238.903	$2.003.963	Mes 3	
$146.664.338	$3.242.866	$1.222.203	$2.020.663	Mes 4	
$144.643.675	$3.242.866	$1.205.364	$2.037.502	Mes 5	
$142.606.173	$3.242.866	$1.188.385	$2.054.481	Mes 6	
$140.551.692	$3.242.866	$1.171.264	$2.071.602	Mes 7	
$138.480.090	$3.242.866	$1.154.001	$2.088.865	Mes 8	
$136.391.225	$3.242.866	$1.136.594	$2.106.272	Mes 9	
$134.284.952	$3.242.866	$1.119.041	$2.123.825	Mes 10	
$132.161.128	$3.242.866	$1.101.343	$2.141.523	Mes 11	
$130.019.605	$3.242.866	$1.083.497	$2.159.369	Mes 12	

Deuda	Cuota	Interés	Amortización	Periodo	
$127.860.235	$3.242.866	$1.065.502	$2.177.364	Mes 13	Año 2
$125.682.872	$3.242.866	$1.047.357	$2.195.509	Mes 14	
$123.487.363	$3.242.866	$1.029.061	$2.213.805	Mes 15	
$121.273.558	$3.242.866	$1.010.613	$2.232.253	Mes 16	
$119.041.306	$3.242.866	$992.011	$2.250.855	Mes 17	
$116.790.450	$3.242.866	$973.254	$2.269.612	Mes 18	
$114.520.838	$3.242.866	$954.340	$2.288.526	Mes 19	
$112.232.313	$3.242.866	$935.269	$2.307.597	Mes 20	
$109.924.716	$3.242.866	$916.039	$2.326.827	Mes 21	
$107.597.890	$3.242.866	$896.649	$2.346.217	Mes 22	
$105.251.673	$3.242.866	$877.097	$2.365.769	Mes 23	
$102.885.904	$3.242.866	$857.383	$2.385.483	Mes 24	

Deuda	Cuota	Interés	Amortización	Periodo	
$100.500.421	$3.242.866	$837.504	$2.405.362	Mes 25	Año 3
$98.095.058	$3.242.866	$817.459	$2.425.407	Mes 26	
$95.669.651	$3.242.866	$797.247	$2.445.619	Mes 27	
$93.224.033	$3.242.866	$776.867	$2.465.999	Mes 28	
$90.758.034	$3.242.866	$756.317	$2.486.549	Mes 29	
$88.271.485	$3.242.866	$735.596	$2.507.270	Mes 30	
$85.764.214	$3.242.866	$714.702	$2.528.164	Mes 31	
$83.236.050	$3.242.866	$693.634	$2.549.232	Mes 32	
$80.686.818	$3.242.866	$672.390	$2.570.476	Mes 33	
$78.116.342	$3.242.866	$650.970	$2.591.896	Mes 34	
$75.524.446	$3.242.866	$629.370	$2.613.496	Mes 35	
$72.910.951	$3.242.866	$607.591	$2.635.275	Mes 36	

Deuda	Cuota	Interés	Amortización	Periodo	
$70.275.676	$3.242.866	$585.631	$2.657.235	Mes 37	Año 4
$67.618.441	$3.242.866	$563.487	$2.679.379	Mes 38	
$64.939.062	$3.242.866	$541.159	$2.701.707	Mes 39	
$62.237.355	$3.242.866	$518.645	$2.724.221	Mes 40	
$59.513.134	$3.242.866	$495.943	$2.746.923	Mes 41	
$56.766.210	$3.242.866	$473.052	$2.769.814	Mes 42	
$53.996.396	$3.242.866	$449.970	$2.792.896	Mes 43	
$51.203.500	$3.242.866	$426.696	$2.816.170	Mes 44	
$48.387.330	$3.242.866	$403.228	$2.839.638	Mes 45	
$45.547.692	$3.242.866	$379.564	$2.863.302	Mes 46	
$42.684.390	$3.242.866	$355.703	$2.887.163	Mes 47	
$39.797.228	$3.242.866	$331.644	$2.911.222	Mes 48	

Deuda	Cuota	Interés	Amortización	Periodo	
$36.886.005	$3.242.866	$307.383	$2.935.483	Mes 49	Año 5
$33.950.523	$3.242.866	$282.921	$2.959.945	Mes 50	
$30.990.578	$3.242.866	$258.255	$2.984.611	Mes 51	
$28.005.967	$3.242.866	$233.383	$3.009.483	Mes 52	
$24.996.484	$3.242.866	$208.304	$3.034.562	Mes 53	
$21.961.922	$3.242.866	$183.016	$3.059.850	Mes 54	
$18.902.072	$3.242.866	$157.517	$3.085.349	Mes 55	
$15.816.724	$3.242.866	$131.806	$3.111.060	Mes 56	
$12.705.664	$3.242.866	$105.881	$3.136.985	Mes 57	
$9.568.679	$3.242.866	$79.739	$3.163.127	Mes 58	
$6.405.552	$3.242.866	$53.380	$3.189.486	Mes 59	
$3.216.065	$3.242.866	$26.801	$3.216.065	Mes 60	

Anexo E: Flujo de caja completo

CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	1 118 400 kg/año					
% DE USO DE LA CAPACIDAD	*0*	*50*	*100*	*100*	*100*	*100*

ITEM / AÑOS	0	1	2	3	4	5
INGRESOS						
PRODUCCIÓN (kg/año)	0	559 200	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400
PRECIO PROMEDIO ($/kg)	0,00	511,82	511,82	511,82	511,82	511,82
VENTA DE PRODUCTOS Std (M$)	0	286	572	572	572	572
INGRESOS TOTALES (M$)	**0**	**286**	**572**	**572**	**572**	**572**
EGRESOS (M$)						
Costo Fijo	0	136	136	136	136	136
Costos Variables de Producción	0	193	385	385	385	385
Gastos. de Adm., Ventas y Comercialización	0	14	29	29	29	29
Amortización	0	39	39	39	39	39
Depreciación	0	18	18	18	18	18
EGRESOS TOTALES (M$)	**0**	**400**	**607**	**607**	**607**	**607**
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO	0	-114	-34	-34	-34	-34
Impuesto a las Utilidades (17%)	0	0	0	0	0	0
Utilidad Después de Impuesto	0	-114	-34	-34	-34	-34
Más Depreciación	0	18	18	18	18	18
INVERSIONES PARA:						
- Maquina + overhaul 20% VNR c/3 años	**-458**			**-54**		
- Capital de Trabajo para la Prod.	**-57**	**-34**				
RECUPERACION DE LA INVERSION	**-515**	**-645**	**-661**	**-786**	**-802**	**-818**
FLUJO NETO CAJA (M$)	**-515**	**-130**	**-16**	**-70**	**-16**	**-16**
RESULTADOS						
T.I.R.	**-14,1%**					
V.A.N. (12%)	**-698**					

	Margen	Margen	Margen	Margen	Margen
	-45%	-3%	-12%	-3%	-3%

% DE USO DE LA CAPACIDAD	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*

ITEM / AÑOS	6	7	8	9	10	11
INGRESOS						
PRODUCCIÓN (kg/año)	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400
PRECIO PROMEDIO ($/kg)	511,82	511,82	511,82	511,82	511,82	511,82
VENTA DE PRODUCTOS Std (M$)	572	572	572	572	572	572
INGRESOS TOTALES (M$)	**572**	**572**	**572**	**572**	**572**	**572**
EGRESOS (M$)						
Costo Fijo	136	136	136	136	136	136
Costos Variables de Producción	385	385	385	385	385	385
Gastos. de Adm., Ventas y Comercialización	29	29	29	29	29	29
Amortización						
Depreciación	18	18	18	18	18	18
EGRESOS TOTALES (M$)	**568**	**568**	**568**	**568**	**568**	**568**
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO	5	5	5	5	5	5
Impuesto a las Utilidades (17%)	1	1	1	1	1	1
Utilidad Después de Impuesto	4	4	4	4	4	4
Más Depreciación	18	18	18	18	18	18
INVERSIONES PARA:						
- Maquina + overhaul 20% VNR c/3 años	**-54**			**-54**		
- Capital de Trabajo para la Prod.						
RECUPERACION DE LA INVERSION	**-904**	**-882**	**-861**	**-947**	**-925**	**-903**
FLUJO NETO CAJA (M$)	**-32**	**22**	**22**	**-32**	**22**	**22**

Margen	Margen	Margen	Margen	Margen	Margen
-6%	4%	4%	-6%	4%	4%

% DE USO DE LA CAPACIDAD	*100*	*100*	*100*	*100*

ITEM / AÑOS	12	13	14	15
INGRESOS				
PRODUCCIÓN (kg/año)	1 118 400	1 118 400	1 118 400	1 118 400
PRECIO PROMEDIO ($/kg)	511,82	511,82	511,82	511,82
VENTA DE PRODUCTOS Std (M$)	572	572	572	572
INGRESOS TOTALES (M$)	**572**	**572**	**572**	**572**
EGRESOS (M$)				
Costo Fijo	136	136	136	136
Costos Variables de Producción	385	385	385	385
Gastos. de Adm., Ventas y Comercialización	29	29	29	29
Amortización				
Depreciación	18	18	18	18
EGRESOS TOTALES (M$)	**568**	**568**	**568**	**568**
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO	5	5	5	5
Impuesto a las Utilidades (17%)	1	1	1	1
Utilidad Después de Impuesto	4	4	4	4
Más Depreciación	18	18	18	18
INVERSIONES PARA:				
- Maquina + overhaul 20% VNR c/3 años	**-54**			**-54**
- Capital de Trabajo para la Prod.				**92**
RECUPERACION DE LA INVERSION	**-989**	**-967**	**-945**	**-940**
FLUJO NETO CAJA (M$)	**-32**	**22**	**22**	**60**

Margen	Margen	Margen	Margen
-6%	4%	4%	10%