



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Medioambiente  
Ingeniería Ambiental**

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DE  
NEUMÁTICOS MINEROS FUERA DE USO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: PAULINA URREA CARES  
PROFESOR GUÍA: HÉCTOR ANDRADE CAROCA**

**VALPARAÍSO, CHILE  
MARZO, 2019**

## RESUMEN

Actualmente Chile posee un bajo porcentaje de valorización hacia las más de 120.000 toneladas de neumáticos usados que se generan al año. Una actividad económica importante en el territorio nacional que contribuye en la generación de estos residuos es la minería. De forma general, este rubro acopia sus neumáticos mineros fuera de uso (NMFU) en terrenos construidos especialmente con ese propósito, lo que trae consecuencias ambientales, como lo son la atracción de vectores, el riesgo de incendio y la pérdida de calidad de los suelos, entre otras externalidades. El neumático es una atractiva fuente de energía por tener un poder calorífico aproximado de 33 MJ/kg y, considerando que el sector minero es un gran consumidor de energía eléctrica, es que este trabajo tiene como objetivo presentar los detalles técnicos ambientales junto con la evaluación económica del diseño de una planta de valorización energética de neumáticos mineros fuera de uso.

En una primera etapa, se estimaron la cantidad de neumáticos mineros que se generarán en los principales yacimientos del país con el fin de determinar la comuna con la mayor generación de este residuo, y por ende, ser el lugar donde operará la planta. La etapa de diseño consistió en identificar los equipos involucrados en el proceso de gasificación y calcular la generación de energía que se espera obtener, así como también, establecer las dimensiones y las consideraciones para el almacenamiento de los residuos provenientes del proceso para evitar riesgos a la salud de la población y efectos adversos al ambiente. Posteriormente se realizó una evaluación económica del diseño con un horizonte de 20 años para tres escenarios, optimista, realista y pesimista, de los cuales se obtuvieron indicadores económicos favorables, destacándose el escenario optimista por sobre el resto con un VAN de 23.062 UF, un TIR de 26,12% y un *payback* de 5,01 años.

---

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. Antecedentes generales sobre los residuos sólidos no peligrosos.....	4
2.2. Manejo y generación de residuos en Chile.....	6
2.3. Normativa nacional .....	9
2.4. Los neumáticos como residuo .....	17
3. PROBLEMÁTICA.....	36
4. OBJETIVOS.....	37
4.1. Objetivo general.....	37
4.2. Objetivos específicos.....	37
5. METODOLOGÍA .....	38
5.1. Estimación de la generación de neumáticos mineros fuera de uso en Chile. ....	38
5.2. Selección de una ubicación factible de aceptar la operación de una planta de valorización de neumáticos.....	40
5.3. Cálculo a nivel conceptual de una planta de valorización energética de neumáticos mineros.....	43
5.4. Factibilidad económica del diseño de la planta. ....	44
6. RESULTADOS .....	45
6.1. Estimación de la generación de neumáticos mineros fuera de uso en Chile. ....	45
6.2. Selección de la ubicación para el diseño de la planta.....	56
6.3. Cálculo a nivel conceptual de una planta de valorización energética de neumáticos mineros fuera de uso .....	67
6.4. Determinar la factibilidad económica del diseño de la planta. ....	97
7. DISCUSIÓN .....	111
8. CONCLUSIONES.....	115
9. BIBLIOGRAFÍA.....	116
10. ANEXOS .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Composición (% en peso) de neumáticos de automóviles y camiones. ....	18
Tabla 2.2: Alternativas de tratamiento para los Neumáticos Fuera de Uso. ....	20
Tabla 2.3: Generación, en toneladas, de neumáticos usados para los años 2011-2017. ....	21
Tabla 2.4: Valorización de NFU generados en el periodo 2011-2017. ....	23
Tabla 2.5: Estimación realizada por Gescam en ton/año en base a cobre y hierro. ....	28
Tabla 2.6: Requerimientos y productos para los tratamientos térmicos. ....	34
Tabla 5.1: Estructura de tabla a confeccionar para TMF 2017. ....	38
Tabla 5.2: Estructura de tabla para estimación de NMFU. ....	39
Tabla 5.3: Modelo para la confección de valorización de las alternativas. ....	41
Tabla 5.4: Matriz para otorgar valores a las alternativas seleccionadas. ....	42
Tabla 6.1: Producción en toneladas métricas finas para el año 2017 por región. ....	45
Tabla 6.2: Toneladas de material fino por yacimiento para el año 2017. ....	46
Tabla 6.3: Cálculo del factor de generación de neumáticos mineros usados. ....	50
Tabla 6.4: Dimensiones y pesos de algunos neumáticos tipo OTR. ....	50
Tabla 6.5: Valores del PIB considerados para la proyección. ....	51
Tabla 6.6: Estimación y proyección de neumáticos mineros fuera de uso. ....	51
Tabla 6.7: Estimación sectorial de neumáticos mineros para el año 2020. ....	54
Tabla 6.8: Perfiles de uso por zona en el Plan Regulador Comunal de Antofagasta. ....	57
Tabla 6.9: Zonas y perfiles de uso para el Barrio Industrial La Negra. ....	59
Tabla 6.10: Hectáreas por usos del suelo en la comuna de Antofagasta. ....	63
Tabla 6.11: Evaluación de las alternativas de ubicación de la planta. ....	66
Tabla 6.12: Porcentajes utilizados para el balance de masa de la planta. ....	75
Tabla 6.13: Cantidad de moles involucrados en la gasificación por compuesto. ....	88
Tabla 6.14: Entalpía de formación para gases involucrados en las reacciones. ....	88
Tabla 6.15: Energía otorgada por cada reacción involucrada. ....	89
Tabla 6.16: Moles de gases de salida. ....	89
Tabla 6.17: Energía estimada que entrega la corriente gaseosa del gasificador. ....	90

Tabla 6.18: Valores de los coeficientes de capacidad calorífica para cada compuesto.....	91
Tabla 6.19: Energía otorgada por los gases de combustión.....	91
Tabla 6.20: Coeficientes de capacidad calorífica para el compuesto agua.....	92
Tabla 6.21: Coeficientes de capacidad calorífica para el compuesto aire. ....	96
Tabla 6.22: Tasa de interés bancaria considerada para cada escenario.....	97
Tabla 6.23: Inversión en maquinaria. ....	97
Tabla 6.24: Costo de inversión en instalaciones. ....	98
Tabla 6.25: Costos fijos operacionales considerados para la operación de la planta.....	99
Tabla 6.26: Costo variable anual por los neumáticos que ingresarán a la planta.....	100
Tabla 6.27: Ingresos por la gasificación de neumáticos. ....	101
Tabla 6.28: Indicadores económicos para los tres escenarios. ....	102
Tabla 6.29: Flujo de caja para escenario optimista, valores en UF. ....	103
Tabla 6.30: Flujo de caja para el escenario realista, valores en UF.....	105
Tabla 6.31: Flujo de caja para el escenario pesimista, valores en UF. ....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Generación de residuos por actividades económicas en los países de la Unión Europea durante el año 2014.....	5
Figura 2.2: Pirámide invertida para la jerarquización de residuos.....	5
Figura 2.3: Generación de residuos sólidos municipales per cápita. ....	6
Figura 2.4: Generación de residuos en porcentaje para los años 2014 y 2015. ....	7
Figura 2.5: Estructura general de un neumático.....	18
Figura 2.6: Minera Zaldivar, 2018.....	25
Figura 2.7: Codelco División Radomiro Tomic, 2018.....	26
Figura 2.8: Esquema simplificado del proceso de pirólisis.....	31
Figura 2.9: Proceso de Gasificación.....	33
Figura 2.10: Balance de masa típico de los procesos pirólisis y gasificación. ....	35
Figura 6.1: Mapa de la proyección de las toneladas de NMFU por comuna para el año 2020.....	55
Figura 6.2: Zonificación del Plan Regulador Comunal de Antofagasta. ....	56
Figura 6.3: Zonificación cercana a la alternativa A.....	58
Figura 6.4: Demarcación de las zonas del barrio industrial La Negra. ....	60
Figura 6.5: Zonificación según el PRDU en el sector de la alternativa C. ....	62
Figura 6.6: Zonificación según el PRDU alrededor del sector de la alternativa D.....	63
Figura 6.7: Zonificación del Uso del Suelo para el territorio que comprende las cuatro alternativas a evaluar. ....	65
Figura 6.8: Diagrama de bloque del proceso a realizar en la planta.....	67
Figura 6.9: Distribución de los procesos en la planta.....	68
Figura 6.10: Dimensiones y distribución para el almacenamiento de NMFU.....	70
Figura 6.11: Diagrama de bloque del proceso previo al gasificador. ....	72
Figura 6.12: Dimensiones y distribución para el almacenamiento transitorio. ....	73
Figura 6.13: Contenedor metálico para almacenar trozos de NMFU. ....	74
Figura 6.14: Diagrama de flujo del gasificador.....	75

Figura 6.15: Contenedor PP para almacenar residuos sólidos.....	76
Figura 6.16: Contenedores PP apilados para almacenamiento sólidos. ....	77
Figura 6.17: Dimensiones para la bodega de residuos sólidos. ....	77
Figura 6.18: Diagrama de bloques de los procesos involucrados en la generación de energía.....	78
Figura 6.19: Diagrama de bloques para la caldera-condensador. ....	80
Figura 6.20: Diagrama del tratamiento gaseoso. ....	81
Figura 6.21: Diagrama de bloques del tratamiento para líquidos. ....	83
Figura 6.22: Contenedor tipo bin para residuos líquidos.....	84
Figura 6.23: Dimensiones de la bodega de RESPEL.....	84
Figura 6.24: Tanque de almacenamiento para el aceite.....	85
Figura 2.25: Gráfico de la variación del VAN en base a la tasa de interés bancario.....	101
Figura 6.26: Gráfico de variación del VAN con el aumento de la quema de NMFU.....	109
Figura 6.27: Gráfico de variación del VAN en base al precio de energía eléctrica.....	110

## 1.INTRODUCCIÓN

La necesidad del ser humano por implementar mejoras a los procesos de la época en que se encuentra lo ha llevado a lo largo de la historia a desarrollar nuevas tecnologías que logren mejorar la eficiencia de dichos procesos. Es así como a mediados del siglo XVIII, en base a la necesidad de crear una máquina capaz de generar energía mecánica, se diseñó la máquina de vapor, hito importante que es el pilar de la primera revolución industrial, la que trajo consigo una gran transformación en la economía, cultura y tecnología a nivel mundial. En la segunda revolución industrial se reemplazó el vapor por otras fuentes de energía, como lo son la electricidad y el petróleo, que gracias a los avances de la época se diseñaron nuevos procesos que lograron transformar este último en gasolina, provocando la creación de vehículos que funcionaban con motores de combustión interna. A raíz de aquello, el automóvil comenzó a ser comercializado y durante el siglo XXI se transformó en un bien de consumo general (OpenCourseWare, 2010). El uso masivo de esta máquina, sumado al aumento en la industrialización, trajo consigo consecuencias medioambientales que en la década del cincuenta comenzaron a evidenciarse. Dos décadas después, la protección al medio humano fue desarrollada en la Conferencia de Estocolmo, convocada por la Asamblea General de las Naciones Unidas. (Franciskovic M, 2012)

Las Naciones Unidas (ONU), en 1992, propuso un plan de acción llamado Agenda 21, que detalla las estrategias que deben ser adoptadas por los gobiernos para minimizar el impacto del ser humano sobre el ambiente. La última actualización de este documento se publicó en el año 2015 y se denomina Agenda 2030, la cual consta de 17 objetivos para un desarrollo sostenible con un total de 169 metas. El objetivo 12 trata sobre garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, fomentando el uso de recursos y la eficiencia energética, logrando la cooperación entre todos los participantes de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final. La meta 12.5 establece que de aquí al año 2030 se debe reducir considerablemente la generación de residuos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

En Chile, el interés por gestionar los residuos se ha incrementado gracias a la aprobación de la Ley 20.920, conocida como la Ley del Reciclaje o la Ley REP, la cual busca disminuir la generación de residuos y fomentar la reutilización, el reciclaje y la valorización de éstos. La forma de conseguir aquello, en la actualidad, es centrando el interés en seis productos que son de consumo masivo en el país. Uno de estos seis productos son los neumáticos, que terminada su vida útil se les conoce como neumáticos fuera de uso (NFU). Este residuo no es considerado peligroso bajo la normativa ya mencionada. Sin embargo, el acopio de éstos trae consigo potenciales riesgos a la población y al ambiente, como lo es el riesgo de incendio, que de ocurrir, se genera una nube toxica que contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP, por sus siglas en inglés), los que son considerados cancerígenos si la exposición a éstos es a largo plazo. Esta es una de las razones que por precaución se debió evacuar a la población de la comuna de Maipú, en un radio de 500 metros al suceso, cuando en Agosto del presente año se incendió un depósito de 3.000 neumáticos en desuso. (Induambiente, 2018)

Gracias a los avances tecnológicos, actualmente es posible transformar los residuos en energía, algo que varios países han adoptado entre sus políticas, lo que concuerda con otra actividad que aparece en la Agenda 2030, en la meta 9.4, como lo es reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales ambientalmente racionales. En el caso de Chile, la Política Energética actual está basada en cuatro pilares, los que son: Seguridad y calidad del suministro; Energía como motor de desarrollo; Energía compatible con el Medio Ambiente y; Eficiencia y Educación Energética. Esta Política propone metas en base a la integración de estos cuatro pilares. Una de estas metas es que para el año 2035 el sector industrial y minero implemente mejoras de eficiencia energética en sus procesos, ya que son el mayor consumidor de energía en el país (Ministerio de Energía, 2015). El rubro minero, junto con el de construcción, generan un tercio de los neumáticos en desuso que se generan al año en el país (CINC, 2017). El

neumático tiene un poder calorífico entre 32-34 MJ/kg, convirtiéndolo en un residuo factible de aprovechar energéticamente. Es por consiguiente que este trabajo tiene por objetivo general diseñar una planta de generación de energía utilizando el tratamiento térmico de gasificación para el sector minero a base de los neumáticos usados que ellos mismos generan, logrando así que su proceso sea más sustentable.

## 2.MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes generales sobre los residuos sólidos no peligrosos

Un residuo es “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse” (Unión Europea, 2008). Para el caso de los residuos sólidos, estos pueden clasificarse según su riesgo para la salud, los que pueden ser peligrosos y no peligrosos, y según su origen en industriales y municipales. Para los residuos sólidos industriales, al momento de clasificar el residuo, se considera el sector económico en el que se genera éste, tomando como base la Clasificación Industrial Uniforme (CIIU) que considera las siguientes actividades económicas: agrícola y silvícola; minería y cantera; producción de energía; manufactura; producción y distribución de agua; y la construcción. Para el caso de los residuos municipales, en esta categoría entran los residuos sólidos provenientes del comercio, de los hogares, escuelas, entre otros (CONAMA, 2010). De manera global, dentro de los países pertenecientes a la Unión Europea, las actividades que generan mayor cantidad de residuos son la construcción y la minería, como se aprecia en la figura 2.1, con un total generado de 2.509 millones de toneladas. (Eurostat, 2014)

Los impactos ambientales asociados a la eliminación de residuos son variados, algunos de ellos incluyen la alteración en la calidad del agua, el suelo y el aire; perturbación en la salud de la población por los vectores sanitarios; deterioro paisajístico y malos olores (Ministerio del Medio Ambiente, 2011). Debido a esto la eliminación es la última opción que se busca a la hora de realizar una correcta gestión de los residuos. La Unión Europea, en el artículo 4 de la Directiva del 2008/98/CE, propone una jerarquización para la prevención y gestión de los residuos, la cual fomenta, en primera instancia, reducir la generación de éstos. Si aquello no es posible, se debe intentar con la reutilización y el reciclaje, luego con la valorización energética y, por último, la eliminación. Esta jerarquía de residuos suele representarse con una pirámide invertida, como se muestra en la figura 2.2.

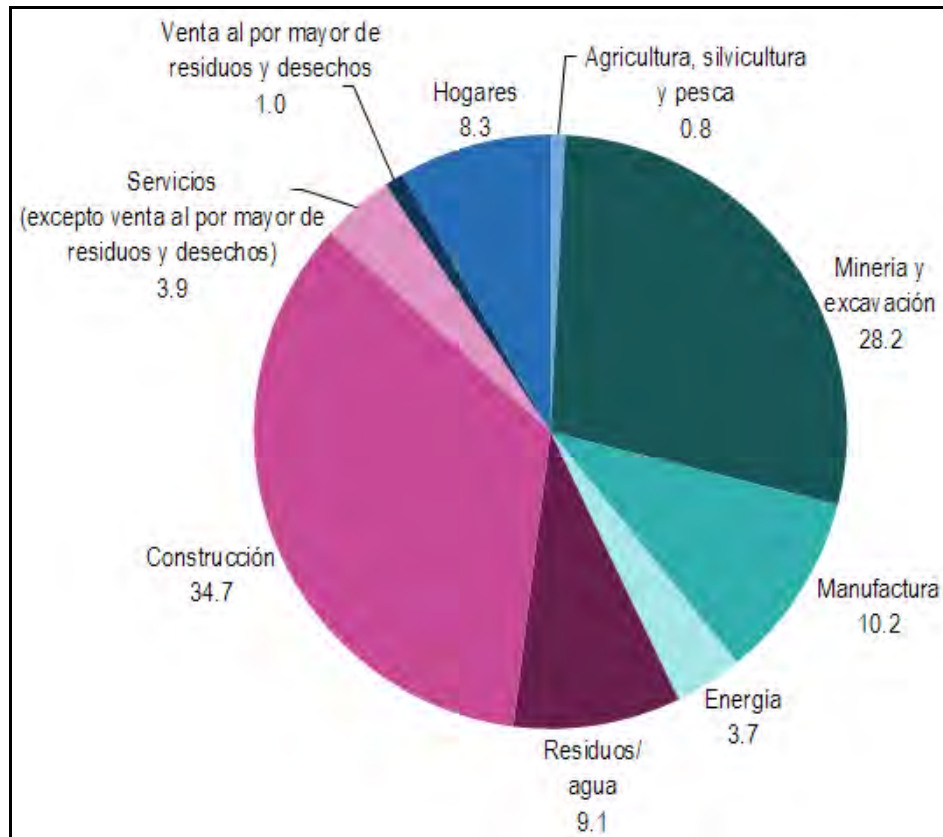


Figura 2.1: Generación de residuos por actividades económicas en los países de la Unión Europea durante el año 2014.

Fuente: Adaptado de ec.europa.eu/eurostat



Figura 2.2: Pirámide invertida para la jerarquización de residuos.

Fuente: recicla.online

## 2.2. Manejo y generación de residuos en Chile

A nivel local, el problema de los residuos comenzó a evidenciarse a comienzos del siglo XXI. Durante este periodo aumentó la población nacional y junto con ello la generación de residuos sólidos. Para el caso de los residuos sólidos municipales (RSM), que son aquellos generados en los hogares y sus asimilables, como lo son las vías públicas, el comercio, oficinas, edificios e instituciones (escuelas, por ejemplo), entre los años 2000 y 2009 se registró un incremento de un 28%. Durante este mismo periodo, la generación per cápita incrementó de 326 kg por habitante a 384 kg por habitante a nivel nacional (CONAMA, 2010), como se muestra en la figura 2.3.

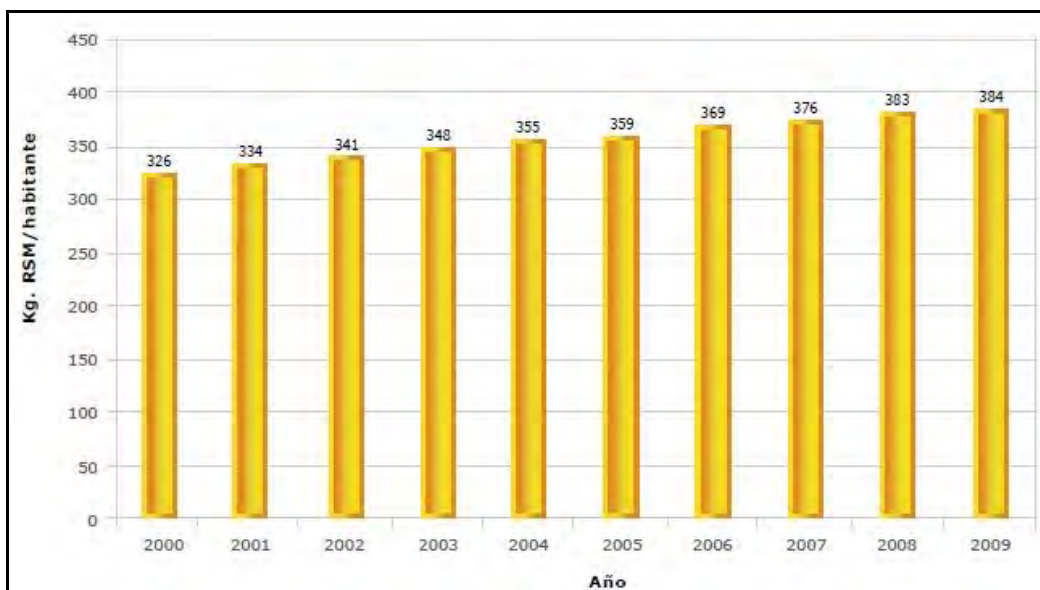


Figura 2.3: Generación de residuos sólidos municipales per cápita.

Fuente: Conama, 2010.

Debido a la relación directa entre el crecimiento de la población y el aumento de los residuos sólidos es que el Estado se vio en la necesidad de implementar estrategias para enfrentar aquel problema. Es así como en el 2005 el Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente aprobó la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos, la que busca “lograr que el manejo de residuos sólidos se realice con el mínimo de riesgo para la salud de la población y el medio ambiente”. Sin embargo, para lograr encaminar al

país en este objetivo ha sido necesario contar con información relevante sobre los residuos en sí, como por ejemplo lo es conocer el tipo y cómo se clasifican, la generación total por sector y el tratamiento que se les otorga. Para el caso de los residuos no peligrosos, lograr recabar esta información ha sido aún más compleja ya que los datos que se tienen han provenído de encuestas y estimaciones. (Ministerio del Medio Ambiente, 2011)

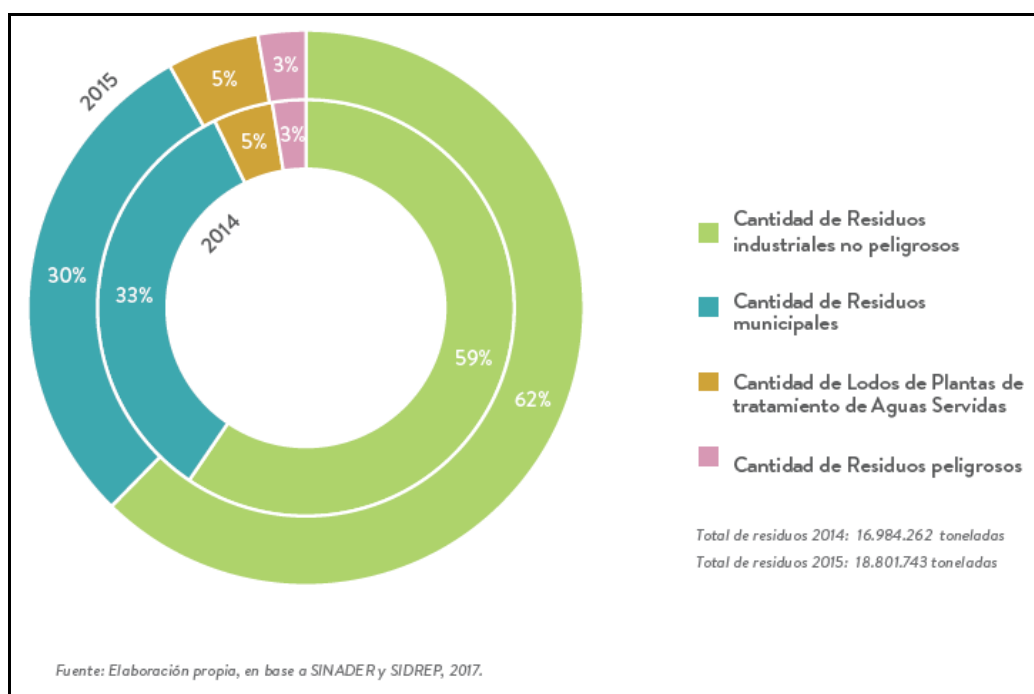


Figura 2.4: Generación de residuos en porcentaje para los años 2014 y 2015.

Fuente: Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2017.

Chile se ha visto en la obligación de mejorar sus prácticas en materia ambiental al ingresar, en el 2010, a la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE), lo que ha generado modificación en la legislación nacional junto con las instituciones de carácter ambiental, así como también, se adquirió el compromiso de informar a la Organización sobre el manejo de los residuos en el país. Un ejemplo de esto es el Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER), operativo desde el 2015, en donde los destinatarios y generadores de residuos sólidos no peligrosos deben declarar el origen, el tipo, la cantidad (en toneladas), el destino y el tipo de tratamiento. Con esta

herramienta se obtuvo que la cantidad total de residuos sólidos no peligrosos generados en el año 2015 fueron de 11.719.179 de toneladas y 5.550.449 de toneladas del tipo industrial y municipal, respectivamente, siendo los del tipo industrial los que más se generaron dentro del país, como se puede ver en la figura 2.4. (Ministerio del Medio Ambiente, 2017)

Por otro lado, dentro de la misión de mejorar la gestión de los residuos es que algunos sectores productivos, de manera voluntaria y en conjunto a organismos del Estado, han firmado Acuerdos de Producción Limpia (APL), en los cuales se comprometen a cumplir metas dentro de un cierto periodo de tiempo. En este contexto, el Acuerdo de Producción Limpia: Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso, del 2009, buscó incorporar, de manera voluntaria, la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) dentro de los distintos niveles en la cadena del neumático, es decir, desde la fabricación hasta su eliminación. Esto último es uno de los 10 principios que posee la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos, y no es hasta el 2016 que se aprueba en el país la Ley 20.920, conocida comúnmente como la Ley del Reciclaje, la que responsabiliza a los productores de productos prioritarios que se comercializan en el territorio nacional a financiar y organizar la gestión de los residuos de aquellos productos.

En cuanto a la gestión que se les debe dar a los residuos, la Ley N° 20.920 fija el principio de jerarquización que se mencionó en el punto anterior, es decir, el orden en el manejo de los residuos debe priorizar la prevención, luego se debe considerar: la reutilización, el reciclaje, la valorización energética y en última instancia la eliminación. En cuyo caso, bajo la Ley N° 20.920 estos tratamientos se definen de la siguiente manera:

- Reutilización: “Acción mediante la cual productos o componentes de productos desechados se utilizan de nuevo, sin involucrar un proceso productivo.”

- Reciclaje: “Empleo de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo, incluyendo el co-procesamiento y compostaje, pero excluyendo la valorización energética.”
- Valorización energética: “Empleo de un residuo con la finalidad de aprovechar su poder calorífico.”
- Eliminación: “Todo procedimiento cuyo objetivo es disponer en forma definitiva o destruir un residuo en instalaciones autorizadas.”

En cuanto a la valorización, esta se define como “conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y/o el poder calorífico de los mismos. La valorización comprende la preparación para la reutilización, el reciclaje y la valorización energética.”

## **2.3. Normativa nacional**

### **2.3.1. Marco regulatorio relativo al manejo de residuos no peligrosos**

A continuación se mencionan las principales leyes que buscan regular la gestión de los residuos sólidos no peligrosos en el país, con especial enfoque a los de tipo industrial, para disminuir sus impactos, tanto sociales como ambientales.

#### **2.3.1.1. Decreto con Fuerza de Ley 725/1968, Código Sanitario**

Proveniente del Ministerio de Salud, el objetivo de este decreto con fuerza de ley es fomentar, proteger y recuperar la salud de los ciudadanos que habitan en el territorio nacional, así como también, regular ciertos aspectos asociados a la higiene y seguridad del ambiente y del lugar de trabajo de la población.

En el artículo 71 se estipula que el Servicio Nacional de Salud deberá aprobar los proyectos relacionados a la construcción, modificación, reparación y ampliación cuyo destino sea el tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros.

### **2.3.1.2. Ley 19.300/1994 (20.417/2010), Sobre bases generales del medio ambiente.**

Promulgada por el Ministerio Secretaría General de la Presidencia. El objetivo de esta Ley es regular la protección del medio ambiente, así como también la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental, teniendo como principio general que todo ciudadano en el territorio nacional tiene el derecho de vivir en un ambiente libre de contaminación (artículo 1).

Esta Ley crea el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), que es un instrumento de gestión ambiental que busca determinar si un proyecto o una actividad se ajusta a las normas vigentes. En el artículo 10 se establece un listado de proyectos o actividades que deberán someterse a este instrumento por ser considerados susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases. En ese mismo contexto, cuyo proyecto o actividad que genere o presente al menos uno de los efectos, características o circunstancias que aparecen en el artículo 11 deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental por medio de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

Con la promulgación de esta Ley se crearon las normas de calidad ambiental, pudiendo ser primarias o secundarias, las cuales establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias o elementos cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo. Para el caso de las normas primarias de calidad ambiental su aplicación es de carácter general, es decir, abarca todo el territorio nacional y definen los niveles que originaran situaciones de emergencia. En cambio, las normas secundarias de calidad ambiental poseen una aplicación de carácter local ya que buscan la protección o conservación de un sector en específico, como lo puede ser un lago o un río, por ejemplo. Las normas de calidad ambiental permiten también declarar zonas como saturadas o latentes, decretar planes de prevención y descontaminación, y definir normas de emisión. Estas últimas establecen la cantidad máxima permitida para un contaminante, medida en el efluente de la fuente emisora, y pueden aplicarse en todo el territorio nacional o en parte de él.

Los planes de prevención y descontaminación son también un instrumento de gestión ambiental creados por esta Ley. Los planes de prevención definen e implementan las medidas y acciones específicas para evitar la superación de una o más normas de calidad ambiental en una zona latente, es decir, una zona en la que su medición de concentración de un contaminante se sitúa entre el 80% y 100% del valor de la norma de calidad ambiental respectiva. Un plan de descontaminación, por otro lado, tiene por finalidad recuperar los niveles señalados en las normas de calidad ambiental en una zona calificada como saturada por uno o más contaminantes. Una zona saturada es aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas.

En el año 2010 se publicó la Ley 20.417, que modifica la Ley 19.300. Esta modificación trae consigo la creación de nuevas institucionalidades, como lo es el Ministerio del Medio Ambiente, en donde en el artículo 70 se establecen sus responsabilidades, una de las cuales es la coordinación del proceso de generación de las normas de calidad ambiental, de las normas de emisión y de los planes de prevención y descontaminación, determinando los programas para su cumplimiento.

### **2.3.1.3. Decreto 40/2013, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.**

Este Reglamento le otorga operatividad al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, el cual establece las disposiciones por las que se regirá el ya mencionado Sistema de Evaluación. En este reglamento se señala en detalle los proyectos o actividades que deberán presentar, a lo menos, una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), así como también los contenidos mínimos que se deberán presentar en aquel documento.

Dependiendo de las características del proyecto, se requerirá obtener uno o varios permisos que autoricen la realización de las actividades que éste necesite para llevarse a cabo. En lo que esto respecta, en el título VII de este decreto se encuentra un listado con los permisos ambientales sectoriales (PAS), que pueden ser mixtos o de contenido

únicamente ambiental. Para cada PAS se mencionan los requisitos necesarios que debe presentar el proyecto para su otorgamiento, y los contenidos técnicos y formales para acreditar su cumplimiento.

En cuanto al Ministerio del Medio Ambiente, en el artículo 70 se indican las responsabilidades que esta Ley le otorga, entre ellas se menciona la de administrar un registro de emisiones y transferencias de contaminantes generados por los establecimientos.

#### **2.3.1.4. Decreto 1/2013, Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, RETC.**

En materia de residuos sólidos, el objetivo de este Decreto es poder contar con una base de datos sobre la naturaleza, el volumen y el destino de éstos generados en los establecimientos. En el artículo 3, se define establecimiento como “recinto o local en el que se lleva a cabo una o varias actividades económicas donde se produce una transformación de la materia prima o materiales empleados, o que no producen una transformación en su esencia pero dan origen a nuevos productos, y que en este proceso originan emisiones, residuos y/o transferencias de contaminantes; así como cualesquiera otras actividades directamente relacionadas con aquéllas que guarden una relación de índole técnica con las actividades llevadas a cabo en el mismo emplazamiento y puedan tener repercusiones sobre generación de emisiones, residuos y/o transferencias de contaminantes.”

En el artículo 26 se establece que los establecimientos que generen anualmente más de 12 toneladas de residuos no sometidos a reglamentos específicos, estarán obligados a declarar al 30 de marzo de cada año sus residuos generados el año anterior en el Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER). Así mismo, en el artículo 28, se estipula que los destinatarios que reciban anualmente más de 12 toneladas de residuos deberán

declarar los residuos recepcionados el año anterior por medio del SINADER, al 30 de marzo de cada año.

**2.3.1.5. Ley 20.551/2011 (20.819/2015), Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras.**

Esta Ley obliga a las empresas mineras a hacerse cargo de las externalidades negativas e incorporarlas como un elemento más dentro del negocio minero, ya que las obliga a contar con un plan de cierre aprobado por el Servicio Nacional de Geología y Minería, previo al inicio de las operaciones. La Ley define al plan de cierre como “documento que especifica el conjunto de medidas técnicas y actividades que la empresa minera debe efectuar desde el inicio de la operación minera, y el programa de detalle conforme al cual deben implementarse, de manera que tienda a prevenir, minimizar o controlar los riesgos y efectos negativos que se puedan generar en la vida e integridad de las personas que se encuentran relacionadas directa e inmediatamente a las mismas, así como mitigar los efectos de la operación minera en los componentes medio ambientales comprometidos, tendientes a asegurar la estabilidad física y química de los lugares en que ésta se realice”.

El Servicio Nacional de Geología y Minería será el encargado de revisar y aprobar los aspectos técnicos de estos planes, y para asegurar el cumplimiento de éstos se realizarán periódicamente auditorías, cuyo procedimiento se encuentra detallado en el artículo 19.

**2.3.1.6. Ley 20.920/2016, Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.**

Esta Ley, del Ministerio del Medio Ambiente, busca instaurar una responsabilidad hacia los productores de productos prioritarios con el objetivo de reducir el volumen y fomentar la reutilización, el reciclaje y algún otro tipo de valoración de residuos.

Se define como generador al “poseedor de un producto, sustancia u objeto que lo desecha o tiene la obligación de desecharlo de acuerdo a la normativa vigente”. Para el

caso del gestor este se define como “persona natural o jurídica, pública o privada, que realiza cualquiera de las operaciones de manejo de residuos y que se encuentra autorizada y registrada en conformidad a la normativa vigente”. En este contexto, se establece en el artículo 5 que los generadores de residuos deberán entregarlos a un gestor autorizado para su tratamiento, por otra parte, el artículo 6 establece que todo gestor deberá manejar estos residuos de manera ambientalmente racional, aplicando las mejores técnicas disponibles.

De la responsabilidad extendida del productor del Título III, el artículo 9 establece que, los productores de productos prioritarios son responsables de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos de los productos prioritarios que comercialicen en el país. Estos productores deberán cumplir con: inscribirse en El Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes; organizar y financiar la recolección, así como almacenamiento, transporte y tratamiento; cumplir con las metas y plazos establecidos y; asegurar que la gestión de los residuos de productos prioritarios se realice por gestores registrados y autorizados.

Se define como producto prioritario, según el artículo 10, a los productos que se encuentren en la siguiente categoría:

- a) Aceites lubricantes.
- b) Aparatos eléctricos y electrónicos.
- c) Baterías.
- d) Envases y embalajes.
- e) Neumáticos.
- f) Pilas.

Sobre las metas de recolección y valorización, el artículo 12 establece que serán establecidas mediante Decretos Supremos dictados por el Ministerio del Medio Ambiente.

Los Decretos Supremos tienen como fin establecer los instrumentos de gestión para prevenir la generación de residuos y/o promover su valorización. Esta Ley contiene cuatro artículos como disposiciones transitorias, de los cuales es necesario mencionar el segundo ya que mientras no entren en vigencia los Decretos Supremos es el Ministerio del Medio Ambiente quien tendrá la facultad para requerir a los productores de productos prioritarios información sobre la cantidad comercializada, recolectada y valorizada, entre otros.

### **2.3.2. Requisitos normativos que debe cumplir el diseño de la planta**

El marco normativo nacional, mencionado anteriormente, exige que el diseño, habilitación y operación de la planta cumpla con ciertos requisitos, por lo que una vez establecido el alcance del diseño se debe revisar el artículo 3 del Decreto 40 del Ministerio del Medio Ambiente para verificar si debe someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. De ser así, se debe presentar una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), a no ser que la planta genere o presente alguno de los efectos o características presentadas en los artículos 5, 6, 7, 8, 9 y 10 de dicho Decreto, en cuyo caso se debe presentar una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

#### **2.3.2.1. Normas aplicables**

En la fase de operación de la planta se consideran las emisiones a la atmósfera, el almacenamiento de sustancias peligrosas, condiciones básicas de trabajo y almacenamiento de combustible, ya sea para maquinaria o como recurso básico para los trabajadores. Por ende, la planta debe dar cumplimiento a las siguientes normas:

- a) Decreto 144/1961, Establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza.
- b) Decreto 735/1969, Establece las condiciones de servicio de agua destinado a consumo humano.

- c) Decreto 609/1998, Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.
- d) Norma Chilena 382/1998, Establece la terminología y clasificación general de las sustancias peligrosas.
- e) Decreto 594/2000, Establece las condiciones sanitarias y ambientales básicas que se deben cumplir en los lugares de trabajo.
- f) Decreto 298/2002, Establece condiciones para el transporte de cargas peligrosas por calles y caminos.
- g) Decreto 160/2009, Establece el manejo seguro para instalaciones y operaciones de producción, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos.
- h) Decreto 13/2011, Establece norma de emisión para centrales termoeléctricas.
- i) Decreto 38/2012, Establece norma de emisión de ruidos generados por fuentes que indica, entre ellas, las actividades productivas.
- j) Decreto 29/2013, Establece norma de emisión para incineración, coincineración y coprocesamiento. En el proceso de Incineración se incluye la pirólisis y gasificación.
- k) Decreto 43/2016, Establece las condiciones de almacenamiento de sustancias peligrosas.

La normativa señalada posee una aplicación de carácter nacional, por lo que una vez seleccionada la ubicación para el diseño de la planta se deberá revisar si existe normativa específica para el sector.

### **2.3.2.2. Permisos Ambientales**

De acuerdo al Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (punto 2.3.1.3 del presente documento) los permisos ambientales sectoriales de contenido únicamente ambiental que puede necesitar la planta se encuentran relacionados con la ubicación, por

lo que una vez seleccionado el lugar se deberán revisar. Por otro lado, los permisos ambientales sectoriales mixtos que se asocian a la planta de valorización de neumáticos fuera de uso del tipo minero son los siguientes:

- a) Artículo 139: Permiso para la construcción de cualquier particular destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros.
- b) Artículo 140: Permiso para la construcción de cualquier planta de tratamiento de residuos o para la instalación de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización o disposición final de desperdicios de cualquier clase.
- c) Artículo 142: Permiso para todo sitio destinado al almacenamiento de residuos peligrosos.
- d) Artículo 161: Calificación de instalaciones industriales y de bodegaje.

Cabe mencionar que existen otros permisos o autorizaciones que los proyectos o actividades necesitan tramitar para poder realizar sus operaciones con normalidad, y así cumplir con lo que la normativa establece para asegurar la protección al ambiente, salud, y seguridad. Sin embargo, se escapan al tema del diseño de la planta y a la disciplina en sí, como lo es, por ejemplo, el Informe Sanitario, el cual es un documento que al momento de solicitarse, la infraestructura y el equipamiento de la obra debe encontrarse instalada.

## **2.4. Los neumáticos como residuo**

### **2.4.1. Composición y ciclo general de los neumáticos**

Un neumático se encuentra constituido por varios elementos y sus partes más características se identifican en la figura 2.5, por otro lado, su composición en peso se presenta en la tabla 2.1.

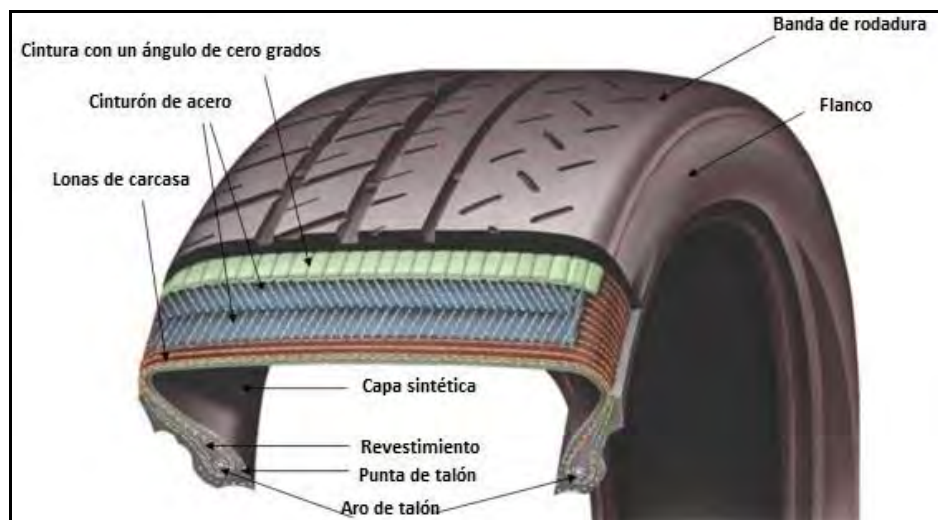


Figura 2.5: Estructura general de un neumático.

Fuente: oponeo.es

Tabla 2.1: Composición (% en peso) de neumáticos de automóviles y camiones.

Material	Automóviles (%)	Camiones (%)
Caucho	48	45
Negro de humo y sílice	22	22
Metal	15	25
Material textil	5	<5
Óxido de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	<5

Fuente: UNEP/CHW.9/18, 2008.

En la cadena económica del ciclo de vida útil de los neumáticos se encuentran los productores, distribuidores, comercializadores y generadores (consumidores). Cuando el neumático deja de ser útil puede pasar por un proceso de recauchado y así extender su vida útil, de lo contrario, el neumático pasa a ser un residuo del cual el consumidor desea deshacerse y reemplazar por otro, para ello, el consumidor se dirige a un lugar especializado, comúnmente un taller mecánico o servicentro, donde el neumático usado es recolectado y almacenado temporalmente (Gescam, 2017). Generalmente, este

almacenamiento temporal se realiza sin mayor control en patios o cualquier espacio que exista disponible, para luego ser enviados a algún lugar para su disposición final, que en la mayoría de los casos es desconocido, pudiendo así terminar en vertederos informales. (CINC, 2013)

#### **2.4.2. Neumáticos Fuera de Uso**

El documento Acuerdo de Producción Limpia: Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso define a estos como “aquellos neumáticos que según su estado no son apto para su uso seguro según las Normas Chilenas. Asimismo, se considerarán como tales las cámaras y neumáticos de rechazo de fabricación. Incluye aquellos neumáticos de los que se desprenda su poseedor en el sistema de gestión.”

Como se mencionó anteriormente, la generación de residuos trae consigo varios impactos al medio ambiente y a la salud de las personas. En cuanto a los impactos asociados netamente al acopio de neumáticos, se puede mencionar el riesgo de incendio, que de ocurrir, el fuego puede arder durante semanas, incluso meses, lo que ocasionaría la pérdida de la calidad del aire, por la emisión de gases tóxicos, y la alteración del suelo junto con el agua, superficial y subterránea, por el residuo líquido que se genera. Otro impacto importante asociado al acopio de este residuo es la aparición de vectores, tales como roedores y mosquitos, los que son un riesgo para la población por ser transmisores de enfermedades (Integrated Environmental Management Services, 2012). El acopio de neumáticos fuera de uso es propenso a generar un pasivo ambiental por presentar un riesgo para el ambiente, por las razones que se acaban de mencionar. Los pasivos ambientales suelen producirse cuando un proyecto o una actividad abandona el lugar en donde opera sin antes reparar los daños ambientales ocasionados. Esto quiere decir que el pasivo ambiental se genera en el pasado y los daños ambientales, al no ser remediados a tiempo, causan en la actualidad efectos negativos en el ambiente que suelen ser progresivos. Una manera de enfrentar este problema es gestionando la generación y el tratamiento de estos residuos bajo una visión de prevención y control.

Las alternativas de tratamiento para los neumáticos fuera de uso a nivel mundial se presentan en la tabla 2.2, siendo la tendencia actual utilizarlos en tecnologías para valorización energética, debido básicamente a los costos asociados a la energía y los combustibles.

Tabla 2.2: Alternativas de tratamiento para los Neumáticos Fuera de Uso.

<b>Reutilización</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recauchaje</li> </ul>
<b>Reciclaje</b>
<b>Sin modificación física</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barreras o defensas de caminos</li> <li>• Edificaciones (viviendas earthship)</li> <li>• Uso en rellenos sanitarios</li> <li>• Control de erosión</li> <li>• Construcción de diques y muros o taludes de contención, relleno de terraplenes</li> </ul>
<b>Con modificación física</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trituración para moldeo de nuevos productos</li> <li>• Enriquecimiento de asfalto para pavimentos: uso como caucho asfáltico o como sustituto de parte del árido en mezcla asfáltica</li> <li>• Hormigón modificado</li> </ul>
<b>Con o sin modificación</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construcción de barreras de ruido, aislamiento térmico</li> </ul>
<b>Valorización energética</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustible alternativo</li> <li>• Incineración</li> <li>• Pirólisis</li> <li>• Gasificación</li> </ul>

Fuente: Realizado en base al informe preparado por C y V Mediambiente Ltda, la Ley 20.920 e información recabada.

### 2.4.3. Generación de NFU en Chile

La Cámara de la Industria del Neumático de Chile (CINC) representa a los productores de neumáticos en el país y en base a registros de importación de neumáticos nuevos y bandas de recauchaje, informes del mercado automotor de la asociación Nacional Automotriz de Chile A.G. (ANAC), y de datos entregados por valorizadores de neumáticos fuera de uso, entregó estadísticas de la generación total de NFU y el porcentaje de valorización que se les dio a éstos durante el periodo 2011 y 2017. El total de NFU por sector se presenta en la tabla 2.3, donde se aprecia que el sector con mayor aporte en la generación de este residuo corresponde a camiones y buses. Esta tendencia ha sido habitual en el pasado, por lo que no es de sorprender que las empresas dedicadas a este rubro hayan adoptado el recauchaje entre sus políticas, de esta manera el neumático, una vez alcanzado su vida útil, pasa por aquel tratamiento y vuelve a ser utilizado, repitiéndose esta acción hasta que ya no sea factible de realizar dicho procedimiento.

Tabla 2.3: Generación, en toneladas, de neumáticos usados para los años 2011-2017.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Generación de neumáticos usados (NU)</b>								
Reemplazo	Agrícola forestal e industrial	6.135	6.756	5.705	5.568	6.088	6.819	6.732
	Auto y camioneta	24.705	25.248	29.329	30.350	33.160	35.752	37.949
	Camión y bus	47.780	54.075	52.995	47.373	55.946	54.966	50.461
	Minería y construcción	34.591	37.746	47.696	36.897	33.308	25.081	35.184
	Otros	1.266	1.807	1.558	1.683	1.734	1.663	1.840
	<b>Total NU por reemplazo</b>	<b>114.477</b>	<b>125.632</b>	<b>137.283</b>	<b>121.872</b>	<b>130.238</b>	<b>124.281</b>	<b>132.166</b>
Vehículos fuera de uso	Agrícola forestal e industrial	<i>NO APLICA</i>						
	Auto y camioneta	1.852	2.251	3.740	5.152	7.834	5.036	6.897
	Camión y bus	430	4.000	5.903	3.207	6.263	3.166	4.103

Continuación tabla 2.3: Generación, en toneladas, de neumáticos usados para los años 2011-2017.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Generación de neumáticos usados (NU)</b>								
Vehículos fuera de uso	Minería y construcción	<i>NO APLICA</i>						
	Otros	<i>NO APLICA</i>						
	<b>Total NU por vehículos fuera de uso</b>	<b>2.282</b>	<b>6.251</b>	<b>9.643</b>	<b>8.359</b>	<b>14.097</b>	<b>8.202</b>	<b>11.000</b>
Total generación de neumáticos usados	Agrícola forestal e industrial	6.135	6.756	5.705	5.568	6.088	6.819	6.732
	Auto y camioneta	26.557	27.499	33.069	35.502	40.994	40.788	44.846
	Camión y bus	48.210	58.075	58.898	50.580	62.209	58.132	54.564
	Minería y construcción	34.591	37.746	47.696	36.897	33.308	25.081	35.184
	Otros	1.266	1.807	1.558	1.683	1.734	1.663	1.840
	<b>Total generación</b>	<b>116.759</b>	<b>131.883</b>	<b>146.926</b>	<b>130.231</b>	<b>144.335</b>	<b>132.483</b>	<b>143.166</b>
<b>Recauchaje</b>								
	Camión y bus	<b>14.183</b>	<b>15.152</b>	<b>13.147</b>	<b>11.523</b>	<b>10.860</b>	<b>9.726</b>	<b>8.306</b>
<b>Generación de neumáticos fuera de uso (NFU)</b>								
Total generación NFU	Agrícola forestal e industrial	6.135	6.756	5.705	5.568	6.088	6.819	6.732
	Auto y camioneta	26.557	27.499	33.069	35.502	40.994	40.788	44.846
	Camión y bus	34.027	42.923	45.751	39.057	51.350	48.406	46.257
	Minería y construcción	34.591	37.746	47.696	36.897	33.308	25.081	35.184
	Otros	1.266	1.807	1.558	1.683	1.734	1.663	1.840
	<b>Total generación de NU</b>	<b>102.576</b>	<b>116.732</b>	<b>133.779</b>	<b>118.707</b>	<b>133.475</b>	<b>122.757</b>	<b>134.860</b>

Fuente: Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G. 2018.

En cuanto a la valorización de los neumáticos fuera de uso, hasta el 2016 éstos eran utilizados solamente para formar gránulos de caucho o como combustible alternativo en plantas cementeras, no obstante, las empresas que realizan dichos procesos de valorización son escasas, ocasionando que el país obtuviese un bajo porcentaje de valorización para este residuo, como se puede ver en la tabla 2.4. No está de más mencionar que la única empresa cementera que está autorizada a utilizar NFU en su proceso productivo es Cementos Melón, la cual por medio de una Resolución de Calificación Ambiental, otorgada en el 2002, se encuentra autorizada para utilizar hasta 15.616 ton/año de NFU.

En el 2017 se sumó otra empresa en la valorización energética de este residuo. Esta empresa es KONA FUEL Spa, que por medio de pirólisis obtiene un combustible que alimenta la planta KONA POWER S.A., la cual funciona a base de motores diésel para generar energía eléctrica (Gescam, 2017). Este combustible es denominado como aceite pirolítico y posee un poder calorífico de 39,7 MJ/kg. Esta planta genera entre 9,5-14,3 m<sup>3</sup>/día de combustible con una capacidad de tratamiento de 20-30 toneladas por día de neumáticos fuera de uso.

Tabla 2.4: Valorización de NFU generados en el periodo 2011-2017.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Reciclaje	Agrícola forestal e industrial							Datos no disponibles para 2017
	Auto y camioneta	1.321	2.304	2.613	2.961	2.946	3.545	
	Camión y bus	2.454	3.182	3.609	3.409	2.325	2.381	
	Minería y construcción							
	Otros							
	<b>Total reciclaje</b>	<b>3.775</b>	<b>5.486</b>	<b>6.222</b>	<b>6.370</b>	<b>5.271</b>	<b>5.926</b>	

Continuación tabla 2.4: Valorización de NFU generados en el periodo 2011-2017.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Coprocesamiento	Agrícola forestal e industrial							
	Auto y camioneta	2.119	1.926	918	651	456	414	Datos no disponibles para 2017
	Camión y bus							
	Minería y construcción							
	Otros							
	<b>Total coprocesamiento</b>	<b>2.119</b>	<b>1.926</b>	<b>918</b>	<b>651</b>	<b>456</b>	<b>414</b>	
Total valorización de NFU	Agrícola forestal e industrial							
	Auto y camioneta	5.894	7.412	7.140	7.021	5.727	6.340	
	Camión y bus							
	Minería y construcción							
	Otros							
	<b>Total valorización de NFU</b>	<b>5.894</b>	<b>7.412</b>	<b>7.140</b>	<b>7.021</b>	<b>5.727</b>	<b>6.340</b>	
% Valorización de NFU	Agrícola forestal e industrial							
	Auto y camioneta	9,7%	10,5%	9,1%	9,4%	6,2%	7,1%	
	Camión y bus							
	Minería y construcción							
	Otros							
	<b>Total % valorización de NFU</b>	<b>5,7%</b>	<b>6,3%</b>	<b>5,3%</b>	<b>5,9%</b>	<b>4,3%</b>	<b>5,2%</b>	

Fuente: CINC – Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G. Agosto, 2018.

#### 2.4.3.1. Generación de neumáticos mineros fuera de uso en Chile

Los neumáticos que se utilizan en la minería se clasifican como OTR, por sus siglas en inglés Off The Road, lo que se traduce como neumáticos fuera de carretera. Este tipo de neumáticos pueden ser de 49 hasta 63 pulgadas y, una vez terminada su vida útil, pasan a considerarse un residuo conocido como neumáticos mineros fuera de uso (NMFU).

Los neumáticos usados provenientes de la minería también son recauchados y reciclados en el país. Este proceso es realizado por la empresa BAILAC, que mediante molienda transforma el caucho en pequeños gránulos, los cuales terminan siendo comercializados hacia otras empresas, o bien, utilizados para la fabricación de productos y posterior venta de éstos, como lo son las canchas sintéticas de pasto. Sin embargo, de manera general, el rubro de la minería elimina sus neumáticos fuera de uso años tras año acopiándolos en zanjas dentro de sus faenas, con permisos de los respectivos Seremis de Medio Ambiente, lo cual se traduce en grandes hectáreas dispuestas exclusivamente para este residuo (Gescam, 2017), como se aprecia en la figura 2.6 y figura 2.7.



Figura 2.6: Minera Zaldivar, 2018.

Fuente: Google Earth



Figura 2.7: Codelco División Radomiro Tomic, 2018.

Fuente: Google Earth

En cuanto a la generación de NMFU por minera, el Gerente General de CINC comenta que desconoce dónde exista información relacionada y que la manera de estimar aquella generación es distribuyendo las toneladas de neumáticos usados en proporción a la producción de cada mina<sup>1</sup>. Esto es parecido a lo que realizó Gescam S.A. en su informe “Antecedentes para la elaboración de análisis económicos de metas de recolección y valorización para los productos prioritarios neumáticos, baterías y aceites lubricantes, contenidos en la ley 20.920” del 2017, elaborado para el Ministerio del Medio Ambiente con el objetivo de recabar antecedentes técnicos y metodológicos para evaluar económicamente las metas de valorización asociadas a la Ley REP. Cabe mencionar que este informe es uno de los estudios a considerar para la elaboración del Decreto Supremo que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de

<sup>1</sup> Según José Browne en correo electrónico del 23 de abril de 2018.

neumáticos, cuyo proceso se dio inicio mediante la Resolución Exenta 1.491, publicada en el Diario Oficial el 4 de Enero del presente año. Este informe presenta una estimación de los neumáticos mineros fuera de uso generados por región mediante el uso de un factor de generación de NMFU para la minería metálica. Este factor es una división entre la generación de neumáticos mineros fuera de uso de las empresas mineras por la producción de dichas empresas para un año en particular. Esta producción se refleja en las toneladas métricas finas (TMF), cuyo dato es entregado por las mineras de manera voluntaria a la Comisión Nacional del Cobre (COCHILCO). Las toneladas métricas finas (TMF) es la unidad de producción que se utiliza en el rubro minero y corresponde a la cantidad del mineral equivalente producido en la faena minera (COCHILCO, 2014). Es decir, el producto final no contiene escorias ni subproductos (que podrían ser otros minerales).

Para el cálculo del factor de generación, Gescam S.A. utilizó 2 proyectos ingresados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, los cuales fueron “Disposición de neumáticos mediante confinamiento en depósitos de lastre”, de Codelco Chile División Norte (hoy dividida en Chuquicamata y Radomiro Tomic) y el “Proyecto Continuidad Operacional Cerro Colorado” de la Compañía Minera Cerro Colorado Ltda. Estos proyectos presentan la cantidad de neumáticos mineros usados que generan en sus faenas, siendo 80 mensual para el caso de Codelco y 227 al año para Cerro Colorado. A estos datos se le sumaron los resultados de una encuesta realizada por el Consejo Minero en el 2002, para considerar dentro de los cálculos la generación en faenas pequeñas, la cual entregó que la Minera Michilla genera 54 toneladas de NMFU al año.

Finalmente, de este informe se obtuvo un 0,00283 (NMFU/TMF) como factor de generación, el cual se multiplicó por las toneladas métricas finas de cobre y hierro de cada región, las que se obtuvieron del Anuario de la Minería de Chile 2015 de SERNAGEOMIN. La estimación se calculó con la proyección del Producto Interno Bruto y el resultado se

muestra en la tabla 2.5, donde se aprecia que la región de Atacama sería la que generase la mayor cantidad de este residuo según el informe final realizado por Gescam S.A.

Tabla 2.5: Estimación realizada por Gescam en ton/año en base a cobre y hierro.

Región	TMF 2015	Distribución	NMFU 2015	NMFU 2016	NMFU 2017	NMFU 2018	NMFU 2019
I Tarapacá	579.596	4%	1.919	1.949	1.983	2.048	2.120
II Antofagasta	3.108.358	22%	10.290	10.454	10.637	10.983	11.367
III Atacama	8.843.388	62%	29.275	29.743	30.264	31.247	32.341
IV Coquimbo	508.007	4%	1.682	1.709	1.738	1.795	1.858
V Valparaíso	295.323	2%	978	993	1.011	1.043	1.080
VI O'higgins	487.153	3%	1.613	1.638	1.667	1.721	1.782
Metropolitana	401.715	3%	1.330	1.351	1.375	1.419	1.469
XV Arica	5.914	0%	20	20	20	21	22
VII Del Maule	17	0%	0,06	0	0	0	0
XI Aysén	831	0%	3	3	3	3	3
<b>Total</b>	<b>14.230.302</b>	<b>100%</b>	<b>47.107</b>	<b>47.861</b>	<b>48.698</b>	<b>50.281</b>	<b>52.041</b>

Fuente: Gescam S.A. 2017.

#### 2.4.4. Tecnologías aplicables al tratamiento de Neumáticos Fuera de Uso

La gran cantidad de neumáticos usados generados a nivel global y las altas exigencias que se han estado propagando en fomento de la reducción de éstos ha dado como resultado la búsqueda de alternativas para disminuir el volumen y/o valorizarlos, considerando que su poder calorífico neto es entre 32-34 MJ/kg (C y V Medioambiente, 2008). El tratamiento que requiere de tecnologías para tratar este residuo puede dividirse en dos grupos: tratamiento mecánico y tratamiento térmico.

##### 2.4.4.1. Tratamiento mecánico

El neumático es triturado con el objetivo de obtener un material fino o granulado, al que posteriormente se le dará un nuevo uso. Existen dos tipos de trituración: a temperatura ambiente y criogénica.

### Trituración a temperatura ambiente

Llamado así porque las operaciones se realizan sin refrigeración. En este proceso el neumático es triturado por un molino del que se obtienen unos trozos de aproximadamente 150 mm. Posteriormente pasan por una granuladora que reduce los trozos a 10 mm. Si se quiere obtener pedazos más pequeños se utilizan granuladoras secundarias y/o molinos de cuchillos. El tamaño final se puede encontrar entre 0,6-4,0 mm. Después de forma magnética se extrae el acero y con un tamiz se retira la fibra. En algunas plantas la separación de acero y de fibra se realiza antes de la trituración. (Tirel, 2017)

### Trituración criogénica

Al igual que la anterior, también se busca obtener trozos pequeños, sin embargo, aquí los neumáticos, utilizando nitrógeno líquido, son sometidos a bajas temperaturas, que suelen ser de 173 K (-100 °C), para facilitar la trituración. Esto debido a que a bajas temperaturas el caucho se vuelve frágil y se requiere menos energía para reducir los neumáticos en trozos. La principal ventaja de este proceso es la facilidad de separación de los componentes del neumático, que son el acero, la fibra y el caucho, y que requiere de menos equipos, a diferencia de la trituración a temperatura ambiente. De hecho, utiliza solamente dos equipos principales: el túnel de refrigeración y la máquina trituradora. El primero tiene por objetivo enfriar el neumático entero a medida que éste avanza por el túnel. Mientras que el segundo reduce el neumático a partículas de alrededor de 10 micrómetros (Tirel, 2017). Como desventaja se tiene que este proceso requiere de instalaciones complejas y el consumo de nitrógeno es elevado, por lo que es poco rentable. (Rondón y Reyes, 2015)

## **2.4.4.2. Tratamiento térmico**

### Incineración

Este proceso utiliza el neumático como combustible en sí, por lo que no es necesaria la trituración previa. La incineración disminuye considerablemente la masa y volumen de los

neumáticos, entre 60% y 90%, respectivamente (Sahim O. & Kirim Y., 2018). Este tratamiento se utiliza en las plantas cementeras ya que como ventaja se tiene una mejora en las características del hormigón, puesto que las cenizas de la combustión son utilizadas para la formación del Clinker, materia prima del cemento, de esta forma, el horno de cemento no genera residuos sólidos ni líquidos, y se disminuyen los costos en combustible, entre otros. En este proceso los neumáticos alcanzan los 1.723 K (1.450 °C), aproximadamente. Como desventaja, las plantas que utilizan esta tecnología deben tener sistemas de filtración y control de emisiones gaseosas. (C Y V Medioambiente, 2008)

De la combustión de neumáticos se obtienen emisiones de carbono elemental y orgánico, metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), azarenos (un HAP que contiene un nitrógeno en vez de un átomo de carbono) y oxi-HAP (un HAP que contiene uno o más grupos carbonilos). Algunos de estos compuestos pueden afectar la salud de las personas por lo que son considerados peligrosos. (Downard, 2014)

### Pirólisis

Las principales etapas de las plantas de valorización de neumáticos fuera de uso que poseen esta tecnología se describen brevemente a continuación:

1. Tratamiento mecánico: Los neumáticos entran al sistema enteros, cortados a la mitad, rallados o triturados, sin embargo, el ingreso en trozos aumenta la eficiencia del proceso entre 20% y 30%. Después de la trituración se utilizan separadores magnéticos para retirar los materiales ferrosos. (Muzenda, 2014)
2. Pirólisis (tratamiento térmico): Este proceso, que ocurre dentro de un reactor térmico, utiliza temperaturas elevadas, entre 673-7.073 K (400-800 °C), para degradar los compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno y así producir gas de síntesis, gases condensables (del que se puede producir un combustible líquido) y negro de carbón (residuo sólido). (Tirel, 2017)

3. Recuperación de aceite: Los gases condensables provenientes del reactor en donde ocurre la pirólisis suelen refinarse y se pueden mezclar con un diésel para utilizarlo en un motor de combustión interna. Este aceite, conocido como aceite pirolítico, se utiliza como combustible y es sencillo de manipular, almacenar y transportar. (Tirel, 2017)
4. Tratamiento de gases: Los gases no condensables que se obtienen de la pirólisis son recirculados al sistema para precalentar los neumáticos, o bien, para proveer calor dentro del sistema (Tirel, 2017), como se aprecia en la figura 2.8.
5. Recuperación de sólidos: La fracción sólida proveniente del sistema es tratada para conseguir negro de carbón, que puede ser utilizado en la producción de caucho, tinta o para producir plásticos. (Céspedes, 2014)

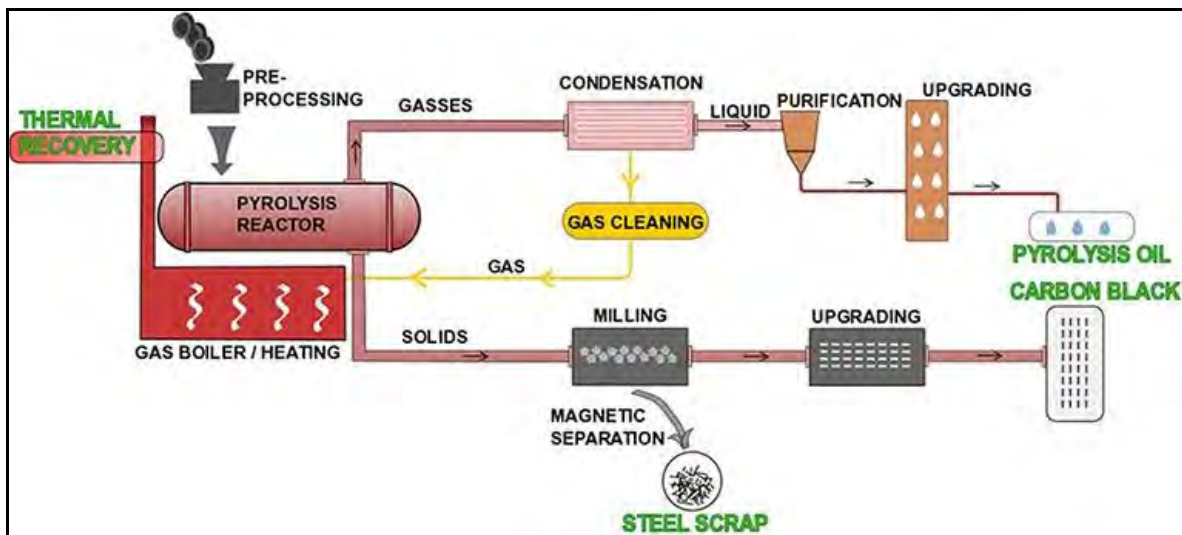


Figura 2.8: Esquema simplificado del proceso de pirólisis.

Fuente: adamatic.fi

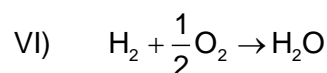
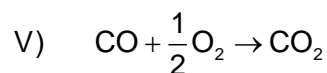
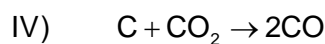
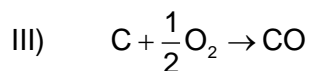
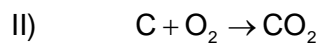
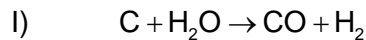
El producto líquido, que es una mezcla entre parafinas, alquenos y compuestos aromáticos, tiene un GCV (gross calorific value, cuya traducción es valor calorífico bruto) entre 41-44 MJ/kg, lo que lo hace un potente reemplazante de los combustibles líquidos tradicionales. El producto gaseoso tiene un GHV entre 30-40 MJ/Nm<sup>3</sup>, siendo suficiente para cumplir con los requisitos del sistema. La distribución de estos productos tiene estricta relación con la temperatura utilizada en el proceso, ya que bajas temperaturas

favorecen la producción del líquido y las altas favorecen al gas. Los problemas relacionados a esta tecnología son el alto costo de la planta y el tratamiento a los residuos. (Muzenda, 2014)

### Gasificación

Este proceso es similar al anterior, la diferencia principal está en que la pirólisis se realiza en un ambiente libre de oxígeno y necesita de una fuente de calor externa, en cambio, la gasificación utiliza el oxígeno para obtener una combustión parcial de la materia prima y no necesita aportes externos para su funcionamiento. La gasificación también favorece la producción del gas de síntesis (SYNGAS), constituido principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. Se trabaja con temperaturas altas (973-1.673 K) y se busca hacer reaccionar el carbono del neumático con oxígeno, hidrógeno o vapor de agua para aumentar la producción de H<sub>2</sub> y CO en el SYNGAS.

Algunas de las reacciones típicas que ocurren producto de la gasificación del carbón son las siguientes:



La elección del agente gasificante influirá en los costos del proceso y en la calidad del gas de síntesis: Con aire se puede obtener un poder calorífico entre 4-10 MJ/Nm<sup>3</sup>, con oxígeno entre 10-15 MJ/Nm<sup>3</sup> y con hidrógeno entre 25-30 MJ/Nm<sup>3</sup>. El gas de síntesis producido

puede almacenarse, transportarse o alimentarse directamente a calderas o cámaras de combustión existentes, que en cuyo caso necesitarían leves modificaciones. (Muzenda, 2014)

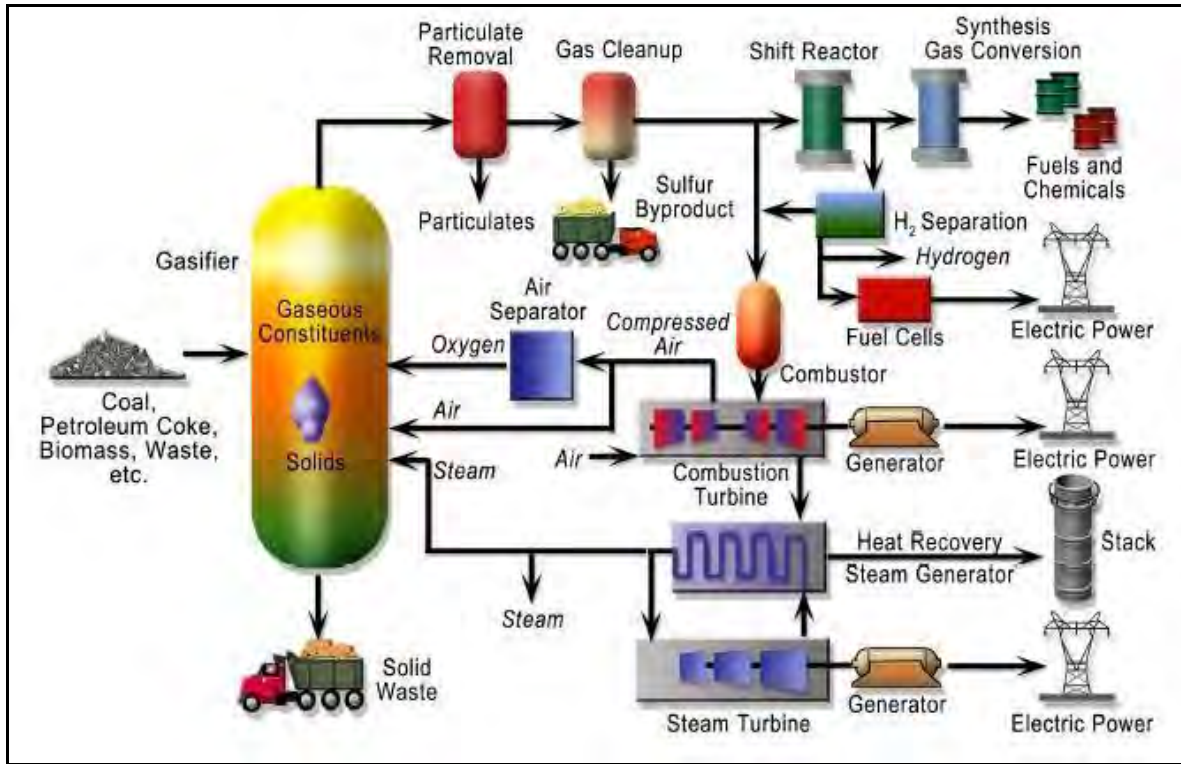


Figura 2.9: Proceso de Gasificación.

Fuente: ocw.mit.edu

### Comparación entre Incineración, Pirólisis y Gasificación

A modo resumen, y para facilitar la comparación, se presenta la tabla 2.6, donde se consideran los requerimientos básicos y los productos generados para estos tres tratamientos térmicos.

En cuanto al impacto ambiental que pueden generar estos procesos, la mayor preocupación viene dada por las emisiones de gases a la atmósfera, tales como óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, dioxinas y furanos, gases de hidrocarburos, metales, dióxido

de carbono y material particulado, por lo que cualquier instalación que cuente con alguno de estos tratamientos requiere sistemas y estrategias para controlar dichas emisiones.

Tabla 2.6: Requerimientos y productos para los tratamientos térmicos.

	<b>Incineración</b>	<b>Pirólisis</b>	<b>Gasificación</b>
Requerimiento oxígeno	Mayor al estequiométrico	No requiere	Menor al estequiométrico
Gas reactivo	Aire	No requiere	Aire, oxígeno puro, vapor, hidrógeno
Temperatura (K)	1.073 – 1.723	673 – 1.073	1.073 – 1.673
Producto gaseoso	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O y otros hidrocarburos	CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>
Producto líquido	No aplica	Aceite similar al diesel	Fracción condensable de alquitrán y hollín
Producto sólido	Cenizas y escoria	Cenizas, coque y acero	Negro de carbón, cenizas de fondo (escoria vítrea) y acero
GHV del producto gas (MJ/kg)	El gas no tiene fines energéticos	44,6	50,2

Fuente: Realizado en base a Muzenda, 2014; Helsen L., & Bosmans A., 2010; y Sahim O., & Kirim Y.

Para el caso de los residuos, en la pirólisis y la gasificación se obtiene una ceniza inorgánica, que corresponde entre un 3% y 5% del material inorgánico del neumático que no puede transformarse a energía. Esta ceniza contiene metales traza no volátiles, las que requieren de un manejo adecuado antes de la eliminación. Otro residuo proveniente de estas dos tecnologías es el negro de carbón, el cual se obtiene de la combustión incompleta de hidrocarburos. Se compone casi exclusivamente de carbón elemental, mayor al 97%. Contiene también hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), pero en un bajo porcentaje (<1%). El negro de carbón se usa como pigmento y refuerzo en los neumáticos, pudiendo ser utilizado también en tintas de impresión y pinturas (ICBA,

2016). En cuanto al residuo carbonoso, este contiene azufre, óxido de zinc, rellenos de arcilla, carbonatos de calcio y magnesio y silicatos. Este residuo puede ser un gran problema de eliminación si no existe un mercado que lo desarrolle. Para su eliminación se deben usar contenedores de acero para evitar emisiones fugitivas durante el transporte y la disposición final. (Muzenda, 2014)

A modo comparativo también se presenta la figura 2.10 a continuación, donde se tiene un reactor térmico y cuatro corrientes, dos de entrada y dos de salida. En esta imagen se muestra el balance másico para una alimentación de 100 toneladas de neumáticos fuera de uso al día. La masa de los productos de salida dependen del tratamiento térmico que se le brinda al neumático, donde la letra P es para pirólisis y la G para gasificación. Cabe mencionar, que el autor realizó estas estimaciones usando valores promedio en base a la información recabada dentro de su estudio, y se sabe que la industria es altamente variable, por lo que una instalación en particular podría resultar bastante diferente.

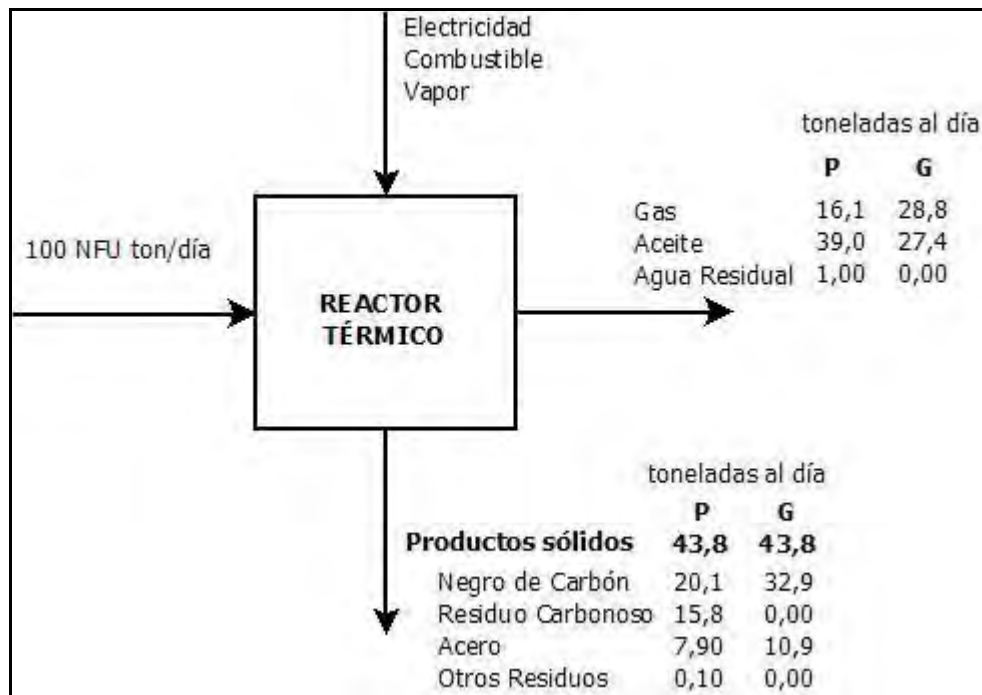


Figura 2.10: Balance de masa típico de los procesos pirólisis y gasificación.

Fuente: CalRecovery, Inc.

### **3.PROBLEMÁTICA**

En Chile la generación de neumáticos fuera de uso (NFU) en los últimos años ha superado las 120.000 toneladas. En la mayoría de los casos, estos neumáticos terminan en vertederos informales, lo que trae consecuencias ambientales relacionadas a la acumulación descontrolada de residuos. Con la Ley 20.920 se espera que la cantidad de NFU disminuya y que se le pueda otorgar una gestión adecuada a estos residuos. Un año antes a la publicación de esta Ley, el Ministerio de Energía publicó una estrategia para que Chile se convierta en un país abierto al desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías para el sector energético, buscando también que la energía se genere de manera compatible con el ambiente. Este trabajo busca entregar antecedentes técnicos de una potencial solución al problema de los residuos por medio del diseño de una planta de gasificación para el rubro de la minería que sea capaz de transformar los neumáticos mineros usados en energía y así convertir su proceso más sustentable y eficiente energéticamente.

## **4.OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Diseñar una planta de valorización energética de neumáticos mineros fuera de uso.

### **4.2. Objetivos específicos**

1. Estimar la generación de neumáticos mineros fuera de uso en Chile.
2. Seleccionar una ubicación factible de aceptar la operación de una planta de valorización de neumáticos.
3. Calcular a nivel conceptual una planta de valorización energética de neumáticos por medio de la gasificación.
4. Determinar la factibilidad económica del diseño de la planta.

## 5.METODOLOGÍA

### 5.1. Estimación de la generación de neumáticos mineros fuera de uso en Chile.

La estimación de neumáticos mineros fuera de uso se realizó en base a las toneladas métricas finas (TMF) producidas por las mineras en el país en un determinado año, similar a la metodología utilizada por Gescam S.A. (punto 2.4.3.1 del presente documento). Se utilizaron las toneladas métricas finas por corresponder a un dato que los productores y empresas mineras presentan a las instituciones relacionadas con el Ministerio de Minería, con el propósito de transparentar el rubro, por lo que este dato existe y es de acceso público.

Para la estimación se utilizó el Anuario de la Minería 2017 de SERNAGEOMIN. Este documento presenta estadísticas para cada región que posee actividad minera y menciona los principales yacimientos en explotación, por lo cual se identificaron los minerales con mayor producción durante el año 2017, las regiones de donde provienen y los yacimientos involucrados para confeccionar una tabla, como la que se muestra en la tabla 5.1, cuyo objetivo fue determinar la producción de toneladas métricas finas por yacimiento para el año 2017. Para esto se utilizó el Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017 de COCHILCO, en conjunto con las páginas web de aquellas empresas que explotan el yacimiento identificado en búsqueda de informes de producción.

Tabla 5.1: Estructura de tabla a confeccionar para TMF 2017.

REGIÓN					
Empresa Minera	Yacimiento	Recurso Principal	Provincia	Comuna	TMF 2017

La tabla 5.1 se completó como sigue:

- a) **Región:** En letra mayúscula se colocó el nombre de la Región.
- b) **Empresa Minera:** Se colocó el nombre de la empresa.
- c) **Yacimiento:** El nombre del yacimiento que explota la empresa.
- d) **Recurso Principal:** El o los minerales que se producen principalmente.
- e) **Provincia:** La Provincia a la que pertenece el yacimiento.
- f) **Comuna:** La comuna a la que pertenece el yacimiento.
- g) **TMF 2017:** Se colocaron las toneladas de material fino producidos del recurso principal del yacimiento durante el año 2017.

Con las toneladas métricas finas identificadas se procedió a estimar la generación de neumáticos mineros para el año 2017. Para esto se revisaron proyectos ingresados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental en búsqueda de la generación de neumáticos (toneladas al año) que se generan en los yacimientos seleccionados de la tabla anterior. Los valores obtenidos por cada proyecto se dividieron con las toneladas de material fino producidos en aquel yacimiento durante el año anterior a la Declaración o Estudio de Impacto Ambiental de dicho proyecto. Luego se calculó un promedio entre estos valores, para obtener el factor de neumáticos mineros usados por tonelada métrica fina y se construyó otra tabla, cuya plantilla se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Estructura de tabla para estimación de NMFU.

REGIÓN					
Yacimiento	Comuna	NMFU 2017 (ton/año)	NMFU 2018 (ton/año)	NMFU 2019 (ton/año)	NMFU 2020 (ton/año)

La tabla 5.2 se debió completar de la siguiente manera:

- a. **Región:** En letra mayúscula se colocó el nombre de la Región.
- b. **Yacimiento:** Se colocó el nombre del yacimiento identificado en la tabla anterior.
- c. **Comuna:** La comuna a la que pertenece el yacimiento.
- d. **NMFU 2017:** Para completar esta columna se multiplicó el factor de NMFU calculado con las toneladas de material fino determinadas de la tabla anterior.
- e. **NMFU 2018:** El valor obtenido del inciso anterior se multiplicó con el PIB proyectado para el año 2018.
- f. **NMFU 2019:** El valor obtenido del inciso f. se multiplicó con el PIB proyectado para el año 2019. Se realizó lo mismo para el inciso siguiente.

Se consideró que la construcción de la planta durará no más de dos años, por lo que durante el segundo semestre del año 2020 debiese comenzar su operación. La estimación de neumáticos usados se calculó hasta aquel año y se consideró que la planta cubrirá un 40% de la demanda proyectada para la provincia seleccionada. Las proyecciones del PIB se obtuvieron del Banco Central.

## **5.2. Selección de una ubicación factible de aceptar la operación de una planta de valorización de neumáticos.**

Del punto anterior se identificó la comuna que genera la mayor cantidad de neumáticos mineros como residuos y se revisó la bibliografía relacionada a la planificación territorial en búsqueda de zonas que permitan la instalación de actividades productivas del tipo industrial, como lo son los Planes Reguladores Comunes y los Planos Seccionales. De esta revisión se obtuvieron las alternativas de localización de la planta.

Para facilitar la selección de la alternativa se utilizó la metodología presentada en la guía para el diseño de rellenos de seguridad de América Latina del Centro Panamericano de

Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), para lo cual fue necesario también identificar zonas SNASPE, mineras, quebradas, carreteras, áreas urbanas, ríos, lagos y las características geomorfológicas que posee la comuna seleccionada. Los criterios a evaluar fueron los siguientes:

- a) Distancia a áreas urbanas.
- b) Conexión con carreteras.
- c) Distancia a aguas superficiales.
- d) Aspectos geomorfológicos.
- e) Distancia con áreas de protección de biodiversidad.
- f) Otros usos territoriales e infraestructura.

Tabla 5.3: Modelo para la confección de valorización de las alternativas.

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa A</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Alternativa C</b>
Distancia a áreas urbanas			
Conexión con carreteras			
Distancia a aguas superficiales			
Aspectos geomorfológicos			
Distancia con áreas de protección de biodiversidad			
Otros usos territoriales e infraestructura			
<b>Total</b>			

Se confeccionó una tabla cuyas columnas corresponden al criterio y las diferentes alternativas, como se muestra en la tabla 5.3. A cada alternativa se le otorgó un valor, el que puede ser 3, 2 o 1, dependiendo de cuan apta sea con respecto al criterio a evaluar. Para esto se utilizó la matriz que se muestra en la tabla 5.4 y se sumaron los valores de

forma vertical. La alternativa seleccionada fue la que obtuvo el valor mayor. De haber obtenido un empate, la alternativa a seleccionar hubiese sido aquella que permitiese la ampliación de la planta.

Tabla 5.4: Matriz para otorgar valores a las alternativas seleccionadas.

<b>Valor</b> <b>Criterio</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Distancia a áreas urbanas</b>	No existen viviendas en una distancia menor a 500 m.	Viviendas individuales a una distancia menor a 500 m.	*Áreas residenciales en una distancia menor a 500 m. *Viviendas individuales a una distancia menor a 200 m.
<b>Conexión con carreteras</b>	Conexión a carreteras conectadas a faenas mineras sin pasar por localidades.	Conexión a carreteras sin pasar por localidades.	Conexión que pasa por localidades o con limitaciones de uso.
<b>Distancia a aguas superficiales</b>	Mayor a 5 km.	Entre 3 y 5 km.	Menor a 3 km.
<b>Aspectos geomorfológicos</b>	Sin presencia de aspectos geomorfológicos y con una distancia mayor a 500 m de éste.	Sin presencia de aspectos geomorfológicos y con una distancia menor a 500 m de éste.	Con presencia de aspectos geomorfológicos.
<b>Distancia con áreas de protección de biodiversidad</b>	Mayor a 5 km.	Entre 3 y 5 km.	Menor a 3 km.
<b>Otros usos territoriales e infraestructura</b>	*Se permite la construcción completa de la planta. *Se cuenta con servicios básicos.	*Se permite parcialmente la construcción de la planta. *Se cuenta con servicios básicos.	*Se permite parcialmente la construcción de la planta. *No se cuenta con servicios básicos.

### **5.3. Cálculo a nivel conceptual de una planta de valorización energética de neumáticos mineros**

Para el diseño conceptual de la planta se tomó como base el diseño de plantas existentes que trabajan con el proceso de gasificación y que utilizan residuos sólidos como materia prima para generar electricidad junto con proyectos similares presentados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, con el fin de crear un diagrama de flujo con las principales entradas y salidas de la planta. En conjunto, el diseño final consideró determinar los siguientes elementos:

- Balance de masa y energía.
- Tratamiento mecánico hacia los neumáticos, previo al ingreso hacia el reactor.
- Almacenamiento y flujo del transporte de los neumáticos.
- Almacenamiento y eliminación de los residuos provenientes del proceso.

Para el balance de masa se consideró como entrada al proceso la cantidad de neumáticos mineros que se obtuvo de la proyección estimada del punto 5.1 de este documento. Las salidas del balance corresponden a los residuos que se generan por la gasificación de estos neumáticos, cuyas cantidades se utilizaron para determinar las dimensiones de las bodegas para almacenamiento de estos residuos. Por otro lado, el balance de energía se realizó para conocer la cantidad de energía eléctrica que es posible generar de la gasificación de los neumáticos que entren al proceso. Para esto se utilizaron las reacciones de gasificación típicas del carbón.

Fue necesario considerar y determinar los equipos involucrados para el tratamiento mecánico previo al ingreso al reactor térmico para aumentar la eficiencia del proceso y evitar posibles daños al reactor, así como también, definir los equipos para la generación de energía y para el tratamiento a la salida del reactor. Para esto se revisaron proyectos y tesis de pregrado relacionados al tratamiento de neumáticos.

Para la bodega de almacenamiento de neumáticos mineros se revisaron páginas web de productores de estos neumáticos en el país para obtener un peso promedio de los neumáticos de aro entre 49-63 pulgadas y así determinar el número de neumáticos que entrará a la planta y el período de tiempo que se almacenarán. También se revisaron páginas web para el almacenamiento de los residuos provenientes del proceso, en búsqueda de contenedores cuya capacidad y material sea suficiente para contener el residuo en cuestión, posteriormente se revisó el Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas del Ministerio de Salud para determinar el área de la bodega y el flujo de transporte necesario para no sobrepasar su capacidad.

#### **5.4. Factibilidad económica del diseño de la planta.**

Los cálculos de factibilidad económica del diseño de la planta se realizaron para un horizonte de 20 años y se consideró la operación, construcción y mantenimiento de ésta.

Se cotizaron los costos por equipo mediante páginas web de proveedores y se revisaron proyectos similares para identificar y estimar costos asociados a recursos básicos, herramientas y artículos para la mantención, entre otros. Para los costos asociados a la inversión inicial se utilizó el Método de Chilton. Se construyeron flujos de caja para tres escenarios distintos (optimista, realista y pesimista), los cuales variaron en la tasa de interés bancaria.

Los indicadores económicos que ayudaron a determinar la viabilidad del diseño fue el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el *payback* (período de recuperación de la inversión).

## 6.RESULTADOS

### 6.1. Estimación de la generación de neumáticos mineros fuera de uso en Chile.

El Anuario de la Minería 2017 de SERNAGEOMÍN presenta por regiones las principales faenas y yacimientos actualmente en explotación. De este documento se identificó que las seis regiones con mayor producción de mineral metálico fueron la Región de Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo y Libertador Bernardo O'Higgins, como se puede ver en la tabla 6.1. Por este motivo y por falta de datos puntuales el resto de las regiones no se consideraron para los cálculos de estimaciones.

Tabla 6.1: Producción en toneladas métricas finas para el año 2017 por región.

Región	Cobre	Molibdeno	Oro	Plata	Hierro	Plomo	Zinc
Arica	415	-	-	-	-	-	-
Tarapacá	613.554	2.894	-	-	-	-	-
Antofagasta	2.897.266	33.637	18,48	787,13	-	-	-
Atacama	511.390	1.736	8,76	135,12	8.507.361	-	-
Coquimbo	474.101	10.595	5,48	110,11	1.041.966	329	442
Valparaíso	288.076	4.365	0,69	78,48	-	-	-
Metropolitana	308.255	2.323	2,87	74,32	-	-	8.585
Lib. Bernardo O'Higgins	464.548	6.904	1,06	102,76	-	-	-
Aysén	359	-	0,57	30,66	-	1.233	19.981

Fuente: Anuario de la Minería 2017, SERNAGEOMIN

La revisión del Anuario de Estadísticas de COCHILCO reveló datos de toneladas métricas finas por empresas sólo para el mineral de cobre y molibdeno, por lo que estos minerales fueron considerados para la estimación de neumáticos usados. Sin embargo, en la tabla 6.1 se muestra que el mineral con mayor toneladas de producción es el hierro, lo que hizo necesario considerarlo de igual forma para los cálculos. Otros minerales, como la plata y el oro, presentes en la mayoría de las regiones, provienen de la minería enfocada a esos minerales y son también un subproducto de la gran minería del cobre. En cuanto a la

producción sectorial, no se consideraron estos metales por falta de información basada en la producción por empresa. Con esto en consideración se elaboró la tabla 6.2 para los minerales cobre, molibdeno y hierro, por las razones mencionadas en el párrafo anterior. Posteriormente se identificaron los principales yacimientos de las regiones mencionadas al inicio de este capítulo y se completó la tabla 6.2 con los datos del Anuario de Estadísticas de COCHILCO. Para aquellas empresas que poseían más de un yacimiento el valor del Anuario fue dividido, en cambio, para aquellas que no aparecían en el Anuario se estimó un valor de toneladas métricas finas por yacimiento en base a la tabla 6.1. De todos modos, estas consideraciones en detalle se muestran al pie de la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Toneladas de material fino por yacimiento para el año 2017.

<b>REGIÓN DE TARAPACÁ</b>					
<b>Empresa</b>	<b>Yacimiento</b>	<b>Recurso Principal</b>	<b>Provincia</b>	<b>Comuna</b>	<b>TMF 2017</b>
Cía. Minera Cerro Colorado Ltda.	Cerro Colorado	Cobre	Tamarugal	Pozo Almonte	62.200
Cía. Minera Doña Inés de Collahuasi	Rosario	Cobre, Molibdeno	Tamarugal	Pica	526.893
Cía. Mra. Teck Quebrada Blanca	Quebrada Blanca	Cobre	Tamarugal	Pica	23.400
<b>REGIÓN DE ANTOFAGASTA</b>					
<b>Empresa</b>	<b>Yacimiento</b>	<b>Recurso Principal</b>	<b>Provincia</b>	<b>Comuna</b>	<b>TMF 2017</b>
El Abra	El Abra	Cobre	El Loa	Calama	78.400
CODELCO	Radomiro Tomic	Cobre, molibdeno	El Loa	Calama	327.529
CODELCO	Chuquicamata	Cobre, molibdeno	El Loa	Calama	339.529
CODELCO	Ministro Hales	Cobre	El Loa	Calama	215.100
Cía. Minera Mantos de la Luna	Mantos de la Luna	Cobre	Tocopilla	Tocopilla	7.400
Minera Antucoya Ltda.	Mina Antucoya	Cobre	Tocopilla	María Elena	80.500
Cía. Minera Spence	Mina Spence	Cobre	Antofagasta	Sierra Gorda	198.600

Continuación tabla 6.2: Toneladas de material fino por yacimiento para el año 2017.

REGIÓN DE ANTOFAGASTA					
Empresa	Yacimiento	Recurso Principal	Provincia	Comuna	TMF 2017
Sierra Gorda SCM	Mina Sierra Gorda	Cobre, molibdeno	Antofagasta	Sierra Gorda	118.275
Minera Centinela	Mina Centinela Oxido	Cobre	Antofagasta	Sierra Gorda	64.500
Minera Centinela	Mina Centinela Sulfuro	Cobre	Antofagasta	Sierra Gorda	163.800
CODELCO	Mina Gabriela Mistral	Cobre	Antofagasta	Sierra Gorda	122.700
Lomas Bayas	Lomas Bayas	Cobre	Antofagasta	Sierra Gorda	78.000
Mantos Copper S.A.	Mantos Blancos	Cobre	Antofagasta	Antofagasta	43.724
Cía. Minera Zaldívar SPA	Zaldívar	Cobre	Antofagasta	Antofagasta	103.300
Minera Escondida Ltda.	Escondida	Cobre	Antofagasta	Antofagasta	925.400
Soc. Contractual Minera Franke	Mina Franke	Cobre	Antofagasta	Taltal	19.600
REGIÓN DE ATACAMA					
Empresa	Yacimiento	Recurso Principal	Provincia	Comuna	TMF 2017
CODELCO	Mina Quebrada M	Cobre, Molibdeno	Chañaral	Diego de Almagro	62.854
Mantos Copper S.A.	Manto Verde	Cobre	Chañaral	Chañaral	44.076
C.M. del Pacifico S.A.	Cerro Negro Norte	Hierro	Copiapó	Copiapó	_(1)
Sociedad Minera Candelaria Ltda.	Monte Carmelo Pm	Cobre	Copiapó	Copiapó	30.060 <sup>(4)</sup>
C.C.M. Ojos del Salado	Alcaparroza	Cobre	Copiapó	Tierra Amarilla	13.550 <sup>(3)</sup>
C.C.M. Ojos del Salado	Santos	Cobre	Copiapó	Tierra Amarilla	13.550 <sup>(3)</sup>
Soc. Minera Punta del Cobre	Punta del Cobre	Cobre	Copiapó	Tierra Amarilla	37.000
Soc. Contractual Minera Atacama Kozan	Atacama Kozan	Cobre	Copiapó	Tierra Amarilla	10.100

Continuación tabla 6.2: Toneladas de material fino por yacimiento para el año 2017.

REGIÓN DE ATACAMA					
Empresa	Yacimiento	Recurso Principal	Provincia	Comuna	TMF 2017
Sociedad Minera Candelaria Ltda.	Candelaria	Cobre	Copiapó	Tierra Amarilla	120.240 <sup>(4)</sup>
Minera Lumina Copper Chile Ltda.	Caserones	Cobre, Molibdeno	Copiapó	Tierra Amarilla	123.682
C.M. del Pacífico S.A.	Mina Los Colorados	Hierro	Huasco	Vallenar	_(1)
REGIÓN DE COQUIMBO					
Empresa	Yacimiento	Recurso Principal	Provincia	Comuna	TMF 2017
C.M. del Pacífico S.A.	El Romeral	Hierro	Elqui	La Serena	_(1)
Cía. Minera Talcuna Ltda.	Mina Coca Cola	Cobre	Elqui	Vicuña	107.009 <sup>(2)</sup>
Compañía Minera La Reserva Ltda.	Mina Tambor	Cobre	Elqui	Vicuña	107.009 <sup>(2)</sup>
Tambillos Servicios Mineros S.A.	Mina Florida	Cobre	Elqui	Coquimbo	107.009 <sup>(2)</sup>
Cía. Minera Carmen de Andacollo	Carmen de Andacollo	Cobre	Elqui	Andacollo	76.000
Minera Altos de Punitaqui	Cinabrio	Cobre	Limarí	Ovalle	107.009 <sup>(2)</sup>
S.C.M. Tres Valles	Papomono	Cobre	Choapa	Salamanca	5.900
Minera Los Pelambres	Mina Los Pelambres	Cobre, Molibdeno	Choapa	Salamanca	363.897
REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS					
Empresa	Yacimiento	Recurso Principal	Provincia	Comuna	TMF 2017
CODELCO	El Teniente	Cobre, Molibdeno	Cachapoal	Machalí	471.218
Minera Valle Central S.A.	Planta Molibdeno	Cobre, Molibdeno	Cachapoal	Requínoa	952

<sup>(1)</sup> Valor no encontrado. La estimación de NMFU para este caso se explica en el siguiente párrafo.

<sup>(2)</sup> Valores que se calcularon en base a la diferencia del total por región de la tabla 6.1, divididos en proporciones iguales. Esto sobrestima la producción para aquellas mineras, sin embargo, por encontrarse en comunas diferentes no afectará el resultado final.

<sup>(3)</sup> La cifra obtenida para la empresa, proveniente del Anuario de COCHILCO, se dividió para cada yacimiento.

<sup>(4)</sup> La cifra obtenida para la empresa se dividió en consideración al yacimiento. Se consideró un 80% para Candelaria por ser a rajo abierto y el resto para Monte Carmelo que es mina subterránea.

Como el hierro producido en el país proviene principalmente de la empresa Compañía Minera del Pacífico S.A. (CAP Minería), se revisó la Memoria Anual del año 2017 de dicha empresa. De este documento se identificó que la Mina Los Colorados tuvo un mayor movimiento de materiales, luego le prosiguió el yacimiento Cerro Negro y posteriormente Minas El Romeral, lo que significa que la generación de neumáticos usados para dicho año debe ser mayor para Los Colorados. Para una estimación razonable de neumáticos provenientes de este yacimiento se revisó el proyecto “EIA Ampliación y Mejoras Operacionales en Mina Los Colorados” ingresado el año 2009 al SEIA y aprobado el 2012. De este proyecto se obtiene que se generarán 141 neumáticos al año, por ende, la generación de neumáticos para Mina Los Colorados, Cerro Negro y Minas El Romeral se estableció en 141, 100 y 80 al año, respectivamente, para la realización de los cálculos, como se detalla en la tabla 6.6.

Para el factor de generación de neumáticos mineros usados por tonelada métrica fina se revisó la página web del Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, siendo los proyectos mineros que lograron rescatarse los siguientes:

- “Sistemas de Disposición de Neumáticos Usados de Equipos Mineros” de Minera Escondida Limitada, ingresado el 2002.
- “Disposición de neumáticos mediante confinamiento en depósitos de lastre” de Codelco División Chuquicamata, ingresado el 2006.
- “Proyecto continuidad operacional Cerro Colorado” de Compañía Minera Cerro Colorado Ltda, ingresado el 2013.

Los neumáticos mineros fuera de uso generados en esos proyectos, al igual que las toneladas de material fino, siendo el cobre el principal mineral para las tres empresas, se indican en la tabla 6.3, dando un factor de generación de neumáticos usados por tonelada métrica fina anual de aproximadamente 0,003817. Para los neumáticos se utilizó un peso promedio de 3,14 toneladas y se consideró un desgaste de un 16% en peso cuando el

neumático termina su vida útil, por lo que el peso promedio para los cálculos fue de 2,64 toneladas por cada neumático. Esto provino de la construcción de la tabla 6.4, la que se confeccionó mediante la revisión de catálogos de neumáticos del tipo OTR.

Tabla 6.3: Cálculo del factor de generación de neumáticos mineros usados.

Empresa	TMF	NMFU (unidad/año)	NMFU (ton/año)	Factor (NMFU/TMF)
Codelco Norte	964.900	960	2536,0128	0,002628265
Minera Escondida	794.100	1020	2694,5136	0,003393167
C.M. Cerro Colorado Ltda.	73.100	227	599,66136	0,008203302
Minera Michilla	51.800	-	54	0,001042471
			<b>Promedio:</b>	<b>0,003816801</b>

Fuente: Comisión Chilena del Cobre, GescamS.A. y Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental.

Tabla 6.4: Dimensiones y pesos de algunos neumáticos tipo OTR.

Tamaño	Diámetro (m)	Ancho (m)	Masa (kg)
53/80R63	3,78	1,338	4.568
52/80-57	3,579	1,321	4.651
50/90R57	3,809	1,266	4.636
50/65-51	3,061	1,306	3.574
27.00R49	2,65	0,75	1.378
45/65R45	2,7	1,147	2.000
37.5R39	2,525	0,983	1.207
Promedio:			3.144,9
<b>16% desgaste por uso:</b>			<b>2.641,7</b>

Fuente: heuver.com

De esta manera se estimaron los neumáticos mineros usados de los principales yacimientos identificado en base a la producción de mineral durante el año 2017. Posteriormente, la proyección para los siguientes años se calculó con el Producto Interno Bruto. En este caso se utilizó el valor intermedio de la proyección entregada por el Banco Central en Marzo del 2018 y los siguientes años.

El valor utilizado para cada año se muestra en la tabla 6.5 y la estimación junto con la proyección de los neumáticos mineros fuera de uso por yacimiento se presentan en la tabla 6.6.

Tabla 6.5: Valores del PIB considerados para la proyección.

Año	PIB Proyectado (%)	PIB utilizado (%)
2018	3-4	3,50
2019	3,25-4,25	3,75
2020	3-4	3,50

Fuente: Banco Central en Marzo 2018.

Tabla 6.6: Estimación y proyección de neumáticos mineros fuera de uso.

REGIÓN DE TARAPACÁ					
Yacimiento	Comuna	NMFU 2017 (ton/año)	NMFU 2018 (ton/año)	NMFU 2019 (ton/año)	NMFU 2020 (ton/año)
Cerro Colorado	Pozo Almonte	237,41	245,71	254,93	263,85
Rosario	Pica	2.011,05	2.081,43	2.159,49	2.235,07
Quebrada Blanca	Pica	89,31	92,44	95,91	99,26
REGIÓN DE ANTOFAGASTA					
Yacimiento	Comuna	NMFU 2017 (ton/año)	NMFU 2018 (ton/año)	NMFU 2019 (ton/año)	NMFU 2020 (ton/año)
El Abra	Calama	299,24	309,71	321,32	332,57
Radomiro Tomic	Calama	1.250,11	1.293,87	1.342,38	1.389,37
Chuquicamata	Calama	1.295,91	1.341,27	1.391,57	1.440,27
Ministro Hales	Calama	820,99	849,73	881,59	912,45
Mantos de la Luna	Tocopilla	28,24	29,23	30,33	31,39
Mina Antucoya	María Elena	307,25	318,01	329,93	341,48

Continuación tabla 6.6: Estimación y proyección de neumáticos mineros fuera de uso.

<b>REGIÓN DE ANTOFAGASTA</b>					
<b>Yacimiento</b>	<b>Comuna</b>	<b>NMFU 2017 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2018 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2019 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2020 (ton/año)</b>
Mina Spence	Sierra Gorda	758,02	784,55	813,97	842,46
Mina Sierra Gorda	Sierra Gorda	451,43	467,23	484,75	501,72
Mina Centinela Oxido	Sierra Gorda	246,18	254,80	264,36	273,61
Mina Centinela Sulfuro	Sierra Gorda	625,19	647,07	671,34	694,84
Mina Gabriela Mistral	Sierra Gorda	468,32	484,71	502,89	520,49
Lomas Bayas	Sierra Gorda	297,71	308,13	319,69	330,87
Mantos Blancos	Antofagasta	166,89	172,73	179,21	185,48
Zaldívar	Antofagasta	394,28	408,08	423,38	438,20
Escondida	Antofagasta	3.532,07	3.655,69	3.792,78	3.925,53
Mina Franke	Taltal	74,81	77,43	80,33	83,14
<b>REGIÓN DE ATACAMA</b>					
<b>Yacimiento</b>	<b>Comuna</b>	<b>NMFU 2017 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2018 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2019 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2020 (ton/año)</b>
Mina Quebrada M	Diego de Almagro	239,90	248,30	257,61	266,63
Manto Verde	Chañaral	168,23	174,12	180,65	186,97
Cerro Negro Norte	Copiapó	100,00	103,50	107,38	111,14
Monte Carmelo Pm	Copiapó	114,73	118,75	123,20	127,51
Alcaparrosa	Tierra Amarilla	51,72	53,53	55,54	57,48
Santos	Tierra Amarilla	51,72	53,53	55,54	57,48
Punta del Cobre	Tierra Amarilla	141,22	146,16	151,65	156,95
Atacama Kozan	Tierra Amarilla	38,55	39,90	41,40	42,84

Continuación tabla 6.6: Estimación y proyección de neumáticos mineros fuera de uso.

<b>REGIÓN DE COQUIMBO</b>					
<b>Yacimiento</b>	<b>Comuna</b>	<b>NMFU 2017 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2018 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2019 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2020 (ton/año)</b>
Candelaria	Tierra Amarilla	458,93	474,99	492,81	510,06
Caserones	Tierra Amarilla	472,07	488,59	506,91	524,66
Mina Los Colorados	Vallenar	141,00	145,94	151,41	156,71
El Romeral	La Serena	80,00	82,80	85,91	88,91
Mina Coca Cola	Vicuña	408,43	422,73	438,58	453,93
Mina Tambor	Vicuña	408,43	422,73	438,58	453,93
Mina Florida	Coquimbo	408,43	422,73	438,58	453,93
Carmen de Andacollo	Andacollo	290,08	300,23	311,49	322,39
Cinabrio	Ovalle	408,43	422,73	438,58	453,93
Papomono	Salamanca	22,52	23,31	24,18	25,03
Mina Los Pelambres	Salamanca	1.388,92	1.437,53	1.491,44	1.543,64
<b>REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS</b>					
<b>Yacimiento</b>	<b>Comuna</b>	<b>NMFU 2017 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2018 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2019 (ton/año)</b>	<b>NMFU 2020 (ton/año)</b>
El Teniente	Machalí	1.798,55	1.861,49	1.931,30	1.998,90
Planta Molibdeno	Requínoa	3,63	3,76	3,90	4,04

De la tabla 6.6 se observa que la región con más generación de este residuo es Antofagasta. Esto era esperable ya que según la tabla 6.1 fue la región con mayor producción de cobre, molibdeno, oro y plata para el año 2017.

En la tabla 6.7 se presenta la estimación sectorial de neumáticos para el año 2020, donde se aprecia que la provincia con mayor generación corresponde a Antofagasta, luego le siguen El Loa y Tamarugal. La comuna con más generación para el año 2020 es Antofagasta, con 4.549 toneladas. Le siguen Calama con 4.074 toneladas y Sierra Gorda con 3.163 toneladas. De esta misma tabla se creó un mapa temático que se presenta en la figura 6.1.

Tabla 6.7: Estimación sectorial de neumáticos mineros para el año 2020.

Región	Provincia	Comuna	NMFU por Comuna, año 2020 (ton/año)	NMFU por Provincia, año 2020 (ton/año)	NMFU por Región, año 2020 (ton/año)	
Tarapacá	Tamarugal	Pozo Almonte	263,85	2.598,18	2.598,18	
		Pica	2.334,33			
Antofagasta	El Loa	Calama	4.074,66	4.074,66	12.243,86	
	Tocopilla	Tocopilla	31,39	372,87		
		María Elena	341,48			
	Antofagasta	Antofagasta	Sierra Gorda	3.163,98		7.796,33
			Antofagasta	4.549,20		
			Taltal	83,14		
Atacama	Chañaral	Diego de Almagro	266,63	453,59	2.198,42	
		Chañaral	186,97			
	Copiapó	Copiapó	238,65	1.588,12		
		Tierra Amarilla	1.349,47			
	Huasco	Vallenar	156,71	156,71		
Coquimbo	El Elqui	La Serena	88,91	1.773,09	3.770,66	
		Vicuña	907,86			
		Coquimbo	453,93			
		Andacollo	322,39			
	Limarí	Ovalle	453,93	453,93		
	Choapa	Salamanca	1.543,64	1.543,64		
Lib. Bernardo O'Higgins	Cachapoal	Machalí	1.998,90	2.002,93	2.002,93	
		Requínoa	4,04			

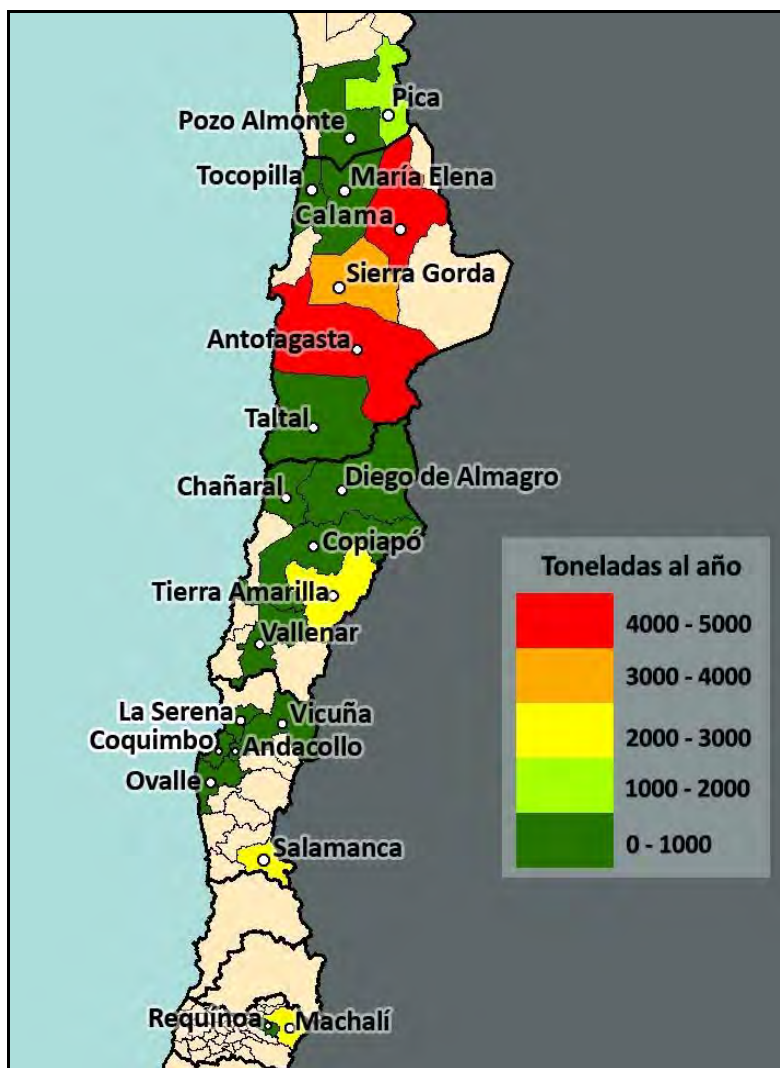


Figura 6.1: Mapa de la proyección de las toneladas de NMFU por comuna para el año 2020.

Es así como el sector seleccionado para la ubicación de la planta corresponde a la comuna de Antofagasta. De la tabla 6.7 se obtiene que el 40% del total de neumáticos estimados que se generarán en la provincia de Antofagasta para el año 2020 es de 3.119 toneladas, siendo esta la demanda que satisfará la planta.

## 6.2. Selección de la ubicación para el diseño de la planta.

### 6.2.1. Descripción y localización de las alternativas a evaluar

Para determinar las alternativas de ubicación que puedan permitir la operación de la planta dentro de la comuna de Antofagasta, se revisó el Plan Regulador Comunal (PRC), el cual es un instrumento territorial que regula las construcciones en el área urbana, otorgando diferentes perfiles de uso a los sectores, es decir, qué actividades podrán realizarse en el área. Este documento permite las actividades del tipo industrial dentro de la zona de áreas consolidadas y las zonas urbanizables de desarrollo condicionado. El perfil de uso para ambas zonas se detalla en la tabla 6.8 y la zonificación comprendida en el mencionado instrumento territorial se presenta en la figura 6.2.

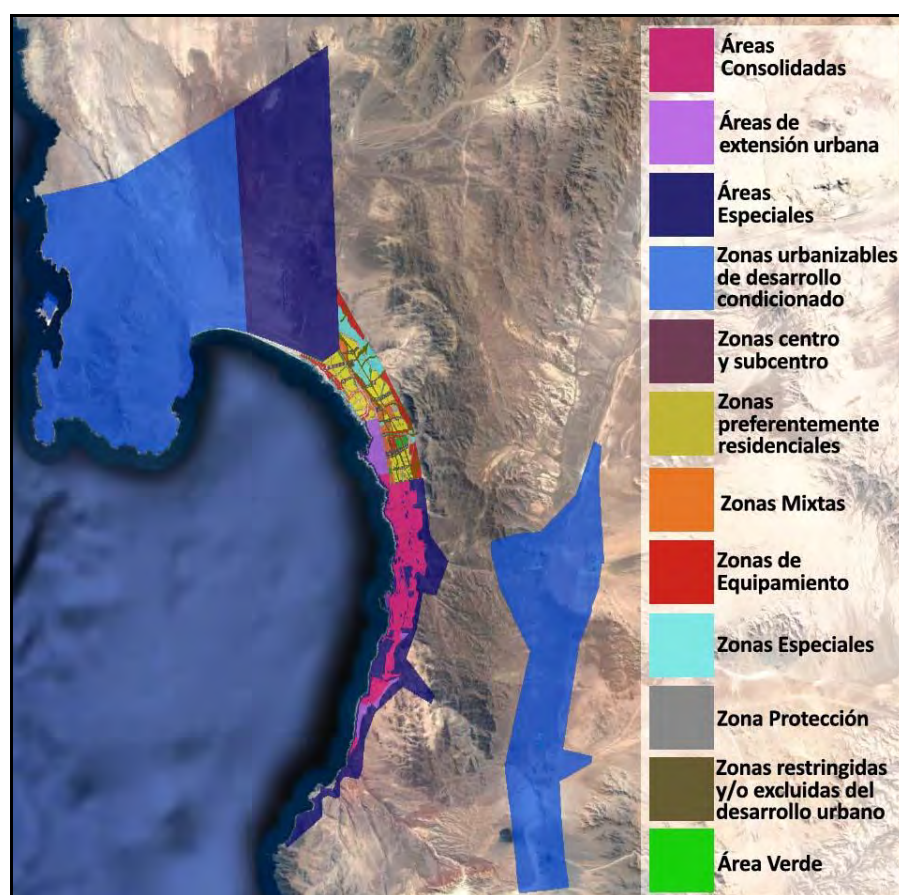


Figura 6.2: Zonificación del Plan Regulador Comunal de Antofagasta.

De esta figura se puede apreciar que las áreas consolidadas se centran en el corazón de la ciudad, en contraste a las zonas urbanizables de desarrollo condicionado. En cuanto a la tabla 6.8, se rescata que las zonas específicas que permiten actividades del tipo industrial son la C7 y la ZUDC 09, por esta razón, ambas zonas son consideradas como alternativas a ser evaluadas mediante los criterios mencionados en la sección 5.2 del presente documento.

Tabla 6.8: Perfiles de uso por zona en el Plan Regulador Comunal de Antofagasta.

Zonificación	Zona	Perfil de uso
Áreas Consolidadas	CC	Zona centro cívico
	C1a	Centro Institucional y comercial
	C1b	Sub centro urbano
	C1c	Sub centro equipamiento regional
	C1d	Sub centro turístico comunal
	C2	Barrios costeros de alta densidad
	C3	Barrios costeros de densidad media
	C4	Habitacional
	C5	Habitacional
	C6	Habitacional
	C7	Industrial
	C7a	Mixta
	C8	Habitacional
	C9	Habitacional
Zonas Urbanizables de Desarrollo Condicionado	ZUDC 01	Recintos portuarios prescindibles
	ZUDC 02	Recintos ferroviarios
	ZUDC 03	Recintos ferroviarios
	ZUDC 04	Zona de reserva turística
	ZUDC 05	Zona de reserva natural y turística
	ZUDC 09	Zona de reserva industrial

Uno de los criterios a ser evaluado es la distancia a áreas urbanas y al analizar la zona C7, la alternativa A, se observa que esta zona limita con la C7a, C3, C5, C4 y C1b, como se aprecia en la figura 6.3, siendo éstas últimas zonas de uso habitacional o residencial (ver tabla 6.8), lo que implica que esta alternativa no obtendrá el valor más alto para aquel

criterio. La conexión con carreteras es otro criterio a considerar dentro de la evaluación, en donde el valor más alto se otorga a la alternativa que cuente con conexión a carreteras conectadas a faenas mineras sin pasar por localidades, lo que convierte así a la alternativa A en una poco factible de ser seleccionada.

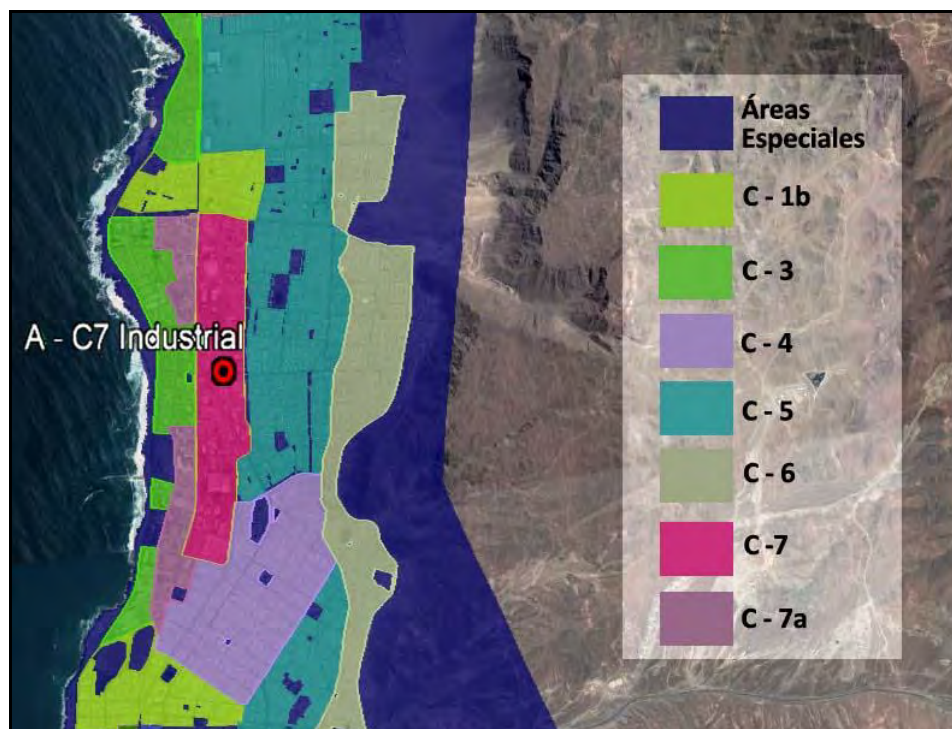


Figura 6.3: Zonificación cercana a la alternativa A.

Por otro lado, la zona ZUDC 09, la alternativa B, se encuentra a 22 kilómetros al sur-orientes de la ciudad de Antofagasta y posee un instrumento territorial específico, el cual es un estudio más detallado de aquella zona. Este documento lleva por nombre Plano Seccional Barrio Industrial La Negra y fija con exactitud los trazados y la zonificación, entre otras cosas, para esta zona. El Plano Seccional Barrio Industrial La Negra comprende tres tipos de áreas: las áreas de extensión urbana, áreas especiales y zonas urbanizables de desarrollo condicionado, cuyos códigos son U, EI y ZUDC, respectivamente. Las zonas y el perfil de uso comprendidas en este instrumento se presentan en la tabla 6.9 y en la figura 6.4 se aprecia en mayor detalle cómo están localizadas estas zonas. Esta alternativa por

encontrarse alejada del centro de la ciudad y estar conectada con las rutas 28, 5 Norte y B-475, esta última conectada a los yacimientos mineros Zaldívar y Escondida por medio de la ruta B-55, cuenta con una alta ventaja sobre la alternativa A. Sin embargo, este sector se encuentra atravesado a lo largo por la Falla de Atacama (zona EI-10 en la Figura 6.4), lo que es considerado como un aspecto geomorfológico, siendo éste otro criterio a evaluar para cada alternativa.

Tabla 6.9: Zonas y perfiles de uso para el Barrio Industrial La Negra.

Zona	Perfil de usos
EI-6	Infraestructura sanitaria
EI-20	Reserva antepuerto
ZUDC-09	Actividades productivas peligrosas, molestas e inofensivas
EI-3a	Equipamiento comunitario
EI-3b	Áreas verdes
EI-17	Reserva instalaciones ferroviarias
EI-19	Proximidad a gasoductos
U-5	Actividades productivas molestas y peligrosas; densidad media y baja
EI-18	Servidumbre mineroducto
U-6	Actividades productivas molestas y peligrosas; densidad media y alta
EI-11	Vía aluvial
EI-10	Falla de Atacama
EI-3c	Equipamiento regional

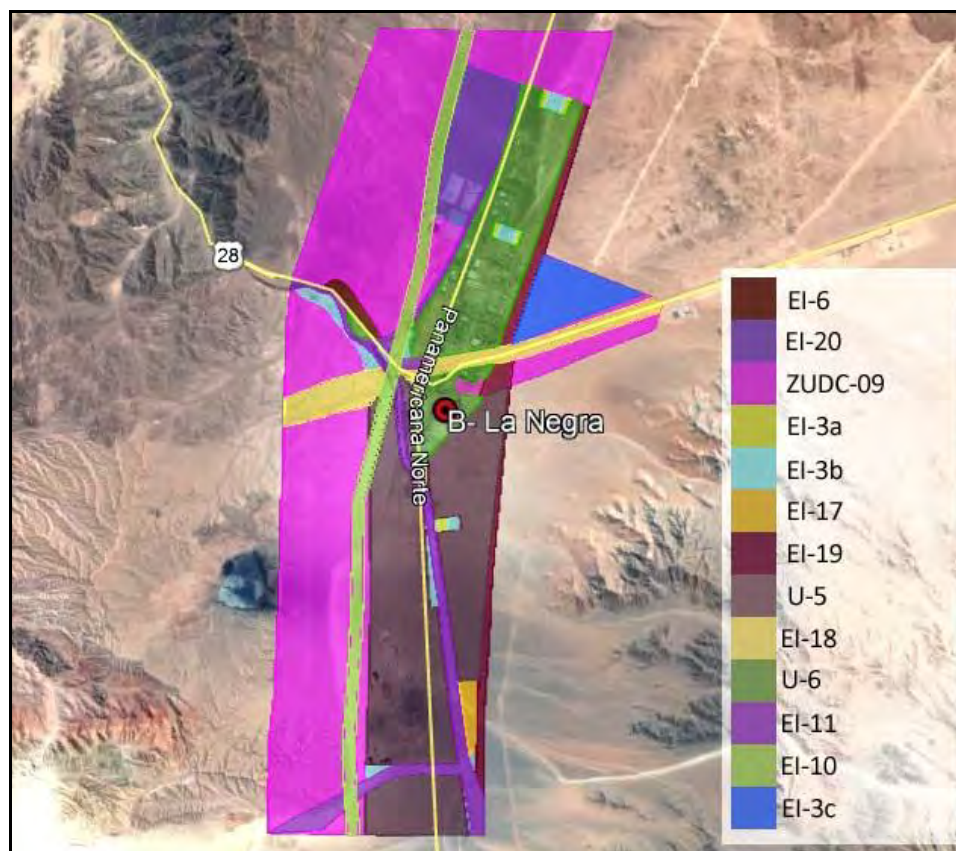


Figura 6.4: Demarcación de las zonas del barrio industrial La Negra.

Volviendo a los neumáticos mineros fuera de uso, de la estimación realizada en la sección anterior se obtiene que la minera Escondida es la mayor generadora de este residuo en la comuna, le sigue la minera Zaldívar. Ambas mineras se encuentran relativamente cercanas una de la otra y están conectadas con la ruta B-55, como se mencionó anteriormente. Por esta razón se localiza una tercera alternativa para evaluación, la C, cercana a estas mineras. El instrumento territorial que planifica este sector es el Plan Regional de Desarrollo Urbano (PRDU), el cual entrega los lineamientos para la gestión del desarrollo urbano y la estructuración de ésta dentro del territorio regional, no obstante, este instrumento es de carácter indicativo, es decir, no normativo, por lo que sus orientaciones y lineamientos deben ser considerados al momento de la confección de instrumentos de menor jerarquía, como lo son los Planes Reguladores Comunales.

Según el PRDU de la Región de Antofagasta el sector en donde se ubica la alternativa C es considerado como “Áreas de Desarrollo Condicionado”, dentro de la cual se identifican tres sub-áreas para el caso de esta región, las que se definen según el PRDU de la siguiente forma:

1. Áreas de Protección por Conservación (APPC): “Áreas previstas en forma exclusiva para determinados usos o funciones de relevancia ambiental, de manera que quedan excluidos todos los demás usos o funciones que no sean compatibles con los usos o funciones prioritarios”.
2. Áreas de Preservación por Uso Sustentable (APUS): “Áreas previstas para determinados usos o funciones de relevancia ambiental, las que deben ser mantenidas mediante un uso sustentable del territorio”.
3. Áreas de Uso Múltiple Condicionado (AUMC): “Áreas que presentan una aptitud ambiental para desarrollar un conjunto de actividades, aunque es posible excluir algunas en particular debido a las externalidades que éstas puedan producir sobre una componente ambiental”.

De este instrumento territorial se obtiene que la alternativa C se encuentra en el área de uso múltiple condicionado (AUMC), como se muestra en la figura 6.5. Esta alternativa no cuenta con aspectos geomorfológicos, pero sí se encuentra cercana a la Quebrada Chimborazo.



Figura 6.5: Zonificación según el PRDU en el sector de la alternativa C.

Otra minera ubicada en la comuna que fue considerada en la estimación de los neumáticos mineros fuera de uso fue la minera Mantos Blancos. Esta se encuentra ubicada al norte del Barrio Industrial La Negra siguiendo por la carretera 5 Norte. Cercana a ésta se ubica también la empresa Hidronor Chile S.A., la cual le otorga tratamiento y disposición final a residuos sólidos industriales y residuos peligrosos, entre otros. Como la planta a diseñar generará este tipo de residuos y por ser un sector que cumple con varios de los criterios a evaluar, es que se localiza una cuarta y última alternativa, la D. Esta alternativa también posee una zonificación en base al Plan Regional de Desarrollo Urbano (PRDU) y se presenta en la Figura 6.6. Cabe señalar, que este sector también cuenta con aspectos geomorfológicos, como lo es la Quebrada Mantos Blancos.



Figura 6.6: Zonificación según el PRDU alrededor del sector de la alternativa D.

Como se mencionó previamente, el terreno donde se encuentra la alternativa C y D es considerado rural, por lo que el uso del suelo es otorgado por el Ministerio de Agricultura. Una revisión al sitio web de CONAF, organización dependiente de este ministerio, entregó que el área donde se encuentra la alternativa C y D poseen un uso del suelo de “Áreas sin Vegetación”, como se aprecia en la Figura 6.7. Para la comuna de Antofagasta, que posee una superficie total de 3.063.156 hectáreas, el 95% de ésta superficie corresponde a aquel uso del suelo. En la tabla 6.10 se presentan los usos del suelo para la comuna y las hectáreas que abarcan.

Tabla 6.10: Hectáreas por usos del suelo en la comuna de Antofagasta.

Usos del Suelo	Descripción	Hectáreas
Terrenos Agrícolas	Zonas destinadas a la producción agropecuaria. Incluye cereales, horticultura, fruticultura y ganadería.	389,3
Áreas Urbanas e Industriales	Sectores ocupados por ciudades o instalaciones industriales	1.208,6
Cuerpos de Agua	Corresponde a cuerpos de aguas continentales.	777,2

Continuación tabla 6.10: Hectáreas por usos del suelo en la comuna de Antofagasta.

Usos del Suelo	Descripción	Hectáreas
Praderas y Matorrales	<p>Praderas: Formación vegetal donde la cobertura en el tipo biológico herbáceas supera el 10% y los tipos biológicos árboles y arbustos tiene una cobertura &lt; 10% para el caso de las estepa altiplánica y la estepa alto andina.</p> <p>Matorral: Formación vegetal donde el tipo biológico árbol es menor al 10% el de arbustos puede ser entre 10 a más del 75% y las herbáceas pueden estar entre 0-100%</p>	148.436,7
Bosques	<p>Bosques Nativos: Ecosistema en el cual el estrato arbóreo, constituido por especies nativas, tiene una altura superior a 2 metros y una cobertura de copas mayor al 25%.</p> <p>Plantaciones: Terrenos plantados con especies forestales para fines industriales.</p>	0,0
Humedales	<p>Superficies cubiertas de aguas sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes , dulces, salobres o saladas incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad de marea baja no exceda de 6 m. Incluye las siguientes categorías: Vegetación herbácea permanentemente inundada a orillas de ríos, Marismas herbáceas temporalmente inundadas por el mar; ñadis herbáceos y arbustivos, túrbales, bofedales, vegas, otros terrenos húmedos</p>	0,0
Áreas sin Vegetación	<p>Sectores donde la cobertura vegetal de toda la formación vegetal, sumando los tipos biológicos hierbas, arbustos y árboles no alcanza el 25%, se encuentran en ésta categoría playas y dunas; afloramientos rocosos; terrenos sobre el límite altitudinal de la vegetación; corrida de lavas y escoriales; derrumbes aún no colonizados por la vegetación; salares; otros sin vegetación, cajas de río.</p>	2.912.344,5

Continuación tabla 6.10: Hectáreas por usos del suelo en la comuna de Antofagasta.

Usos del Suelo	Descripción	Hectáreas
Nieves y Glaciares	Terrenos cubiertos por nieves permanentes o que aparecían cubiertos por nieve en las fotografías aéreas usadas.	0,0
Áreas No Reconocidas	Áreas que no contaron cobertura de sensores remotos a la fecha de la realización del estudio.	0,0

Fuente: Departamento forestal, FAO y sit.conaf.cl

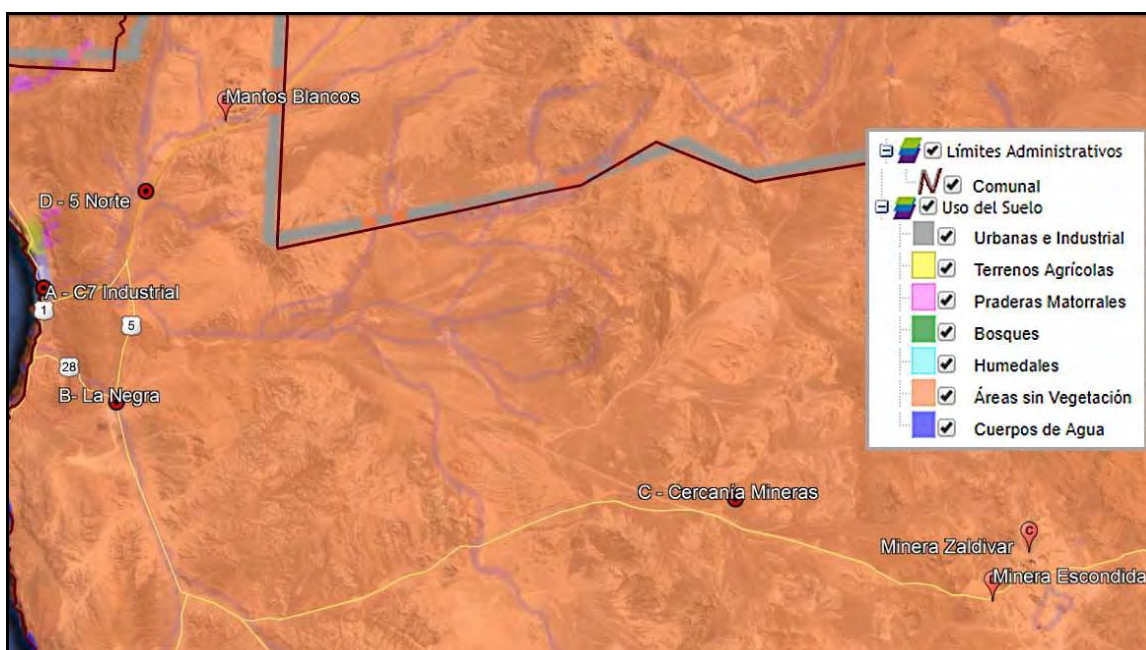


Figura 6.7: Zonificación del Uso del Suelo para el territorio que comprende las cuatro alternativas a evaluar.

Fuente: sit.conaf.cl

Por otro lado, como se trata de terrenos rurales, si alguna de estas alternativas llegase a ser la seleccionada, la planta deberá dar cumplimiento a lo establecido en el Decreto 40, sobre el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, y obtener el Permiso Ambiental Sectorial Mixto 160, conocido como cambio de uso de suelo. Esto implicaría levantar información ambiental y evaluar el efecto sobre el territorio, es decir, evaluar los cambios a nivel demográfico que generaría instalar la planta en el sector, algo que se encuentra fuera del alcance de este trabajo. Por lo que, si alguna de estas

alternativas llegase a ser la más alta en la tabla de valorización, se trabajará con la información y los estudios de los proyectos sometidos al SEIA en el sector correspondiente.

### 6.2.2. Valorización de las alternativas

Los valores otorgados para cada criterio provienen de la tabla 5.4 del presente documento y los resultados de la valorización se presentan a continuación en la tabla 6.11. De esta forma la alternativa a seleccionar para la ubicación de la planta corresponde a el Barrio Industrial La Negra.

Tabla 6.11: Evaluación de las alternativas de ubicación de la planta.

<b>Criterio</b>	<b>A Zona C7</b>	<b>B La Negra</b>	<b>C Cercanía Mineras</b>	<b>D 5 Norte</b>
Distancia a áreas urbanas	1	3	3	3
Conexión con carreteras	1	3	3	3
Distancia a aguas superficiales	3	3	3	3
Aspectos geomorfológicos	3	1	2	1
Distancia con áreas de protección de biodiversidad	3	3	3	3
Otros usos territoriales e infraestructura	2	3	1	1
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>

### 6.3. Cálculo a nivel conceptual de una planta de valorización energética de neumáticos mineros fuera de uso

Para la realización de los cálculos del diseño de la planta se trabajó con un 40% de la oferta proyectada de neumáticos mineros fuera de uso para el año 2020 en la provincia de Antofagasta, que incluye a las comunas de Sierra Gorda, Antofagasta y Taltal, valor obtenido de la sección 6.1 del presente documento, y que corresponde a 3.118,5 ton/año. Esto quiere decir que la planta debe ser capaz de otorgar tratamiento a aquella cantidad de neumáticos considerando mantención, posibles huelgas y la cantidad de horas a la semana que trabajan los operarios.

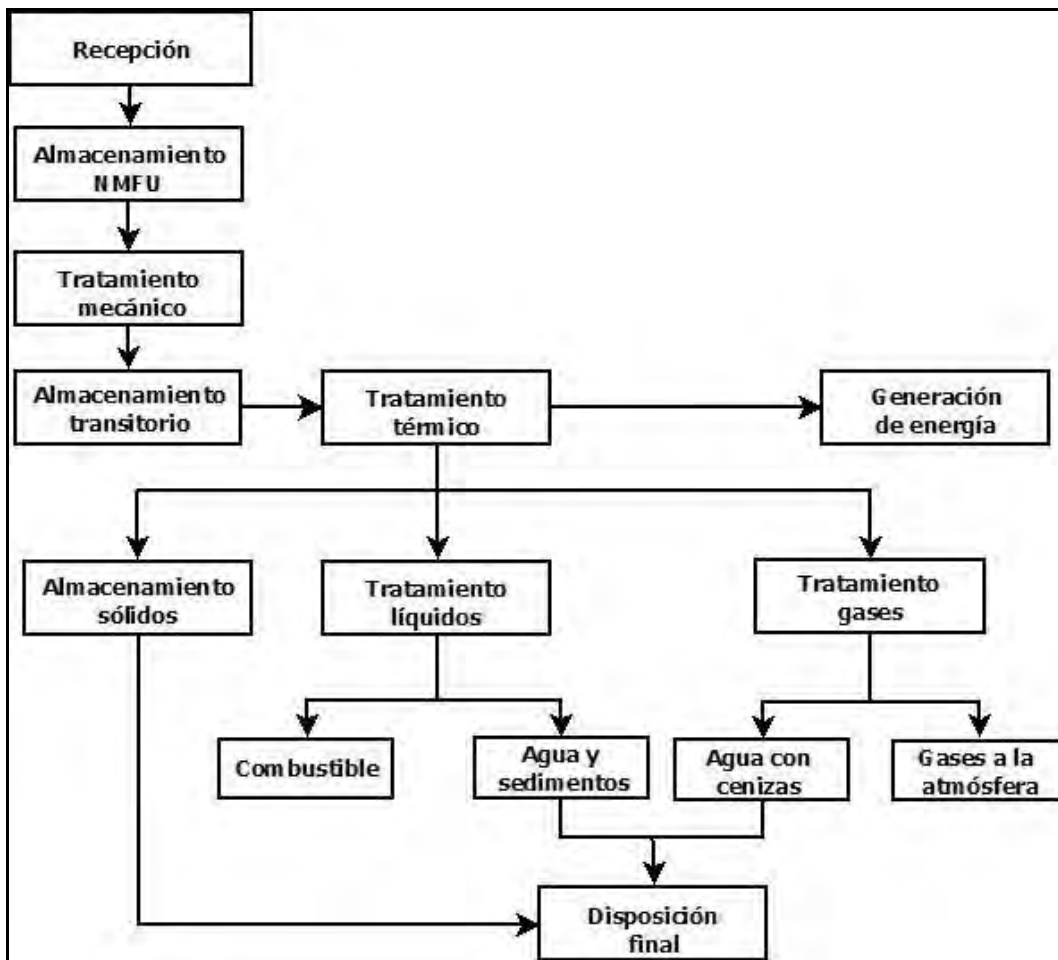


Figura 6.8: Diagrama de bloque del proceso a realizar en la planta.

Fuente: Elaborado en base a Segura P., 2018.

De forma global se presenta la figura 6.8 que muestra el proceso por el cual pasaran los neumáticos mineros fuera de uso desde que llegan a la planta y salen de ésta. En la figura 6.9 se indica cómo están distribuidos estos procesos y las actividades dentro de la planta. A continuación se describe cada una de estas etapas.

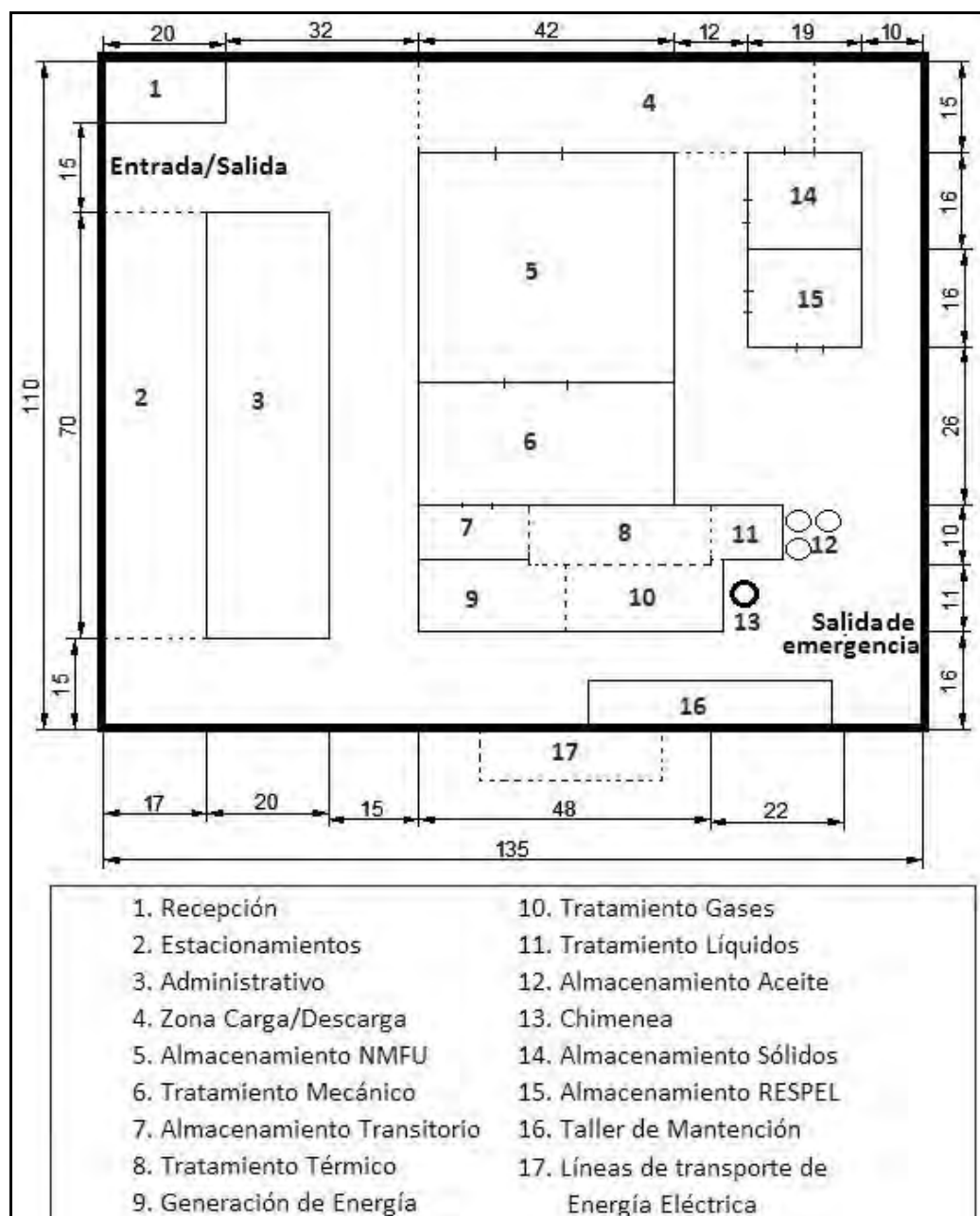


Figura 6.9: Distribución de los procesos en la planta.

Fuente: Elaborado en base a Segura P., 2018 y proyectos similares ingresados al SEIA.

### 6.3.1. Descripción del proceso

#### 6.3.1.1. Recepción

Los neumáticos llegarán a las dependencias de la planta por medio de camiones y, luego de verificar que todo esté en orden, se dirigirán a la zona de carga y descarga, en donde el personal procederá a realizar la descarga de los neumáticos utilizando una máquina especial conocida como “manipulador de neumáticos” (tire handler en inglés) cuya capacidad de carga es de tres toneladas.

#### 6.3.1.2. Almacenamiento de NMFU

Los neumáticos que entren a la planta no siempre serán del mismo tamaño, por tanto, se movilizarán de mayor a menor diámetro desde la zona de descarga hacia el galpón de almacenamiento. Este sector considera constantemente una entrada y salida de neumáticos, por lo que la distribución de éstos dentro del galpón, así como también sus dimensiones, las que se indican en figura 6.10, permiten el movimiento de los equipos especiales que manejarán estos pesados y gigantes neumáticos.

Para el cálculo de la cantidad de neumáticos a almacenar en el galpón se consideró el flujo de entrada hacia el gasificador y el promedio en masa para un neumático minero, el cual es de 2,6 ton (ver tabla 6.4 de la sección 6.1).

$$\frac{8543,95(\text{kg/día})}{2641,68(\text{kg})} = 3,234(\text{NMFU/día}) \approx 4(\text{NMFU/día})$$

Es decir, la planta necesitará alimentar con 4 neumáticos mineros fuera de uso al día al gasificador. Para asegurar esta alimentación llegarán a la planta como mínimo 6 NMFU en los días hábiles, es decir, durante cinco días en una semana.

El almacenamiento de los neumáticos para que la planta funcione durante dos semanas se calculó de la siguiente manera:

$$6(\text{NMFU}/\text{dia}_{\text{habil}}) \cdot \frac{5(\text{dia}_{\text{habil}})}{7(\text{dia})} \cdot 14(\text{dia}) = 60(\text{NMFU})$$

De esta forma, la mínima capacidad de almacenamiento en el galpón es de 60 NMFU. Para el acopio de neumáticos se formarán 2 filas con 4 columnas con un máximo de 3 neumáticos de alto, por ende, cada tira tendrá un total de 24 neumáticos acopiados. El galpón tendrá capacidad para almacenar 4 de estas tiras de neumáticos (figura 6.10) lo que implica que la máxima capacidad de almacenamiento será de 96 NMFU. El área del galpón será de 1.596 m<sup>2</sup> y contará con una entrada y una salida, tanto de maquinaria como de personal.

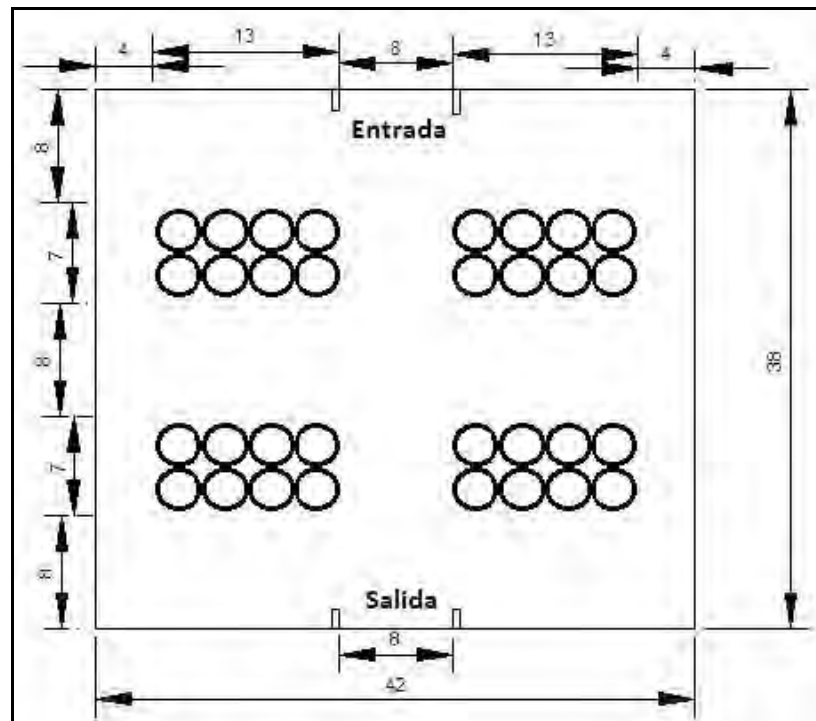


Figura 6.10: Dimensiones y distribución para el almacenamiento de NMFU.

### 6.3.1.3. Tratamiento mecánico

Este proceso tendrá una entrada, los neumáticos enteros, y dos salidas: acero y trozos de neumáticos. Para esto se contará con dos trituradores y un separador magnético, y se trabajará durante días hábiles.

Del galpón de almacenamiento de NMFU se sacarán 6 neumáticos al día. Este valor se obtuvo de la siguiente forma:

$$4(\text{NMFU/día}) \cdot \frac{7(\text{día})}{5(\text{día}_{\text{hábil}})} = 5,6(\text{NMFU/día}_{\text{hábil}}) \approx 6(\text{NMFU/día}_{\text{hábil}})$$

Esta cantidad de NMFU se colocarán en la cinta transportadora que los trasladará hacia el primer triturador. Los trozos que saldrán de este proceso (30-250 mm) se dirigirán hacia un segundo triturador. Estos últimos trozos (20-100 mm) llegarán al separador magnético, cuya función es remover parte del acero del neumático triturado. Luego los trozos serán dirigidos hacia el sector de almacenamiento transitorio en donde serán pesados antes de terminar su camino en el gasificador.

Cuando el peso alcance la cuota diaria, los trozos restantes se almacenarán en contenedores metálicos dentro del área de almacenamiento transitorio. La figura 6.11 muestra lo descrito recientemente.

Cuando la planta cuente con un almacenamiento de NMFU de 96, se podrán triturar 8 neumáticos al día, solo hasta que éstos en el almacenamiento disminuyan a 60 (anexo 1).

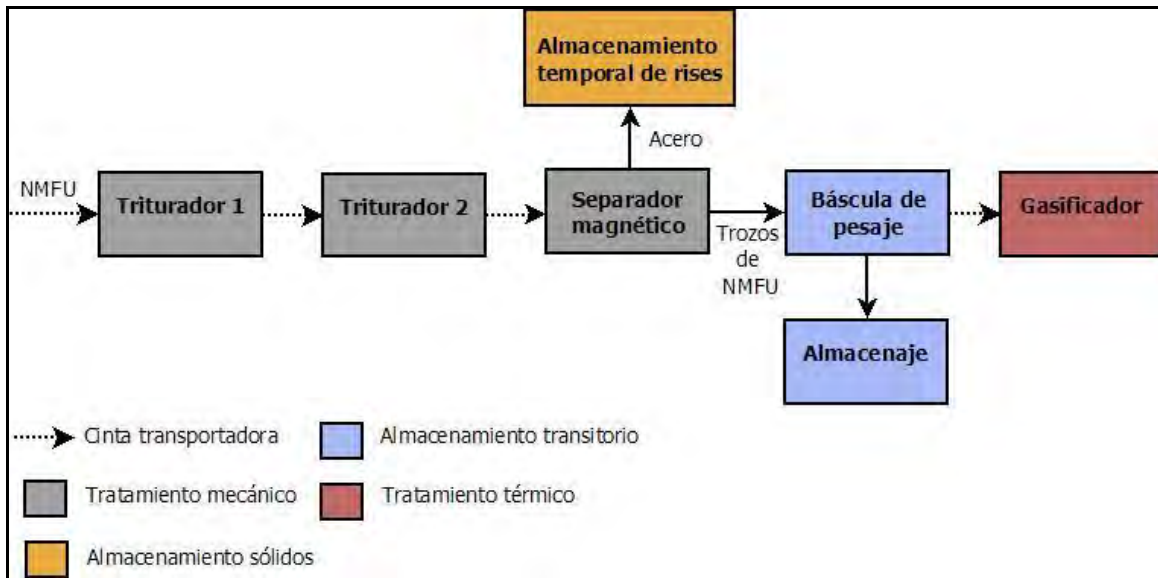


Figura 6.11: Diagrama de bloque del proceso previo al gasificador.

#### 6.3.1.4. Almacenamiento transitorio

El diseño de la planta considera también contar con una zona denominada “almacenamiento transitorio”. Este sector almacenará los trozos de neumáticos que se obtienen por la trituración que no alcancen a ser parte de la alimentación del gasificador. Tiene la función de asegurar un flujo constante de masa diario hacia el gasificador, el que será de 8,5 ton/día.

Esta área considera tener una cinta transportadora que traslade los trozos triturados de los neumáticos desde el área de tratamiento mecánico hacia el gasificador, así como también, una báscula de pesaje (figura 6.11), por lo que se dejó una distancia suficiente para dicha maquinaria y para el movimiento de las grúas horquillas. La distribución y el diseño de este sector se presentan a continuación en la figura 6.12.

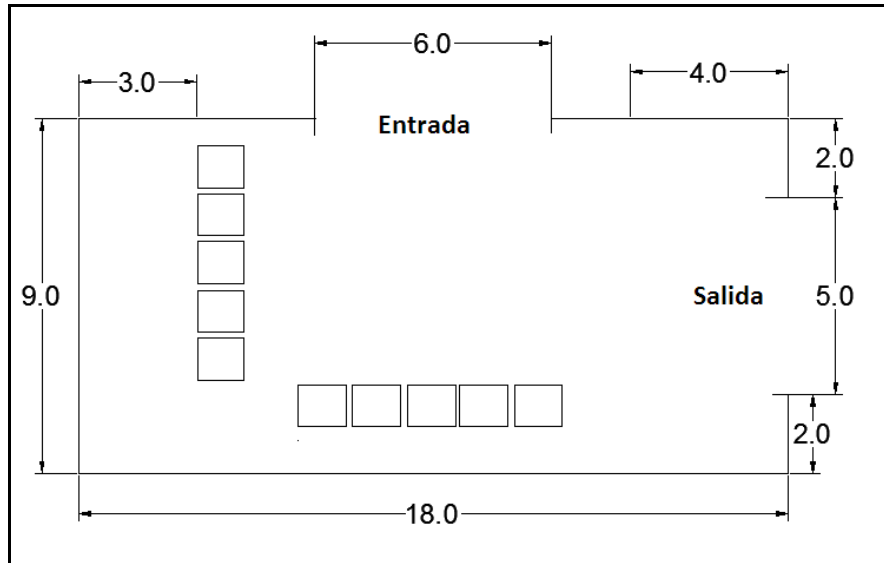


Figura 6.12: Dimensiones y distribución para el almacenamiento transitorio.

Los trozos triturados se almacenarán en contenedores metálicos con capacidad de una tonelada (figura 6.13). En total se espera contar con 10, cuya cantidad es capaz de almacenar los trozos de neumáticos cuando la planta esté a su máxima capacidad, es decir, con un almacenamiento de 96 NMFU. La acumulación que estos neumáticos tendrán en este sector, considerando una entrada de 8,5 ton/día al gasificador, se calculó como sigue:

$$\frac{96(\text{NMFU})}{14(\text{días})} \cdot 2641,68(\text{kg/NMFU}) = 18114,38(\text{kg/día})$$

$$18114,38(\text{kg/día}) - 8543,92(\text{kg/día}) = 9570,46(\text{kg/día})$$



Figura 6.13: Contenedor metálico para almacenar trozos de NMFU.

#### 6.3.1.5. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico en la planta corresponde al gasificador. Este equipo contará con la entrada de neumáticos, combustible (diesel) y aire. De éste saldrá una corriente de gases con cenizas y una con componentes sólidos.

Para el balance de masa en este proceso se consideró lo expresado en la sección 2.4.4.2 del presente documento, que indica que un 5% de los neumáticos que entran al reactor térmico corresponde a cenizas, las que luego deben ser capturadas por el tratamiento de gases. Por este motivo, este 5% se sumó a lo indicado en el balance de masa de la figura 2.10 (en esa misma sección). Así, con ese balance como referencia, que considera 100 ton/día de alimentación de neumáticos al reactor, se calcularon los porcentajes para las corrientes de salida de los productos en la planta, los que se muestran en la tabla 6.12.

Tabla 6.12: Porcentajes utilizados para el balance de masa de la planta.

	Salida (ton/día)	
Gases	28,80	47,06%
Cenizas	5,00	8,17%
Aceite	27,40	44,77%
<b>Suma</b>	<b>61,20</b>	<b>100%</b>
Negro de Carbón	27,90	71,91%
Acero	10,90	28,09%
<b>Suma</b>	<b>38,80</b>	<b>100%</b>

Con estas proporciones se calculó la masa correspondiente para las corrientes de salida del gasificador, las que se muestran en la figura 6.14, para una entrada de 8,5 ton/día de neumáticos.

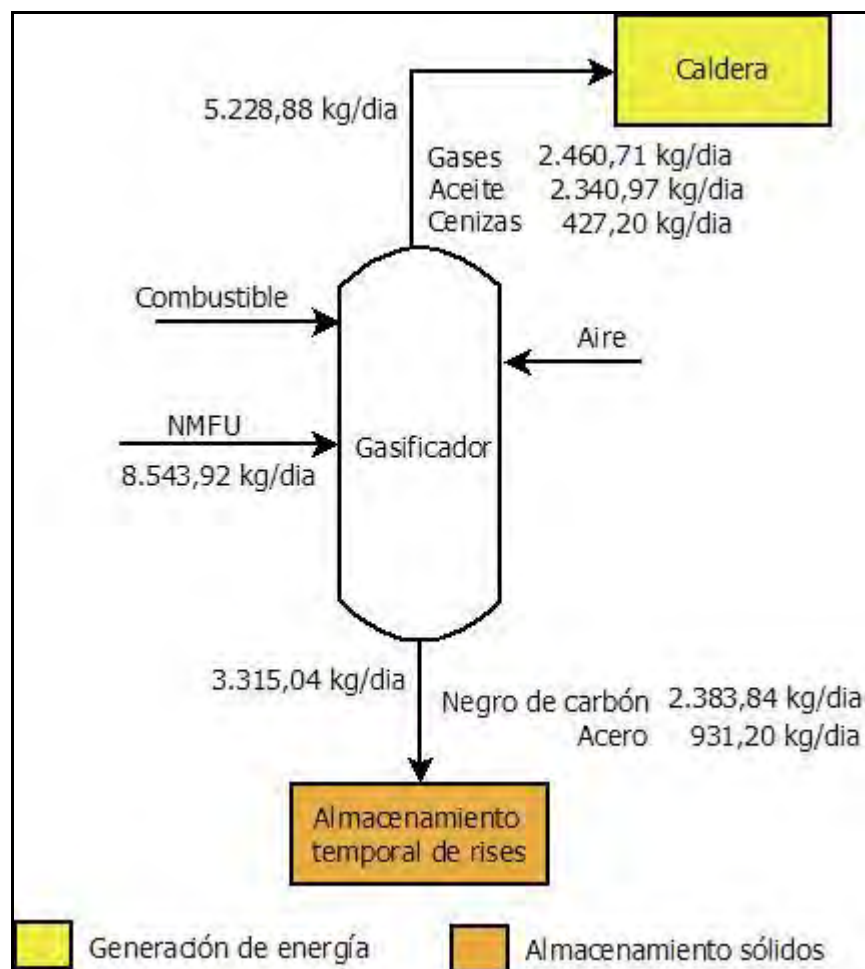


Figura 6.14: Diagrama de flujo del gasificador.

Cabe mencionar que el gasificador trabajará a una temperatura de 1.673,15 (1.400 °C) y que en la corriente superior de la figura 6.14 va considerado el aceite en estado gaseoso. De la tabla 6.12 se aprecia que 47,06% de esta corriente corresponde netamente a gases de combustión y que un 44,77% a aceite, que luego se deberá recuperar.

#### 6.3.1.6. Almacenamiento sólidos

Los residuos sólidos provendrán del fondo del gasificador (figura 6.14) y corresponden al negro de carbón y acero. Para el primero de éstos se considera un retiro cada 14 días. Este residuo se almacenará en contenedores de polipropileno (PP) de 610 litros de capacidad (figura 6.15). El acero también se almacenará en este tipo de contenedores, pero su retiro se considera mensual.



Figura 6.15: Contenedor PP para almacenar residuos sólidos.

Dentro de la bodega se considera almacenar 36 contenedores a piso, que en caso de necesitar almacenar una cantidad mayor, se apilarán uno sobre otro (figura 6.16). En total la bodega cuenta con un área de 304 m<sup>2</sup> y sus dimensiones se presentan en la figura 6.17.



Figura 6.16: Contenedores PP apilados para almacenamiento sólidos.

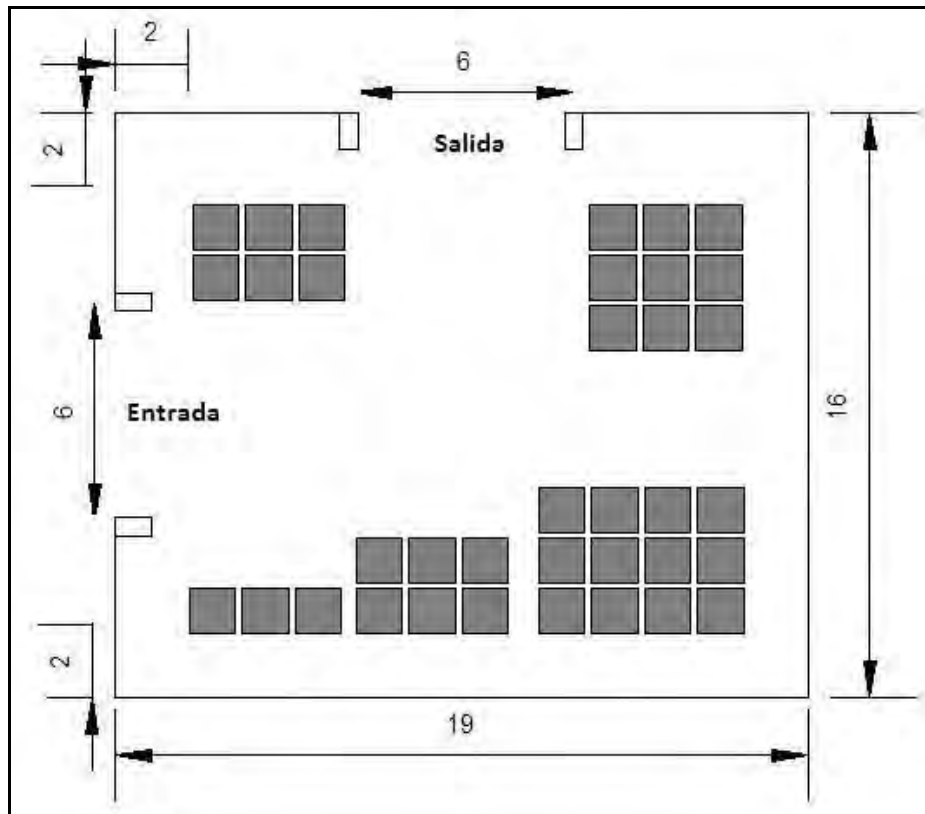


Figura 6.17: Dimensiones para la bodega de residuos sólidos.

### 6.3.1.7. Generación de energía

La generación de energía cuenta con una caldera conectada al gasificador, una turbina-generator y un intercambiador de calor. Éstos se encuentran conectados de acuerdo a la figura 6.18. A este proceso junto con el tratamiento térmico se le aplicó un balance de energía, cuyos cálculos, suposiciones y resultados se detallan en la sección 6.3.2 más adelante.

A continuación se describe brevemente la función de cada equipo.

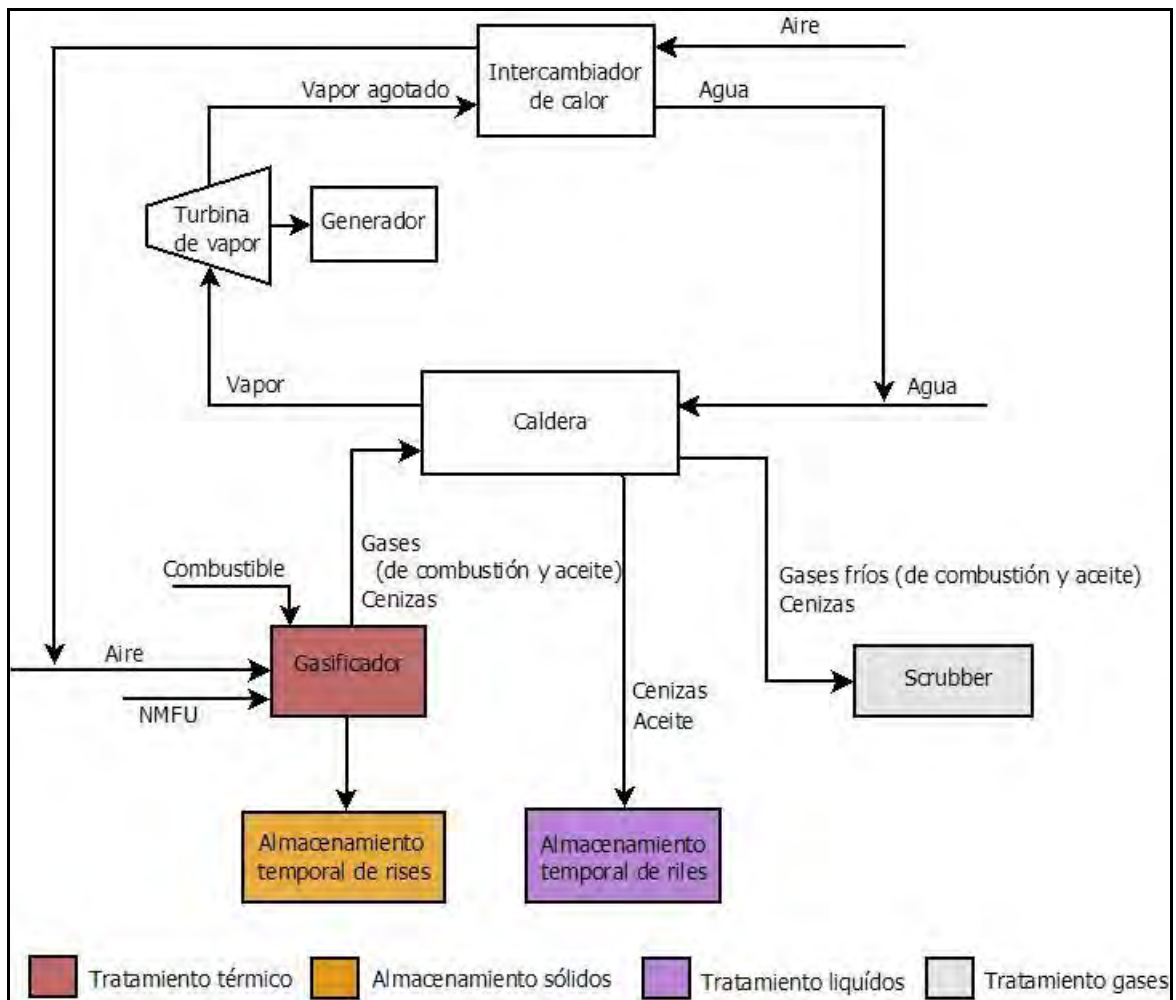


Figura 6.18: Diagrama de bloques de los procesos involucrados en la generación de energía.

### Caldera

Por este equipo transcurrirá una corriente de agua fría y una de gases calientes provenientes del gasificador. La energía en forma de calor de estos gases pasará al agua fría y la convertirá en vapor, en cambio, los gases se enfriarán y seguirán su camino hacia el tratamiento de gases.

Como se mencionó anteriormente, la corriente de gases que sale del gasificador contiene gases de combustión y aceite en estado gaseoso, es por este motivo que el equipo considerado a utilizar es una caldera-condensador (condensing boiler en inglés), cuyo diseño permite, en este caso, recuperar parte del aceite y las cenizas de la corriente gaseosa.

Estos equipos permiten temperaturas de salida de los gases bastante bajas y poseen una eficiencia en cuanto a recuperación de calor entre 80%-90%, sin embargo, para los cálculos se consideró lo siguiente:

- Eficiencia del 80% y una temperatura de salida de 353,15 K (80 °C) (para el balance de energía).
- El 60% del aceite y el 50% de las cenizas se recuperarán en este equipo.

Con aquellas consideraciones el balance de masa para la caldera se presenta en la figura 6.19.

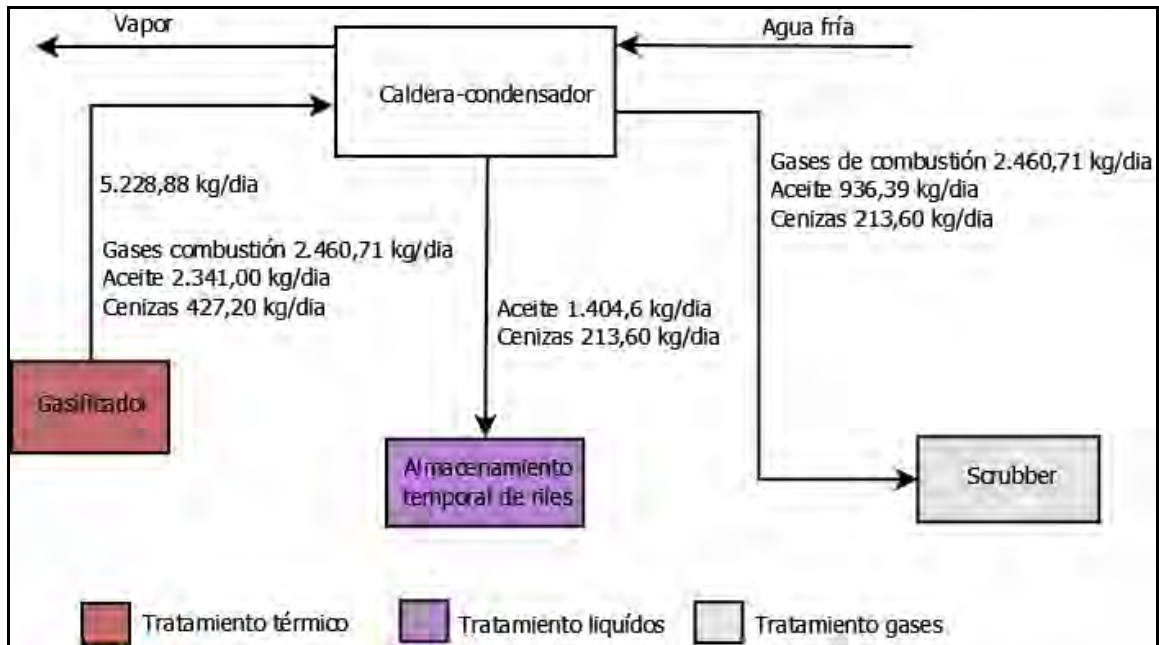


Figura 6.19: Diagrama de bloques para la caldera-condensador.

### Turbina-generador

El vapor que sale de la caldera entrará a la turbina-generador, donde la energía de éste será capaz de mover los alabes del interior del equipo y generar la energía eléctrica por medio del generador. El vapor (ya con poca energía) se dirigirá hacia el intercambiador de calor.

### Intercambiador de calor

El vapor que entra a este equipo se enfriará con aire, lo que causará que cambie de estado gaseoso a líquido. Esta agua se recirculará hacia la caldera. El aire, que al salir del equipo habrá subido su temperatura, se recirculará hacia el gasificador, como se muestra en la figura 6.18.

#### **6.3.1.8. Tratamiento gases**

El equipo considerado para el tratamiento de gases en la planta es un scrubber, o también conocido como lavador de gases. Tiene la función, como lo dice su nombre, de “lavar” los gases de los contaminantes ( $\text{SO}_2$ , cenizas, entre otros) que contiene para posteriormente

ser eliminados por la chimenea hacia la atmósfera. El gas a tratar entra por la parte inferior del equipo y asciende por éste. Desde la parte superior se vierte el líquido limpiador, que en este caso será agua. Del fondo del equipo saldrá la corriente de agua con los contaminantes, como se aprecia en la figura 6.20.

Para la cantidad de agua diaria necesaria a introducir al scrubber se consideró una fracción volumétrica de 1,14 liquido/gas. Se consideró también una densidad para los gases de  $0,6 \text{ kg/m}^3$ , cuyo valor corresponde a la densidad de los gases de combustión del gas natural (Villaflor G., V. Morales G. & Velasco J., 2008). Con una masa de  $3.611 \text{ kg/día}$  el volumen de los gases corresponde a  $6.018 \text{ m}^3/\text{día}$ . Con la relación liquido/gas el volumen de agua a introducir al scrubber diariamente es de  $6.860 \text{ m}^3$ . Con  $997 \text{ kg/m}^3$  para la densidad del agua líquida la masa de agua total a introducir es de  $6.840 \text{ ton/día}$ , con una circulación de 6 veces al día, el agua a ingresar es finalmente de  $1.140 \text{ ton/día}$ .

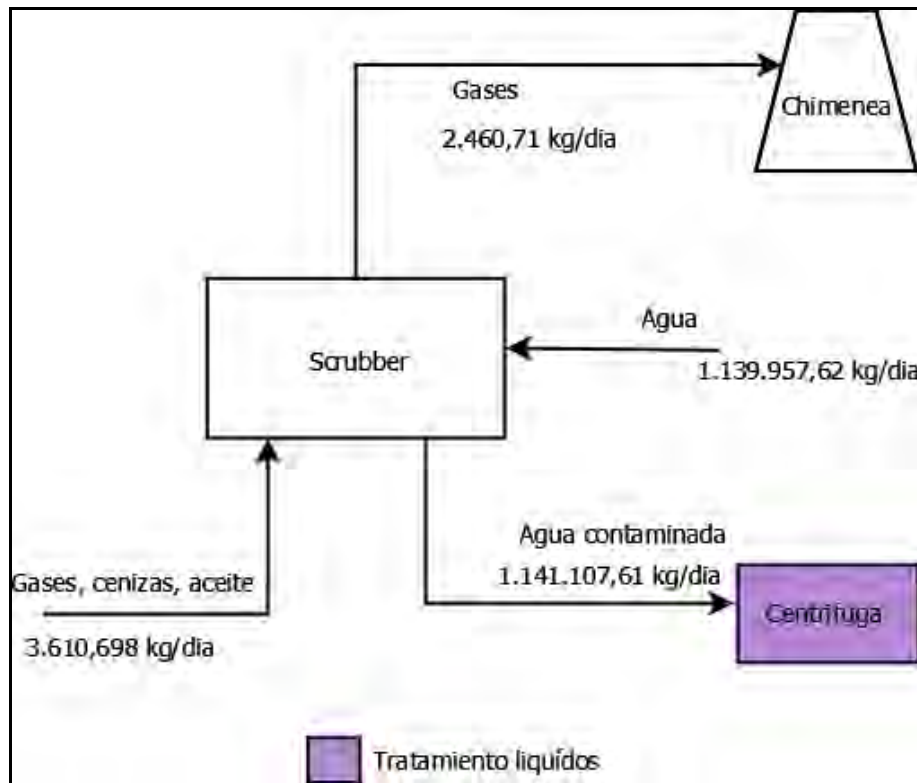


Figura 6.20: Diagrama del tratamiento gaseoso.

### **6.3.1.9. Tratamiento líquidos**

La corriente de aceite y cenizas recuperados de la caldera-condensador (figura 6.19) se separan por medio de un filtro, el cual contiene una tela especial que tiene por función retener las cenizas y dejar pasar el aceite. Esta separación se logra inyectando aire al filtro.

Por otro lado, la corriente de agua contaminada proveniente del scrubber (figura 6.20) pasará a una centrifuga. La función de este equipo en el diseño de la planta es recuperar el aceite para posteriormente utilizarlo como combustible.

En la centrifuga, la corriente líquida a tratar ingresa al equipo por la parte central y superior de éste, el cual comienza a girar inmediatamente generando una fuerza centrífuga, la que permite separar el agua del aceite por tener distinta densidad. El líquido más denso será propulsado hacia el exterior del equipo y el más ligero podrá recuperarse desde el centro.

El aceite luego será dirigido hacia su respectivo almacenamiento. El agua con sedimentos se hará pasar por filtros para eliminar la mayor cantidad de agua posible (se asume un 99,88%) y almacenar lo restante (una fase espesa de agua y sedimentos) en la bodega de RESPEL. La figura 6.21 muestra en un diagrama de bloques el proceso considerado para el tratamiento de líquidos descrito previamente.

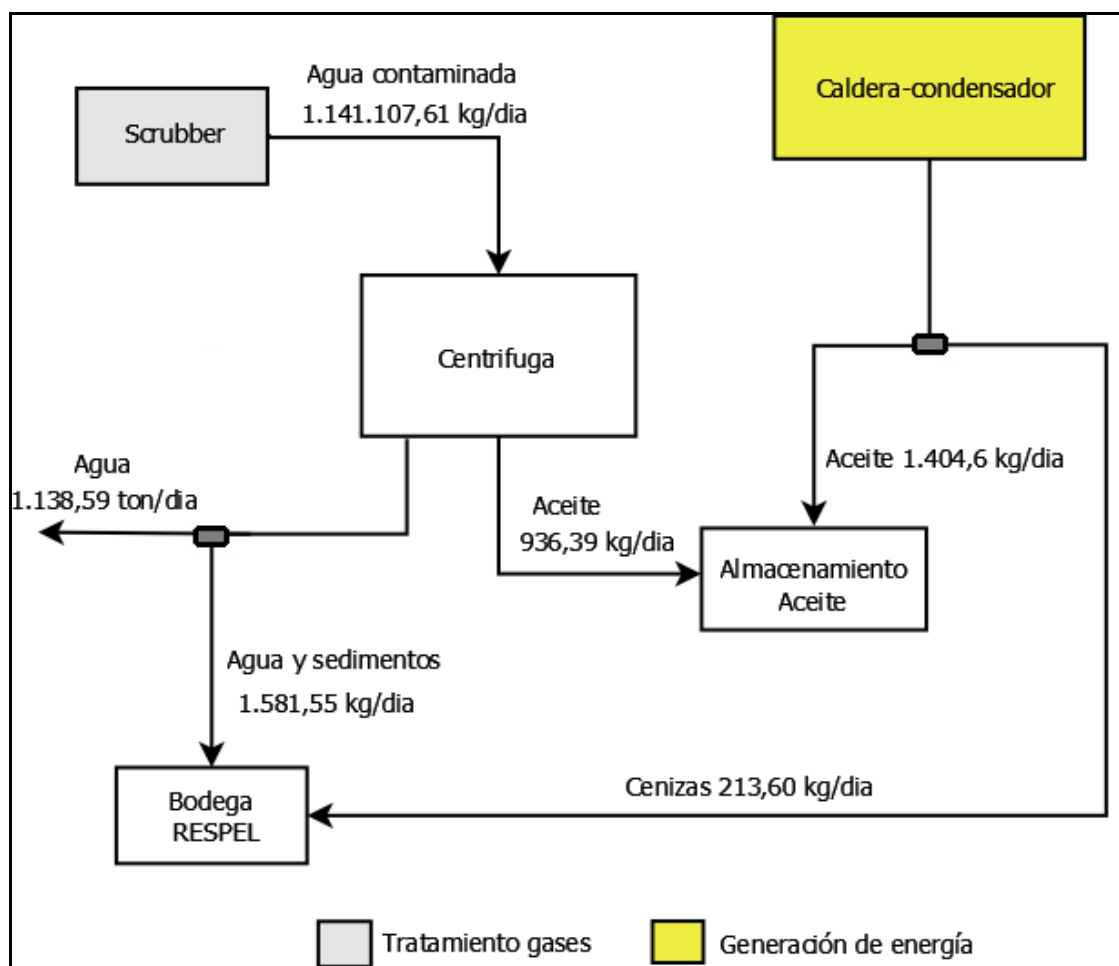


Figura 6.21: Diagrama de bloques del tratamiento para líquidos.

### Bodega RESPEL

Los residuos líquidos que salgan de la centrifuga corresponderán a una masa de agua con cenizas y sedimentos. Este residuo se considerará como peligroso, por ende, se almacenará en bins de mil litros de capacidad (figura 6.22). El retiro será de una vez al mes por lo que mensualmente se almacenarán 54 bins a piso (ver figura 6.23). No obstante, se adquirirán 81 unidades, lo suficiente para almacenar este residuo por 45 días en caso de contingencias. La bodega, contará con un área de 304 m<sup>2</sup>.



Figura 6.22: Contenedor tipo bin para residuos líquidos.

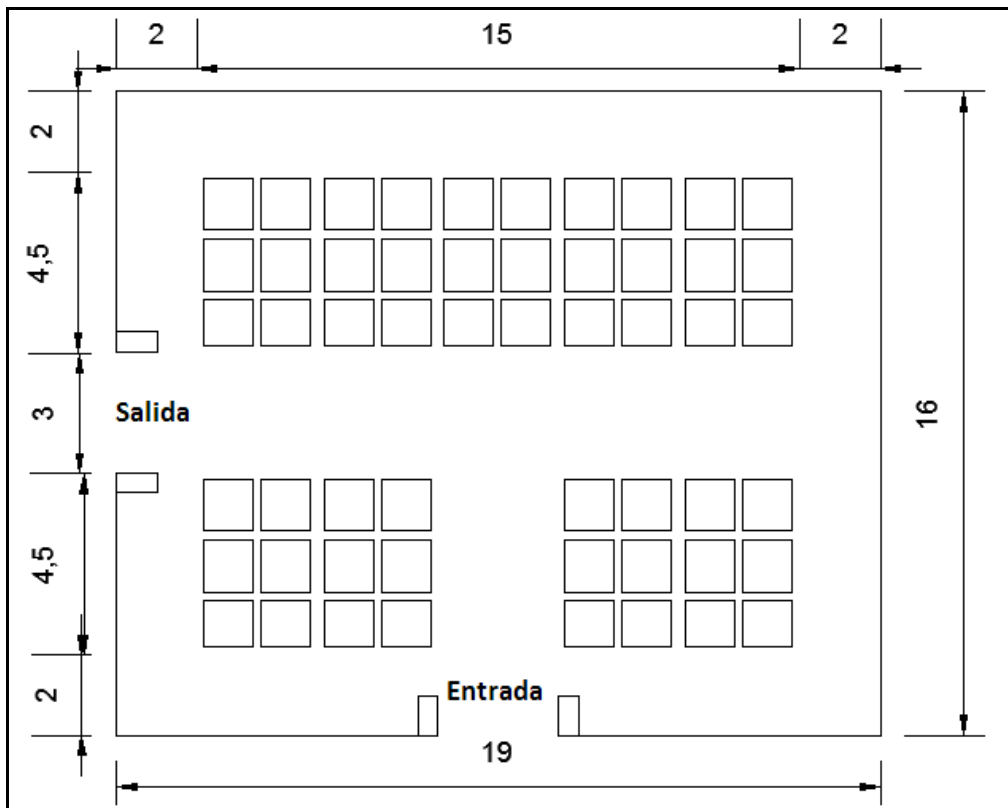


Figura 6.23: Dimensiones de la bodega de RESPEL.

### Almacenamiento de aceite

Se almacenarán en tanques de 30 m<sup>3</sup> de capacidad (figura 6.24), cuyas dimensiones son de 2,4 metros de diámetro y 6,5 metros de altura. La planta contará con 3 de estos tanques, lo suficiente para almacenar aceite durante 30 días.



Figura 6.24: Tanque de almacenamiento para el aceite.

#### **6.3.1.10. Disposición final**

La disposición final es la última etapa del proceso en cuanto a los residuos generados. Tanto para el residuo líquido como el negro de carbón se contará con servicios de retiro mensual y cada 14 días, respectivamente, por una empresa especializada y que cuente con los respectivos permisos sanitarios para aquello. El aceite, en cambio, se utilizará como combustible para el gasificador, lo que disminuirá los costos para este insumo.

### 6.3.2. Balance de energía

El balance de energía se obtuvo considerando una temperatura estimada de entrada y salida para cada equipo descrito en la sección 6.3.1.7. La energía entonces se calculó con la capacidad calorífica ( $C_p$ ) de cada gas en función de la temperatura.

#### 6.3.2.1. Cálculo de Entalpía de Reacción ( $H_{rx}$ )

Se consideró un porcentaje másico de 92,2% para carbón (C) y un 1,5% para azufre (S) en la composición del neumático. De los 8.543,92 kg/día que entran al gasificador, se obtendrá de la corriente del fondo una fracción del carbono del neumático, el negro de carbón, que no pasará por la caldera (ver figura 6.14), por ende, es necesario calcular cuánto del carbono que entra estará disponible para gasificar. Esto se calculó de la siguiente forma:

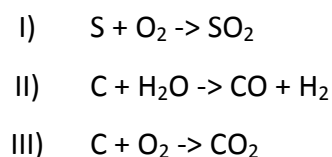
$$\frac{2383,85(\text{kg/día})}{8543,92(\text{kg/día})} \cdot 92,20\% = 25,72\%$$

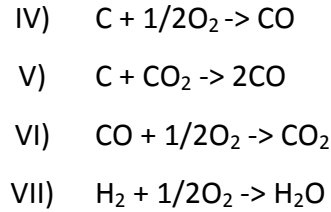
Entonces, un 74,28% del carbono del neumático que entra pasará por la caldera. En moles esto sería:

$$0,7428 \cdot 0,922 \cdot 8543,92(\text{kg/día}) \cdot 12^{-1}(\text{kmol/kg}) = 487,62(\text{kmol/día})$$

Este valor quiere decir que cuando entren los neumáticos al reactor habrán 487,62 kmol de carbono disponibles para reaccionar.

Para el balance de energía se utilizaron las siguientes reacciones:





La reacción III genera el compuesto limitante de la reacción V, es decir, están estrechamente ligadas y esta última es dependiente de la otra. Con esto, se tomaron las siguientes consideraciones:

- 1) La reacción III y V necesitan 10% de los moles de entrada del carbón proveniente del neumático.
- 2) Todo el CO<sub>2</sub> resultante de la reacción III se consume en la reacción V.
- 3) La reacción II necesita un 0,3% de los moles de entrada del carbono.
- 4) La reacción IV necesita un 79,7% de los moles de entrada del carbono.
- 5) Todo el CO formado en V y II reacciona en VI.
- 6) Todo el H<sub>2</sub> formado en II reacciona en VII.
- 7) Todo el carbono que entra (487,62 kmol) reacciona.
- 8) El oxígeno que entra está en relación estequiométrica.
- 9) El sistema es adiabático.

Para calcular los moles en cada reacción hay que tener claro las siguientes igualdades:

$$\text{entra} + \text{genera} = \text{reacciona} + \text{sale}$$

$$-Q_{\text{entra}} = Q_{\text{rx}}$$

Con esto, junto a las nueve consideraciones mencionadas recientemente, se obtiene la tabla 6.13 para las reacciones de I a VII.

Tabla 6.13: Cantidad de moles involucrados en la gasificación por compuesto.

Reacción	Componente	Moles (kmol)			
		Entra	Reacciona	Genera	Sale
III	C	48,76	48,76	0,00	0,00
	O <sub>2</sub>	48,76	48,76	0,00	0,00
	CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	48,76	48,76
V	C	48,76	48,76	0,00	0,00
	CO <sub>2</sub>	48,76	48,76	0,00	0,00
	CO	0,00	0,00	97,52	97,52
II	C	1,46	1,46	0,00	0,00
	H <sub>2</sub> O	1,46	1,46	0,00	0,00
	CO	0,00	0,00	1,46	1,46
	H <sub>2</sub>	0,00	0,00	1,46	1,46
IV	C	388,61	388,61	0,00	0,00
	O <sub>2</sub>	194,30	194,30	0,00	0,00
	CO	0,00	0,00	388,61	388,61
I	S	4,00	4,00	0,00	0,00
	O <sub>2</sub>	4,00	4,00	0,00	0,00
	SO <sub>2</sub>	0,00	0,00	4,00	4,00
VI	CO	390,07	390,07	0,00	0,00
	O <sub>2</sub>	195,03	195,03	0,00	0,00
	CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	390,07	390,07
VII	H <sub>2</sub>	1,46	1,46	0,00	0,00
	O <sub>2</sub>	0,73	0,73	0,00	0,00
	H <sub>2</sub> O	0,00	0,00	1,46	1,46

Tabla 6.14: Entalpía de formación para gases involucrados en las reacciones.

Entalpía de formación (kJ/mol)	
SO <sub>2</sub>	-296,90
CO	-110,53
H <sub>2</sub> O	-241,83
CO <sub>2</sub>	-393,15

La entalpía de reacción para las reacciones se presentan en la tabla 6.14, que junto a los moles de la tabla 6.13 se obtiene la energía entregada por cada reacción, la que se presenta en la tabla 6.15.

Tabla 6.15: Energía otorgada por cada reacción involucrada.

Reacción	Entalpía de reacción (kJ/mol)	Energía (kJ)
I	-296,90	-1.189.073,51
II	131,31	192.067,23
III	-393,15	-19.169.422,69
IV	-110,53	-42.950.635,96
V	172,10	8.391.345,91
VI	-282,63	-110.243.074,40
VII	-241,83	-353.738,38
<b>Suma</b>		<b>-165.322.531,80</b>

La energía total entregada por las reacciones es de -165.322.531,80 kJ. Con una proporción de 21% para oxígeno y 79% de nitrógeno en el aire, se tiene la tabla 6.16 con el total de moles de gases que salen del gasificador provenientes de las reacciones I a VII.

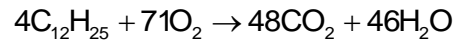
Tabla 6.16: Moles de gases de salida.

Gas	Mol (kmol)
SO <sub>2</sub>	4,00
CO <sub>2</sub>	390,07
H <sub>2</sub> O	1,46
N <sub>2</sub>	1.665,89
<b>Suma</b>	<b>2.066,38</b>

El poder calorífico del neumático se encuentra entre 32-34 MJ/kg. Del total presentado en la tabla 6.15 se tiene 19,35 MJ por kilogramo de neumático ingresado al gasificador. La energía faltante se considera acumulada en el aceite, como se presentó en el punto anterior, la corriente gaseosa contiene esta sustancia en estado gaseoso. Para efectos de

cálculo se asume que se trata de diesel, cuya fórmula es  $C_{12}H_{23}$  y posee una entalpía de formación de 6.700 kJ/mol.

La reacción de combustión del diesel es la siguiente:



Su entalpía de reacción se calcula como sigue:

$$48 \cdot (-393,15)(\text{kJ/mol}) + 46 \cdot (-241,83)(\text{kJ/mol}) - 4 \cdot (6700)(\text{kJ/mol}) = -56.795,4(\text{kJ/mol})$$

Asumiendo un mol de diesel y considerando los porcentajes gas-aceite de la corriente superior del gasificador, se tiene lo presentado en la tabla 6.16 para un kilogramo de neumático gasificado.

Tabla 6.17: Energía estimada que entrega la corriente gaseosa del gasificador.

Corriente gaseosa	Composición	Energía (kJ)	Energía otorgada en la corriente gaseosa (MJ)
Gas	47,06%	-19.349,73	-9,11
Aceite	44,77%	-56.795,38	-25,43
		<b>Suma</b>	<b>-34,53</b>

### 6.3.2.2. Balance caldera-condensador

#### Gases

Temperatura de entrada de los gases es de 1.673,15 K (1.400 °C) y la de salida es de 353,15 K (80 °C). Con esto, la energía de los gases se calcula resolviendo la siguiente integral:

$$Q_{\text{gases}} = \int_{1400^{\circ}\text{C}}^{80^{\circ}\text{C}} C_{p_{\text{gases}}} \cdot dT + \int_{1400^{\circ}\text{C}}^{80^{\circ}\text{C}} C_{p_{\text{aceite}}} \cdot dT$$

Para el Cp del aceite se considerará un valor de 2,05 kJ/kg·°C (obtenido de Engineering ToolBox, 2003). El Cp de gases se calcula como sigue:

$$C_{p_{\text{gases}}} \text{ (kJ/mol} \cdot ^{\circ}\text{C)} = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Los valores correspondientes para cada compuesto en estado gaseoso se presentan en la tabla 6.18.

Tabla 6.18: Valores de los coeficientes de capacidad calorífica para cada compuesto.

Compuesto	a	b	c	d
SO <sub>2</sub>	0,03891	3,90x10 <sup>-5</sup>	-3,10x10 <sup>-8</sup>	8,61x10 <sup>-12</sup>
CO <sub>2</sub>	0,03611	4,23x10 <sup>-5</sup>	-2,89x10 <sup>-8</sup>	7,46x10 <sup>-12</sup>
H <sub>2</sub> O	0,03346	6,88x10 <sup>-6</sup>	7,60x10 <sup>-9</sup>	-3,59x10 <sup>-12</sup>
N <sub>2</sub>	0,02900	2,20x10 <sup>-6</sup>	5,72x10 <sup>-9</sup>	-2,87x10 <sup>-12</sup>

Resolviendo la integral del Cp de los gases para cada compuesto y multiplicándolo por los moles de salida, calculados en el punto anterior, se obtiene la tabla 6.19 a continuación.

Tabla 6.19: Energía otorgada por los gases de combustión.

Compuesto	Cp (kJ/mol)	Moles (kmol)	Energía (kJ)
SO <sub>2</sub>	-69,37	4,00	-277.842,83
CO <sub>2</sub>	-47,72	390,07	-18.614.467,54
H <sub>2</sub> O	-44,18	1,46	-64.619,15
N <sub>2</sub>	-42,90	1.665,89	-71.474.011,28
<b>Energía total</b>			<b>-90.430.940,80</b>

El Cp del aceite se obtiene de la siguiente forma:

$$Cp_{\text{aceite}} = 2,05 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \cdot [80(^{\circ}\text{C}) - 1400(^{\circ}\text{C})] \cdot 5228,88(\text{kg}) = -14.425.433,18(\text{kJ})$$

La suma de ambos Cp da como resultado -104.856.373,99 kJ, siendo esta la energía disponible para transferirse al agua que ingresa a la caldera, ya que:

$$-Q_{\text{gases}} = Q_{\text{agua}}$$

### Agua

El agua que transcurre por los tubos de la caldera sufre un cambio de estado de líquido a gaseoso. Esta agua entrará a 353,15 K (80 °C) y saldrá a 615,15 K (342 °C). Para obtener los moles del agua se necesita resolver la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{agua}} = \int_{80^{\circ}\text{C}}^{100^{\circ}\text{C}} Cp_{\text{liq}} \cdot dT + \Delta H_v + \int_{100^{\circ}\text{C}}^{342^{\circ}\text{C}} Cp_{\text{gas}} \cdot dT$$

La energía de vaporización ( $\Delta H_v$ ) para este caso corresponde a 40,656 kJ/mol. Tanto el Cp para el agua líquida como en estado gaseoso se calculan de la siguiente manera:

$$Cp(\text{kJ/mol} \cdot ^\circ\text{C}) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Resolviendo la integral se tiene un valor de 50,72 kJ/mol al utilizar los valores correspondientes a los de la tabla 6.20.

Tabla 6.20: Coeficientes de capacidad calorífica para el compuesto agua.

Compuesto	a	b	c	d
H <sub>2</sub> O <sub>liq</sub>	7,54x10 <sup>-2</sup>	0	0	0
H <sub>2</sub> O <sub>gas</sub>	3,35x10 <sup>-2</sup>	6,88x10 <sup>-6</sup>	7,60x10 <sup>-9</sup>	-3,59x10 <sup>-12</sup>

Asumiendo un 80% de eficiencia, como se mencionó en el punto 6.3.1.7, los moles de agua se obtienen de esta manera:

$$-\frac{-104.856.373,99(\text{kJ})}{50,72 \cdot 0,8(\text{kJ/mol})} \cdot \frac{1}{1000} (\text{kmol/mol}) = 2584,40 (\text{kmol})$$

### 6.3.2.3. Balance en la turbina-generador

El balance en este equipo es para determinar cuánta energía eléctrica se obtendrá de la gasificación de los neumáticos. Este balance sigue la siguiente ecuación:

$$W = -(H_{\text{sale}} - H_{\text{entra}})$$

Donde W corresponde a energía en forma de trabajo (work en inglés). El vapor saldrá de la caldera a 615,15 K (342 °C) y se estima que se enfriará a 393,15 K (120 °C) al pasar por la turbina. Para obtener la energía de salida se resuelve la siguiente ecuación:

$$H_{\text{sale}} = \int_{342^{\circ}\text{C}}^{120^{\circ}\text{C}} C_{p_{\text{vapor}}} \cdot dT$$

Donde:

$$C_{p_{\text{vapor}}} (\text{kJ/mol} \cdot ^{\circ}\text{C}) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Los valores para las constantes correspondientes al agua en estado gaseoso provienen de la tabla 6.20. Resolviendo la integral se obtiene -7,87 kJ/mol. Los moles que entran a la turbina son los mismos que salen de la caldera-condensador. Estos se calcularon en el punto anterior, por ende la energía que sale de la turbina se obtiene como sigue:

$$-7,87(\text{kJ/mol}) \cdot 2584,40(\text{kmol}) \cdot 1000(\text{mol/kmol}) = -20.328.532,19(\text{kJ})$$

La energía que entra a la turbina es de 83.885.099,19 kJ (el 80% recuperado de la energía de los gases que pasan por la caldera-condensador). La energía entonces generada en forma de trabajo queda en:

$$W = -(-20.328.532,19 - 83.885.099,19)$$

$$W = 104.213.631,38(\text{kJ})$$

Todos los cálculos han correspondido a la gasificación de neumáticos en un día, por ende la potencia que se generará en la planta diariamente se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{104.213,63(\text{MJ})}{86.400(\text{s})} = 1,20(\text{MW})$$

Al año, la energía generada por la planta corresponderá a 10.566,12 megavatio-hora, valor obtenido de la siguiente manera:

$$104.213,63(\text{MJ}/\text{dia}) \cdot 365(\text{dia}/\text{año}) \cdot 1/3600(\text{MWh}/\text{MJ}) = 10.566,12(\text{MWh}/\text{año})$$

#### 6.3.2.4. Balance en el intercambiador de calor

##### Vapor

El vapor entrará a una temperatura de 393,15 K (120 °C) y saldrá a una de 353,15 K (80 °C) como agua líquida hacia la caldera por una corriente de recirculación (ver figura 6.18).

Para obtener la energía de esta agua se resuelve la siguiente integral:

$$Q_{\text{agua}} = \int_{120^{\circ}\text{C}}^{100^{\circ}\text{C}} C_{p_{\text{gas}}} \cdot dT + \Delta H_v + \int_{80^{\circ}\text{C}}^{100^{\circ}\text{C}} C_{p_{\text{liq}}} \cdot dT$$

Donde el  $C_p$ , para gas y líquido, se obtiene por medio de:

$$C_p(\text{kJ/mol} \cdot ^\circ\text{C}) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Para obtener el valor de  $C_p$  se utilizan los mismos valores que de la tabla 6.20. En este caso la energía de vaporización ( $\Delta H_v$ ) tiene signo negativo.

Resolviendo la integral se tiene un valor de  $-42,84$  kJ/mol. Este valor multiplicado por los moles del agua obtenidos en el punto 6.3.2.2 dará la energía que pierde el vapor al cambiar de estado en este equipo, que corresponde a:

$$-42,84(\text{kJ/mol}) \cdot 2584,40(\text{kmol}) \cdot \frac{1000(\text{mol})}{1(\text{kmol})} = -110.726.428,87(\text{kJ})$$

### Aire

La energía que pierde el agua es recuperada por el aire que entrará al intercambiador de calor, y esta energía la recuperará el sistema al recircularse hacia la corriente de aire del gasificador (ver figura 6.18).

La temperatura en la ciudad de Antofagasta varía entre 286 K (13 °C) y 294 K (21 °C). Sin embargo, la temperatura en el Barrio Industrial La Negra varía entre 276 K (3 °C) y 297 K (24 °C), por ubicarse en una zona de depresión intermedia. Para la corriente de entrada del aire se asumirá una temperatura de 289,15 K (16 °C). Este fluido saldrá a una temperatura de 553 K (280 °C).

Para obtener el volumen necesario de aire se calcula el  $C_p$  del aire por medio de:

$$Q_{\text{aire}} = \int_{280^\circ\text{C}}^{16^\circ\text{C}} C_p \cdot dT$$

Donde:

$$C_p(\text{kJ/mol} \cdot ^\circ\text{C}) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Los valores para cada constante son los de la tabla 6.21. Con esto se obtiene un resultado de 7,82 kJ/mol.

Tabla 6.21: Coeficientes de capacidad calorífica para el compuesto aire.

Compuesto	a	b	c	d
Aire	$2,89 \times 10^{-2}$	$4,15 \times 10^{-6}$	$3,19 \times 10^{-9}$	$-1,97 \times 10^{-12}$

Como se tiene que:

$$-Q_{\text{agua}} = Q_{\text{aire}}$$

Los moles del aire, considerando una eficiencia de 80% en cuanto a transferencia de energía, se obtienen de la siguiente forma:

$$-\frac{-110.726.428,87(\text{kJ})}{7,82 \cdot 0,8(\text{kJ/mol})} \cdot \frac{1}{1000} (\text{kmol/mol}) = 17.693,54(\text{kmol})$$

## 6.4. Determinar la factibilidad económica del diseño de la planta.

### 6.4.1. Evaluación económica

En la evaluación económica de la planta de valorización se ha considerado un horizonte de 20 años, financiado con 50% de capital propio y un 50% de préstamo bancario, el cual posee un plazo de 20 años. Se calculó el VAN, TIR y *payback* para 3 escenarios distintos (tabla 6.22). El valor de la tasa de interés bancaria otorgada en el último año se obtuvo del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, la cual corresponde en promedio a un 13%. Se definió este valor como el realista y el resto se asumió para dar como resultado aquel valor como promedio.

Tabla 6.22: Tasa de interés bancaria considerada para cada escenario.

Escenario	Tasa de interés
Optimista	8%
Realista	13%
Pesimista	18%

Las inversiones por maquinaria y contenedores para almacenamiento correspondientes a la inversión inicial de la planta se presentan en la tabla 6.23. Todos los costos de inversión corresponden a equipos cuya capacidad o flujo de entrada coincide con los calculados en el punto 6.3 de este documento. Las inversiones consideradas para las instalaciones en la planta se presentan en la tabla 6.24. Cabe mencionar, para la realización de los cálculos, se tomó como referencia el valor de 1 UF en 27.470,59 pesos chilenos (CLP), y el valor de 1 US\$ en 685,46 CLP. Ambos valores correspondientes al día 13 noviembre del 2018.

Tabla 6.23: Inversión en maquinaria.

Equipo	Cantidad	Valor unitario (UF)	Valor total(UF)
Triturador 1	1	224,26	224,26
Triturador 2	1	211,80	211,80
Separador magnético	1	124,59	124,59
Tire Handler	1	348,23	348,23

Continuación tabla 6.23: Inversión en maquinaria.

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario (UF)</b>	<b>Valor total(UF)</b>
Grúa horquilla	4	411,35	1.645,40
Cinta transportadora	4	83,73	334,90
Centrifuga	1	348,85	348,85
Gasificador	1	547,18	547,18
Turbina de vapor	1	323,93	323,93
Scrubber	1	474,10	474,10
Caldera-condensador	1	686,19	686,19
Intercambiador de calor	1	192,13	192,13
Bascula pesaje	1	8,73	8,73
Quemador	1	17,72	17,72
Bin	81	1,82	147,43
Tanque aceite	3	13,70	41,11
Contenedor PP	72	2,87	206,61
Contenedor metálico	10	8,32	83,23
		<b>Total UF</b>	<b>5.966,38</b>

Tabla 6.24: Costo de inversión en instalaciones.

<b>Instalaciones</b>	<b>Costo (UF)</b>
Terreno	4.201,90
Bodegas	2.002,14
Cañerías	1.028,95
Cercado	697,13
Caminos	522,85
Alambrado	385,86
Construcción	1.286,19
<b>Total UF</b>	<b>10.125,02</b>

Los costos por operaciones corresponden a la mano de obra, servicios, combustible y la mantención a los equipos, y se presenta en la tabla 6.25. En el caso de la mano de obra, este incluye el sueldo bruto, las capacitaciones y la entrega de equipos de protección personal y ropa de trabajo adecuada.

Tabla 6.25: Costos fijos operacionales considerados para la operación de la planta.

<b>Mano de Obra</b>	<b>Costo mensual (UF)</b>	<b>Costo anual (UF)</b>
Jefe Operaciones	74,63	895,50
Jefe Tratamiento líquidos/gases	60,1	720,77
Jefe almacenamiento/bodegas	38,22	458,67
5 Operadores grúas	154,71	1.856,53
Operador trituración	27,30	327,62
<b>Servicios</b>	<b>Costo mensual (UF)</b>	<b>Costo anual (UF)</b>
Electricidad	18,20	218,42
Agua	4,91	58,97
Disposición RESPEL	5,46	65,52
Disposición Negro de carbón	3,64	43,68
<b>Combustible</b>	<b>Costo mensual (UF)</b>	<b>Costo anual (UF)</b>
Combustible	1.610,54	19.326,42
<b>Mantención</b>	<b>Costo mensual (UF)</b>	<b>Costo anual (UF)</b>
Mantención maquinas	84,94	1.019,27
<b>TOTAL</b>	<b>2.082,62</b>	<b>24.991,39</b>

Se estima también que durante un cierto periodo de tiempo la materia prima se obtendrá sin costo por parte de las empresas mineras, debido a que se considera establecer alianzas estratégicas con estas empresas, apelando a la Ley REP, y así disminuir costos. Sin embargo, se considera luego que éstas venderán sus neumáticos usados a un precio análogo a la disposición final de residuos sólidos en el país, que corresponde en promedio a 11,43 \$US/ton según el Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe del año 2010, documento publicado por la

Organización Panamericana de la Salud (OPS), la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). El valor en UF por tonelada y el periodo de tiempo corresponde a lo estipulado en la tabla 6.26.

Tabla 6.26: Costo variable anual por los neumáticos que ingresarán a la planta.

Periodo	UF/ton	UF/año
1 a 10	0	0
11 a 20	0,285	889

En cuanto a los ingresos, estos se consideraron en base a la energía generada, a la venta total del acero y al costo de recepción de los neumáticos.

Para el valor por MWh generado en la planta, se calculó un promedio del costo marginal para la barra Alto Jahuel 220, actualizada en Agosto del presente año por Systepe, entre enero del 2014 hasta junio del 2018, dando un valor de 84,1 \$US/MWh.

COCHILCO publicó este año un informe que entrega un precio de 424 \$US/ton para el acero.

Actualmente, Cementos Melón cobra por la recepción de neumáticos 100 CLP por kilogramo (Ernst & Young, 2017). Para la evaluación económica del diseño de la planta se fijó un precio de 70.000 CLP por tonelada.

Los ingresos totales que tendrá la planta se presentan en la tabla 6.27. De esta tabla, se asume que para los años 1 al 4 los ingresos corresponderán a un 60%, 70%, 80% y 90% del total de la producción, respectivamente. Desde el año cinco hasta el final del periodo de evaluación los ingresos se mantienen estables.

Tabla 6.27: Ingresos por la gasificación de neumáticos.

<b>Venta</b>	<b>\$US/ton</b>	<b>ton/año</b>	<b>\$US/año</b>	<b>UF/año</b>
Acero	424	339,89	144.111,75	3.595,95
<b>Venta</b>	<b>\$US/MWh</b>	<b>MWh/año</b>	<b>\$US/año</b>	<b>UF/año</b>
Energía eléctrica	84,1	10.566,10	888.609,01	22.173,02
<b>Ingreso</b>	<b>CLP/ton</b>	<b>ton/año</b>	<b>CLP/año</b>	<b>UF/año</b>
Recepción NMFU	70.000	3.118,53	218.297.166,6	7.946,58

El VAN fue calculado con un 3% por sobre la tasa de interés bancario en cada escenario, y a continuación se presenta en la figura 6.25 un gráfico que muestra la variación de éste en función del interés bancario.

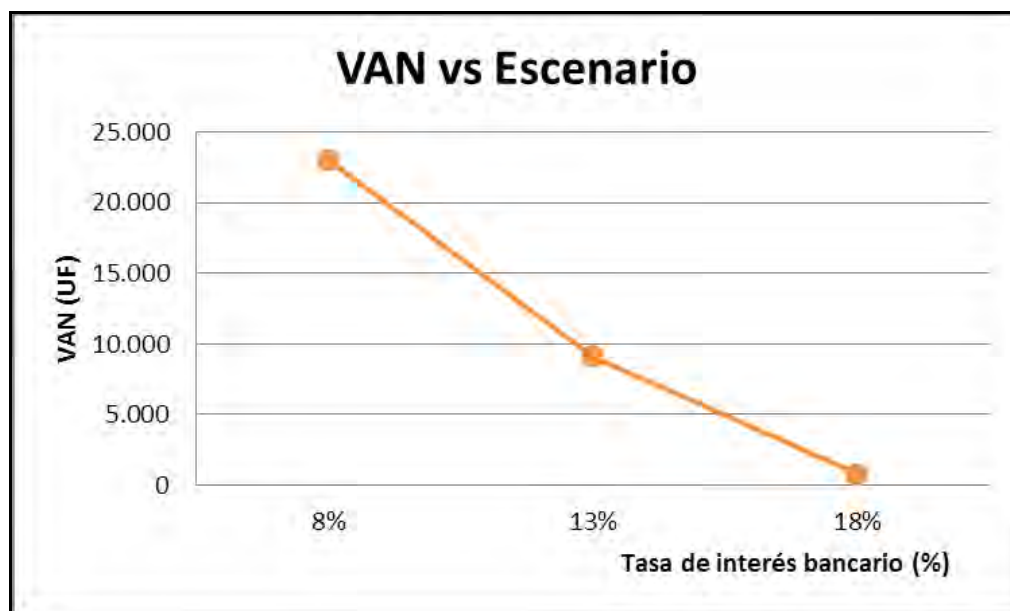


Figura 2.25: Gráfico de la variación del VAN en base a la tasa de interés bancario.

El valor del VAN junto con los indicadores económicos correspondientes para cada escenario se presentan en la tabla 6.28.

Tabla 6.28: Indicadores económicos para los tres escenarios.

Escenario	VAN (UF)	TIR (%)	Payback (año)
Optimista	23.062,07	26,12	5,01
Realista	9.109,86	23,96	5,35
Pesimista	773,98	21,87	5,75

De la tabla se obtiene que, para el escenario optimista, los indicadores económicos resultan ser los más atractivos, sin embargo, los valores del TIR y del *payback* difieren poco al ser comparados con el escenario pesimista, que en este caso es el menos favorable, aun así, con todas las consideraciones ya mencionadas, los tres escenarios son rentables.

Los flujos de caja correspondientes para cada escenario se presentan en las tablas 6.29, 6.30 y 6.31. Cabe mencionar que el capital de trabajo se calculó con el método del déficit económico (Sapag, 1989). La tabla de amortización y la de depreciación se presentan en el anexo 2 y 3, respectivamente.

Tabla 6.29: Flujo de caja para escenario optimista, valores en UF.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Ingresos</b>		20.229	23.601	26.972	30.344	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716
<b>Costo neumático</b>		0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Costos fijos operacionales</b>		-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991
<b>Depreciación</b>		-1.342	-1.342	-881	-394	-394	-132	-132	-132	-132
<b>Interés</b>		-773	-756	-738	-718	-697	-674	-649	-622	-593
<b>R° ANTES DE IMPUESTOS</b>		-6.877	-3.489	362	4.240	7.633	7.918	7.943	7.970	7.999
<b>Impuesto (25,5% Fuente SII)</b>		1.754	890	-92	-1.081	-1.946	-2.019	-2.025	-2.032	-2.040
<b>R° DEL EJERCICIO<sup>2</sup></b>		-5.124	-845	1.159	3.159	5.687	5.899	5.918	5.938	5.959
<b>Depreciación</b>		1.342	1.342	881	394	394	132	132	132	132
<b>Inversión inicial</b>	-16.091,41									
<b>Capital de trabajo</b>	-3.236									
<b>Préstamo</b>	9.664									
<b>Amortización de deuda</b>		211	228	246	266	287	310	335	362	391
<b>FLUJO DE CAJA</b>	-9.664	-3.570	725	2.287	3.819	6.368	6.341	6.385	6.431	6.482

<sup>2</sup>El pago de impuesto negativo se convierte en crédito para el año siguiente.

Tabla 6.29: Flujo de caja para escenario optimista, valores en UF, continuación.

Año	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Ingresos</b>	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716
<b>Costo neumático</b>	0	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889
<b>Costos fijos operacionales</b>	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991
<b>Depreciación</b>	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132
<b>Interés</b>	-562	-528	-492	-452	-410	-364	-314	-261	-203	-140	-73
<b>R° ANTES DE IMPUESTOS</b>	8.030	7.174	7.211	7.250	7.293	7.339	7.388	7.442	7.500	7.562	7.630
<b>Impuesto (25,5% Fuente SII)</b>	-2.048	-1.829	-1.839	-1.849	-1.860	-1.871	-1.884	-1.898	-1.912	-1.928	-1.946
<b>R° DEL EJERCICIO<sup>2</sup></b>	5.982	5.345	5.372	5.401	5.433	5.467	5.504	5.544	5.587	5.634	5.684
<b>Depreciación</b>	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
<b>Amortización de deuda</b>	422	456	492	532	574	620	670	723	781	844	911
<b>Capital de trabajo</b>											3.236
<b>FLUJO DE CAJA</b>	6.536	5.933	5.996	6.065	6.139	6.220	6.306	6.400	6.501	6.610	9.964

Tabla 6.30: Flujo de caja para el escenario realista, valores en UF.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Ingresos</b>		20.229	23.601	26.972	30.344	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716
<b>Costo neumático</b>		0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Costos fijos operacionales</b>		-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991
<b>Depreciación</b>		-1.342	-1.342	-881	-394	-394	-132	-132	-132	-132
<b>Interés</b>		-1.256	-1.241	-1.223	-1.203	-1.181	-1.156	-1.127	-1.095	-1.058
<b>R° ANTES DE IMPUESTOS</b>		-7.361	-3.973	-124	3.755	7.149	7.437	7.465	7.497	7.534
<b>Impuesto (25,5% Fuente SII)</b>		1.877	1.013	0	-958	-1.823	-1.896	-1.904	-1.912	-1.921
<b>R° DEL EJERCICIO<sup>2</sup></b>		-5.484	-1.083	890	2.798	5.326	5.540	5.562	5.586	5.613
<b>Depreciación</b>		1.342	1.342	881	394	394	132	132	132	132
<b>Inversión inicial</b>	-16.091,41									
<b>Capital de trabajo</b>	-3.236									
<b>Préstamo</b>	9.664									
<b>Amortización de deuda</b>		119	135	152	172	195	220	249	281	317
<b>FLUJO DE CAJA</b>	-9.664	-4.022	394	1.923	3.364	5.915	5.892	5.942	5.998	6.062

Tabla 6.30: Flujo de caja para el escenario realista, valores en UF, continuación.

Año	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Ingresos</b>	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716
<b>Costo neumático</b>	0	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889
<b>Costos fijos operacionales</b>	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991
<b>Depreciación</b>	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132
<b>Interés</b>	-1.017	-970	-918	-858	-791	-715	-629	-532	-422	-298	-158
<b>R° ANTES DE IMPUESTOS</b>	7.575	6.732	6.785	6.845	6.912	6.988	7.074	7.171	7.281	7.405	7.545
<b>Impuesto (25,5% Fuente SII)</b>	-1.932	-1.717	-1.730	-1.745	-1.763	-1.782	-1.804	-1.829	-1.857	-1.888	-1.924
<b>R° DEL EJERCICIO<sup>2</sup></b>	5.644	5.016	5.055	5.099	5.149	5.206	5.270	5.342	5.424	5.516	5.621
<b>Depreciación</b>	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
<b>Amortización de deuda</b>	359	405	458	517	585	661	747	844	953	1.077	1.217
<b>Capital de trabajo</b>											3.236
<b>FLUJO DE CAJA</b>	6.134	5.553	5.645	5.749	5.866	5.999	6.149	6.318	6.509	6.726	10.206

Tabla 6.31: Flujo de caja para el escenario pesimista, valores en UF.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingresos		20.229	23.601	26.972	30.344	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716
Costo neumático		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos fijos operacionales		-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991
Depreciación		-1.342	-1.342	-881	-394	-394	-132	-132	-132	-132
Interés		-1.739	-1.728	-1.714	-1.697	-1.678	-1.655	-1.627	-1.595	-1.558
<b>R° ANTES DE IMPUESTOS</b>		-7.844	-4.460	-614	3.261	6.653	6.938	6.965	6.997	7.035
Impuesto (25,5% Fuente SII)		2.000	1.137	0	-832	-1.696	-1.769	-1.776	-1.784	-1.794
<b>R° DEL EJERCICIO<sup>2</sup></b>		-5.844	-1.323	523	2.430	4.956	5.169	5.189	5.213	5.241
Depreciación		1.342	1.342	881	394	394	132	132	132	132
Inversión inicial	-16.091,41									
Capital de trabajo	-3.236									
Préstamo	9.664									
Amortización de deuda		66	78	92	108	128	151	178	210	248
<b>FLUJO DE CAJA</b>	-9.664	-4.435	97	1.497	2.932	5.478	5.451	5.499	5.554	5.620

Tabla 6.31: Flujo de caja para el escenario pesimista, valores en UF.

Año	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Ingresos</b>	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716	33.716
<b>Costo neumático</b>	0	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889	-889
<b>Costos fijos operacionales</b>	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991	-24.991
<b>Depreciación</b>	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132	-132
<b>Interés</b>	-1.513	-1.460	-1.398	-1.325	-1.239	-1.137	-1.016	-874	-707	-509	-275
<b>R° ANTES DE IMPUESTOS</b>	7.079	6.242	6.304	6.378	6.464	6.566	6.687	6.829	6.996	7.194	7.427
<b>Impuesto (25,5% Fuente SII)</b>	-1.805	-1.592	-1.608	-1.626	-1.648	-1.674	-1.705	-1.741	-1.784	-1.834	-1.894
<b>R° DEL EJERCICIO<sup>2</sup></b>	5.274	4.651	4.697	4.751	4.816	4.892	4.982	5.087	5.212	5.360	5.533
<b>Depreciación</b>	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
<b>Amortización de deuda</b>	292	345	407	480	567	669	789	931	1.099	1.297	1.530
<b>Capital de trabajo</b>											3.236
<b>FLUJO DE CAJA</b>	5.698	5.127	5.236	5.364	5.514	5.693	5.903	6.150	6.443	6.788	10.431

#### 6.4.2. Análisis de sensibilización

Para la sensibilización, se calculó el VAN para cada escenario variando por separado las siguientes dos alternativas:

1. Aumentar en un 20%, 40% y 60% la cantidad de neumáticos que entra al gasificador.
2. Aumentar y disminuir en un 2%, 5% y 8% el precio de la energía generada (MWh).

El gráfico de sensibilización para cada una de las alternativas se presenta en la figura 6.26 y figura 6.27 a continuación.

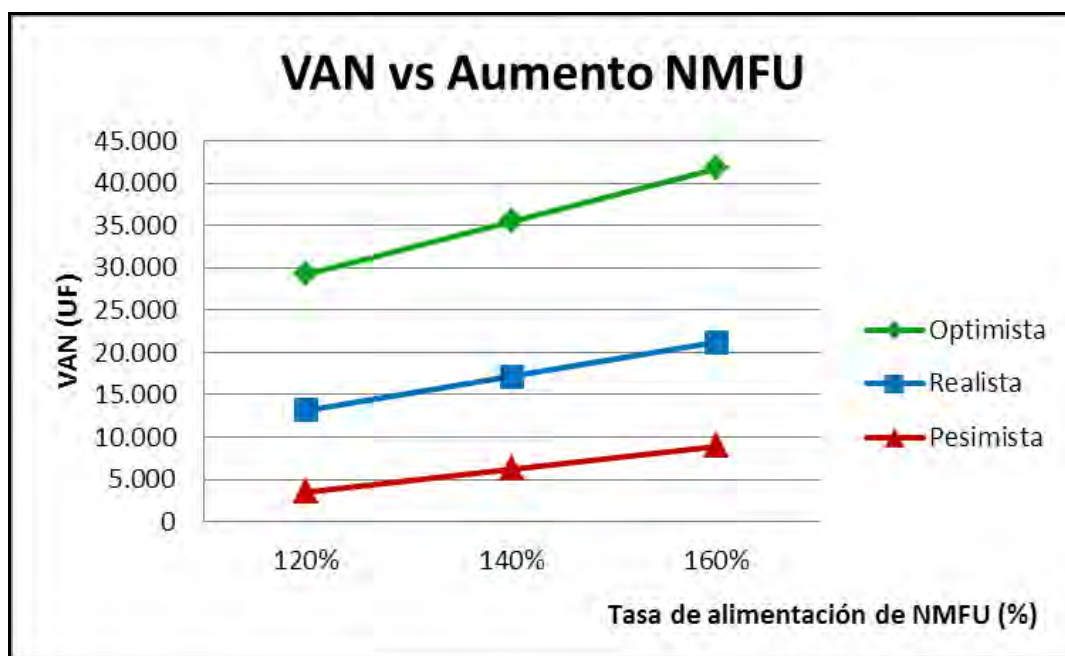


Figura 6.26: Gráfico de variación del VAN con el aumento de la quema de NMFU.

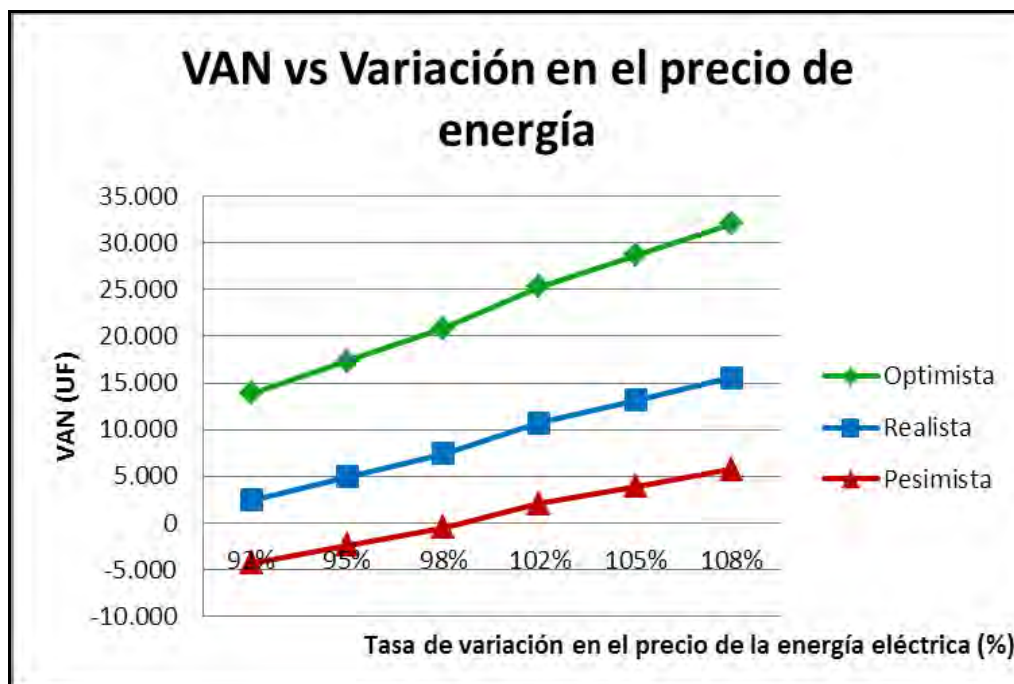


Figura 6.27: Gráfico de variación del VAN en base al precio de energía eléctrica.

## 7.DISCUSIÓN

La información sobre la generación de neumáticos mineros fuera de uso (NMFU) por empresa minera en Chile es escasa. Muchas de estas empresas desconocen la cantidad de neumáticos que generan por el desarrollo de sus actividades debido a que la mayoría contrata servicios externos de arriendos de vehículos, transporte y maquinaria, quienes se hacen cargo de las mantenciones<sup>3</sup>, por lo que la estimación debió realizarse de forma indirecta. Específicamente, la metodología utilizada se basó en las toneladas métricas finas producidas por cada minera en el año 2017. Lo anterior, dado que a juicio del sector, este indicador se considera estrechamente relacionado a la generación de NMFU, ya que el mineral explotado debe ser transportado por los vehículos mineros, absorbiendo este indicador alteraciones en los niveles de producción por motivos tales como huelgas, accidentes, venta de yacimientos, entre otros.

Si bien se consideran las fuentes de información empleadas para la estimación de generación de NMFU como confiables, tal como la Comisión Nacional del Cobre y el Ministerio del Medio Ambiente, su desagregación insuficiente obligó el uso de tres minerales metálicos y no el uso de datos pormenorizados a cada uno de los yacimientos considerados por el presente trabajo. Por lo anterior, la masa total de NMFU se vería incrementada al momento de incluir otras minerías como, por ejemplo, aquella dedicada a la producción de minerales no metálicos. No obstante lo anterior, el trabajar con una generación de NMFU subestimada representaría una potencial fortaleza al momento de implementar el proyecto propuesto, toda vez que la disponibilidad de este recurso sería mayor, y por ende una instalación de valorización energética de mayor capacidad.

En relación a las herramientas de gestión territorial que regulan el sector en el que se proyectó la implementación del proyecto, es posible observar que, para el Plan Regulador

---

<sup>3</sup> Según Sebastián Rojas Núñez en correo electrónico del 2 de agosto del 2018.

Comunal (PRC) de Antofagasta, tiene declarada la zona industrial alrededor de zonas residenciales y a menos de 700 metros de la costa, convirtiéndolo en algo riesgoso para la comunidad. Esto evidencia que como instrumento territorial los PRC no son del todo coherentes, ya sea por asignaciones inadecuadas o por falta de actualización. En cuanto a la selección de la ubicación para la planta, la metodología utilizada para evaluar estas alternativas se basó en las condiciones propias de los sitios, no incorporando elementos económicos relacionados con el transporte y/o distribución de materiales, energías y personal, dado que escapan a las competencias de ingeniero ambiental. Si bien, el sitio seleccionado correspondió a una zona especialmente dedicada a las actividades industriales, por lo que la planta no debiese tener problemas situándose allí, es posible que la incorporación de la variable costo de transporte, entre otras, pueda modificar esta selección.

El objetivo del diseño propuesto, como primera etapa, permite determinar temas de factibilidad ambiental del proyecto, identificación de potenciales debilidades y fortalezas que el proyecto pueda tener en relación con herramientas de ordenamiento territorial y hacia la comunidad, en el contexto del rol de la ingeniería ambiental. Por lo anterior, el diseño de la planta propuesto incluye suposiciones y consideraciones en cuanto a la eficiencia de los procesos y operaciones, las que deben ser revisadas y corroboradas en estudios ulteriores. Por consiguiente, previo a la construcción y puesta en marcha de la planta propuesta, será necesario el desarrollo de estudios desde distintas disciplinas hasta poder alcanzar una ingeniería de construcción. Estudios que incluirán, a modo de ejemplo y sin agotar el tema, pérdidas de calor de los equipos y líneas que transportan gases de combustión, recuperación efectiva de aceites desde el lavado de gases o costos de transporte hacia planta de los NMFU.

Para la evaluación económica, se consideró generar alianzas con las mineras generadoras de neumáticos mineros fuera de uso, ya que, actualmente, las empresas que utilizan los neumáticos usados como materia prima se han asociado a empresas generadoras,

otorgándoles una ventaja competitiva importante, lo que ha convertido su negocio en rentable (Olivares, 2016). Pese a estas asociaciones se consideró que la obtención de los neumáticos a partir del año 10 comenzaría a ser un costo, por lo que la planta debería evaluar la factibilidad de ampliar la producción ingresando uno o dos neumáticos más al día hacia el gasificador, que, por las dimensiones de las bodegas, es posible de realizar, ya que el diseño considera una capacidad máxima de almacenamiento de NMFU. Otra posibilidad podría ser comenzar a recibir neumáticos de menor diámetro sin costos asociados. Esto último ligado al reciente anteproyecto de decreto que establece metas de recolección y valorización para los neumáticos, publicado en octubre del presente año. Este documento establece que la región de Antofagasta, a partir del 2023, deberá cumplir con un porcentaje mínimo de recolección, el cual es de 2,7% (siendo el más alto, le sigue la región de Tarapacá con un 1%). En este mismo decreto, para los neumáticos de aro superior a 57 pulgadas (los de tipo OTR) se estableció una meta de recolección y valorización de 25% para el año 2021, un 75% para el 2024 y de un 100% para el 2026, periodos que se encuentran dentro del horizonte evaluado. Si bien el VAN para los tres escenarios evaluados resultó ser positivo, la planta podría considerar de igual manera estas consideraciones para los años siguientes al periodo evaluado y así seguir siendo rentable en el tiempo.

Los indicadores económicos para los tres escenarios evaluados fueron favorables, siendo el escenario optimista el más atractivo. El análisis de sensibilización indica que el VAN aumenta en cada escenario a medida que se queman más neumáticos. Esto es debido a que aumenta la producción, pero también se debe a que la inversión permanece constante, ya que los equipos seleccionados están sobre dimensionados. Sin embargo, quemar más neumáticos implica también aumentar los costos variables relacionados a la operación, es por esto que el VAN resulta ser más sensible a la variación en el precio de la energía generada, en comparación a aumentar la cantidad de neumáticos que entra al gasificador.

Instalar una planta de valorización energética de neumáticos mineros fuera de uso en Antofagasta implicaría aumentar la eficiencia del recurso, que en este caso es el carbón, lo que traería como consecuencia la probabilidad de que se aumente el consumo de energía, y por ende, el uso de este mismo recurso, sobre todo si se considera que las generadoras de energía eléctrica en el norte grande del país son a fuente de carbón. Esto es conocido como efecto rebote o paradoja de Jevons, cuyo concepto se refiere a que avanzar en tecnologías con el fin de mejorar la eficiencia energética puede, desde una perspectiva global, aumentar el consumo total de energía (Ruiz D., Martínez J. & Figueroa A., 2015). Con esto en mente, para hablar de eficiencia energética en su totalidad es necesario incorporar esta concepto en el análisis, ya sea para políticas públicas o para proyectos energéticos.

---

## 8.CONCLUSIONES

La valorización energética es el penúltimo proceso en la jerarquización de los residuos que se define en la Ley 20.920 y en este trabajo se analizó la factibilidad de valorizar los neumáticos mineros fuera de uso, un residuo que actualmente en el país se genera en grandes cantidades, por lo que una planta de estas características otorgaría una solución al problema que conlleva el acopio de neumáticos en extensos terrenos, con el riesgo que aquello involucra.

La planta se diseñó para valorizar 3.118,53 toneladas anuales de neumáticos mineros en desuso, que equivalen al 40% de la demanda proyectada para la provincia de Antofagasta para el año 2020, valor obtenido de una estimación relacionada a la producción anual en el año 2017 de las grandes mineras que explotan minerales metálicos. Se propone el Barrio Industrial La Negra como ubicación para la planta, el cual se ajusta a lo establecido en la guía para localizar rellenos de seguridad elaborado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Las consideraciones establecidas permitieron el diseño de la planta de forma conceptual y la selección de los equipos involucrados permite al diseño hacerse cargo del proceso en su totalidad, es decir, desde que entra el neumático y salen los residuos y la energía en forma de trabajo. En cuanto a la energía eléctrica generada, se determinó en 1.206,18 kW al día. Económicamente el diseño de la planta es viable para los tres escenarios evaluados dentro de un periodo de 20 años, dando un VAN de 23.062 UF, un TIR de 26,12% y un *payback* (periodo de recuperación) de 5,01 años bajo un escenario optimista; un VAN de 9.109 UF, un TIR de 23,96% y un *payback* de 5,35 años bajo un escenario realista; y un VAN de 773 UF, un TIR de 21,87% y un *payback* de 5,75 años bajo un escenario pesimista.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Internacional de Negro de Carbón (ICBA). 2016. Guía del Usuario de Negro de Carbón. 32 páginas.
- C Y V Medioambiente LTDA. Chile. 2008. Diagnóstico Fabricación, Importación y Distribución de Neumáticos y Manejo de Neumáticos Fuera de Uso. 122 páginas.
- CalRecovery, Inc. Estados Unidos. 1995. Final Report: Environmental Factors of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction. 145 páginas.
- Cámara de la Industria del Neumático de Chile & Consejo Nacional de Producción Limpia. Chile. 2009. Acuerdo de Producción Limpia: Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso. 23 páginas.
- Céspedes J. 2014. Investigación Experimental de la Combustión y Gasificación de Neumáticos Fuera de Uso. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- CINC. 2013. Evaluación de Impacto APL: Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso. 64 páginas.
- CINC. 2017. Estadísticas de generación y tratamiento de NFU. Santiago, Chile. Recuperado de: [cinc.cl/wp-content/uploads/2017/08/170829-Estad%C3%ADsticas-de-generaci%C3%B3n-y-tratamiento-de-NFU.pdf](http://cinc.cl/wp-content/uploads/2017/08/170829-Estad%C3%ADsticas-de-generaci%C3%B3n-y-tratamiento-de-NFU.pdf)
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2014. Productividad en la Industria Minera en Chile. 25 páginas.
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2017. Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1998-2017. 166 páginas.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. Chile. 2005. Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos. 17 de Enero de 2005. 71 páginas.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. Chile. 2010. Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile. 60 páginas.
- Downard J. 2014. Particulate Emissions of Tire Combustión. (Tesis de maestría). Universidad de Iowa, Iowa, Estados Unidos.

- Ernst & Young. 2017. Asesoría para la Implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en Chile. Sector automotriz. 155 páginas.
- Franciskovic M. 2012. Desarrollo Sostenible, un concepto de este tiempo. *Vox Juris*. 24(2). 127-128.
- Helsen L., y Bosmans A. 2010. Wate-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. *First Int. Symposium on Enhanced Landfill Mining*. Houthalen-Helchteren, Bélgica.
- Integrated Environmental Management Services, S.A. de C.V. Estados Unidos. 2012. Estudio del flujo de llantas en la región fronteriza Texas-México. 120 páginas.
- Gescam S.A. Chile. 2017. Antecedentes para la Elaboración de Análisis Económicos de Metas de Recolección y Valorización para los Productos Prioritarios Neumáticos, Baterías y Aceites Lubricantes, Contenidos en la Ley 20.920. 332 páginas.
- Ministerio de Energía. Chile. 2015. Política Energética de Chile. 152 páginas.
- Ministerio del Medio Ambiente. Chile. 2017. Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente. 198 páginas.
- Muzenda E. Noviembre 2014. A Comparative Review of Waste Tyre Pyrolysis, Gasification and Liquefaction (PGL) Processes. Conf. on Chemical Engineering & Advanced Computational Technologies. Pretoria, South Africa.
- Olivares C. 2016. Planta de reciclaje de neumáticos de caucho. (Tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- OpenCourseWare. 2010. Historia Económica Mundial. Cantabria, España: Universidad de Cantabria. Recuperado de: [ocw.unican.es/pluginfile.php/1213/course/section/1495/MC-II-3.pdf](http://ocw.unican.es/pluginfile.php/1213/course/section/1495/MC-II-3.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2005. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005: Chile, Informe Nacional. 59 páginas.
- Rondón H. y Reyes F. 2015. Pavimentos: Materiales, construcción y diseño. Colombia. Ecoe Ediciones.

- Ruiz D., Martínez J. & Figueroa A. 2015. Importancia del “efecto rebote” o paradoja de Jevons en el diseño de la política ambiental. *Revista Ingenierías*. 14(27), 49-59.
- Sahim O., y Kirim Y. 2018. *Comprehensive Energy Systems*. Elsevier. 2(31), 1035-1037.
- Sapag Nassir. 1993. *Preparación y evaluación de proyectos*. Segunda Edición. México. McGraw-Hill Interamericana. 390 páginas.
- Segura Paula. 2018. *Prefactibilidad de alternativas de almacenamiento y tratamiento para residuos peligrosos provenientes de talleres mecánicos en la comuna de Rengo*. (Tesis de pregrado). Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). 2017. *Anuario de la Minería de Chile*. 274 páginas.
- Tirel K. 2017. *Ingeniería de Perfil de Modernas Plantas para Reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)*. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- UNEP/CHW.9/18. 2008. *Revised Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of Used Tyres*.
- Unión Europea. Comunidad Europea. 2008. *Directiva 2008/98/CE*. Diario Oficial de la Unión Europea. 19 de Noviembre de 2008.
- Villafior G., V. Morales G. & Velasco J., 2008. Variables significativas del proceso de combustión de gas natural. *Información tecnológica* Vol. 19(4), 57-62.

## 10. ANEXOS

### Anexo 1: Consideraciones sobre el ingreso a la planta.

Consideraciones	Cantidad	Unidad
Llegada mínima de NMFU a la planta	6	día hábil
Mínima capacidad a almacenar de NMFU	60	NMFU
Flujo de 70 NMFU	11.321,5	kg/día
Entrada al gasificador	8.543,92	kg/día
Acumulación mínima en A. transitorio	2.777,57	kg
Máxima cantidad NMFU a almacenar	96	NMFU
Flujo con 96 NMFU	18.114,38	kg/día
Acumulación máxima en A. transitorio	9.570,46	kg/día
NMFU a triturar	6	día hábil
NMFU a triturar con máxima capacidad	8	día

## Anexo 2: Amortizaciones

Tabla de amortización con un 8% de interés bancario. Valores en UF.

	Saldo Deuda	Cuota	Interés	Amortización
<b>Año 0</b>				9.664
<b>Año 1</b>	9.664	984	773	211
<b>Año 2</b>	9.453	984	756	228
<b>Año 3</b>	9.224	984	738	246
<b>Año 4</b>	8.978	984	718	266
<b>Año 5</b>	8.712	984	697	287
<b>Año 6</b>	8.425	984	674	310
<b>Año 7</b>	8.115	984	649	335
<b>Año 8</b>	7.779	984	622	362
<b>Año 9</b>	7.418	984	593	391
<b>Año 10</b>	7.027	984	562	422
<b>Año 11</b>	6.605	984	528	456
<b>Año 12</b>	6.149	984	492	492
<b>Año 13</b>	5.656	984	452	532
<b>Año 14</b>	5.124	984	410	574
<b>Año 15</b>	4.550	984	364	620
<b>Año 16</b>	3.930	984	314	670
<b>Año 17</b>	3.260	984	261	723
<b>Año 18</b>	2.537	984	203	781
<b>Año 19</b>	1.755	984	140	844
<b>Año 20</b>	911	984	73	911

Tabla de amortización para un interés bancario de 13%. Valores en UF.

	Saldo Deuda	Cuota	Interés	Amortización
<b>Año 0</b>				9.664
<b>Año 1</b>	9.664	1.376	1.256	119
<b>Año 2</b>	9.544	1.376	1.241	135
<b>Año 3</b>	9.409	1.376	1.223	152
<b>Año 4</b>	9.257	1.376	1.203	172
<b>Año 5</b>	9.085	1.376	1.181	195
<b>Año 6</b>	8.890	1.376	1.156	220
<b>Año 7</b>	8.670	1.376	1.127	249
<b>Año 8</b>	8.422	1.376	1.095	281
<b>Año 9</b>	8.141	1.376	1.058	317
<b>Año 10</b>	7.823	1.376	1.017	359

Continuación tabla de amortización para un interés bancario de 13%. Valores en UF.

	<b>Saldo Deuda</b>	<b>Cuota</b>	<b>Interés</b>	<b>Amortización</b>
<b>Año 11</b>	7.465	1.376	970	405
<b>Año 12</b>	7.059	1.376	918	458
<b>Año 13</b>	6.602	1.376	858	517
<b>Año 14</b>	6.084	1.376	791	585
<b>Año 15</b>	5.499	1.376	715	661
<b>Año 16</b>	4.839	1.376	629	747
<b>Año 17</b>	4.092	1.376	532	844
<b>Año 18</b>	3.248	1.376	422	953
<b>Año 19</b>	2.295	1.376	298	1.077
<b>Año 20</b>	1.217	1.376	158	1.217

Tabla de amortización para un interés bancario de 18%. Valores en UF.

	<b>Saldo Deuda</b>	<b>Cuota</b>	<b>Interés</b>	<b>Amortización</b>
<b>Año 0</b>				9.664
<b>Año 1</b>	9.664	1.805	1.739	66
<b>Año 2</b>	9.598	1.805	1.728	78
<b>Año 3</b>	9.520	1.805	1.714	92
<b>Año 4</b>	9.428	1.805	1.697	108
<b>Año 5</b>	9.320	1.805	1.678	128
<b>Año 6</b>	9.192	1.805	1.655	151
<b>Año 7</b>	9.041	1.805	1.627	178
<b>Año 8</b>	8.864	1.805	1.595	210
<b>Año 9</b>	8.654	1.805	1.558	248
<b>Año 10</b>	8.406	1.805	1.513	292
<b>Año 11</b>	8.114	1.805	1.460	345
<b>Año 12</b>	7.769	1.805	1.398	407
<b>Año 13</b>	7.362	1.805	1.325	480
<b>Año 14</b>	6.881	1.805	1.239	567
<b>Año 15</b>	6.314	1.805	1.137	669
<b>Año 16</b>	5.646	1.805	1.016	789
<b>Año 17</b>	4.857	1.805	874	931
<b>Año 18</b>	3.925	1.805	707	1.099
<b>Año 19</b>	2.827	1.805	509	1.297
<b>Año 20</b>	1.530	1.805	275	1.530

### Anexo 3: Depreciación

Los años de vida útil se obtuvieron de la página web del Servicio de Impuesto Interno.

Equipo	Costo	Año vida útil	Valor residual	Depreciación anual
Triturador 1	224,26	5	80	30
Triturador 2	211,80	5	86	26
Separador magnético	124,59	5	63	13
Tire Handler	348,23	3	124	77
Grúa horquilla	1.645,40	2	736	468
Cinta transportadora	334,90	5	41	60
Centrifuga	348,85	5	89	53
Gasificador	547,18	3	167	130
Turbina de vapor	323,93	3	115	71
Scrubber	474,10	5	72	82
Caldera-condensador	686,19	3	181	172
Intercambiador de calor	192,13	3	59	46
Bascula pesaje	8,73	5	4	1
Quemador	17,72	5	7	2
Construcción + cañerías	2.315,15	80	353	25
Camino	522,85	20	80	23
Bodegas	2.002,14	20	305	86