



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA**

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE PROYECTO DE  
PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO SÓLIDO A PARTIR  
DE RESIDUOS INDUSTRIALES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA**

**VALERIA DENISSE PROBOSTE SOBARZO**

**PROFESOR GUÍA:  
FRANCISCO GRACIA CAROCA**

**PROFESOR CO-GUÍA:  
FELIPE DÍAZ ALVARADO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JUAN CARLOS ESPINOZA SEGOVIA  
ENZO VERGARA ROLDÁN**

**SANTIAGO DE CHILE  
Marzo 2014**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA  
CIVIL QUÍMICA  
POR: VALERIA PROBOSTE S.  
FECHA: 27/03/14  
PROF. GUÍA: FRANCISCO GRACIA C.

## **EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO SÓLIDO A PARTIR DE RESIDUOS INDUSTRIALES**

La presente memoria evalúa el proyecto de producción de Combustible Alternativo Sólido (CAS), el cual encuentra su motivación en los crecientes requerimientos energéticos del país, en la necesidad de diversificar la matriz energética y en las escasas alternativas para la gestión de los residuos en Chile. Para enfrentar dicha realidad, se propone una alternativa para el tratamiento y gestión de los residuos, que corresponde a su co-procesamiento en la industria cementera, disminuyendo el porcentaje de desechos que se dispone en depósitos de seguridad o rellenos sanitarios.

El proyecto considera como materia prima a aquellos residuos industriales que posean alto poder calorífico, bajo contenido de cloro y de otros compuestos, que dañan la operación de los hornos rotatorios, donde se ingresará el producto para ser utilizado como insumo energético.

El estudio de mercado, determina que existe materia prima disponible en el mercado actual de residuos. El diseño de la planta considera un flujo de materia prima igual a 2,7[ton/h], el cual logra cubrir la demanda estimada de CAS.

La materia prima se somete a etapas de separación por tamaño, trituración, mezclado, separación de metales, una nueva separación por tamaño y un mezclado final entre materiales sólidos y líquidos, logrando con ello producir 2,36[ton/h] de CAS.

Gracias a la evaluación social y ambiental, se identifican beneficios del proyecto, como la reducción de residuos en Chile y el aumento de la vida útil de los depósitos de seguridad y rellenos sanitarios presentes en el país.

Finalmente se concluye que sólo es recomendable realizar el proyecto, bajo ciertos supuestos del precio de venta, por lo que se deben acordar previamente tarifas con clientes para lograr aquellas tarifas que sustenten el proyecto. También es importante mencionar que el proyecto tiene aportes que superan lo exclusivamente económico, que se describen en el análisis integral, donde se utilizó la herramienta HAIN.

## Agradecimientos

Antes que todo, agradecer a mi familia, a mis padres y a mi hermano, por creer en mí y por darme toda su confianza. Gracias por acompañarme y apoyarme siempre, por las palabras de aliento y por la fuerza para seguir adelante en todo momento. Especialmente tengo que agradecer a mis padres por ser como son, por llenarme de orgullo y por entregarme tanto amor. Les agradezco enormemente también que a pesar de estar lejos físicamente, siempre han sabido cómo hacer que los sienta a mi lado.

Agradezco a la vida por encontrar a los amigos y amigas que tengo, les agradezco a cada uno por estar presente en los buenos y malos momentos, por todos los momentos compartidos y por los que vendrán. Considerando la ocasión, especialmente gracias a mis amigos desde el primer año de universidad, Camila San Miguel, Sebastián Avalos, Yerko Martínez, Iván Fuentes y Emilio Moreno, gracias por haber hecho de estos años, una época increíble, llena de anécdotas y buenos recuerdos que no cambiaría por nada, sin su apoyo desde los primeros días creo que nada de esto hubiese sido posible. Tengo que nombrar también a Trinidad Cortes, en poco tiempo te has convertido en una excelente amiga, agradeceré eternamente al destino por haberte puesto en mi camino en esta etapa de mi vida.

A mis amigos y compañeros de carrera, gracias por todo el cariño y el apoyo que me han entregado, en estos cuatro años logramos crear y mantener un ambiente increíble, que estoy segura es muy difícil de dar en un grupo de personas tan diversas. Tengo que destacar a Bayron Cayunao y Guillermo Valenzuela, eternos compañeros de grupos de trabajo, gracias por los buenos momentos y la comprensión en los periodos estresantes de la carrera. También, agradezco muy especialmente a cada uno de los integrantes del grupo de memoristas, por la compañía, el apoyo y la ayuda, no me detendré a nombrarlos a todos por espacio, pero estoy segura que se sentirán identificados.

Agradezco a todas las personas de Hidronor Chile S.A. que ayudaron al desarrollo de esta memoria. Tengo que agradecer también a la secuencia de hechos afortunados que me han llevado a formar parte de este equipo de trabajo, pues he encontrado excelentes personas que me han guiado y ayudado en todo lo que he necesitado, no solo para el desarrollo de mi memoria, sino que también para desempeñarme de la mejor forma en mi primera experiencia laboral. Destaco especialmente y con mucho cariño a Juan Carlos Espinoza y Enzo Vergara por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, por haberme guiado y aconsejado durante todos estos meses permitiendo alcanzar mis objetivos. También quiero agradecer a don Raúl Campos, por su buena disposición a enseñar y compartir su conocimiento, a Carolina Gálvez por su amistad y a toda la casona por el grato ambiente al que me integraron.

Por último, agradecer a mis profesores, a Francisco Gracia por aceptar tomar esta memoria y a Felipe Díaz, quién fue y seguirá siendo una gran referencia en mi formación como ingeniera, no me queda más que agradecerte por la excelente disposición, por el tiempo, el apoyo y los innumerables consejos.

# Tabla de contenido

Índice de tablas .....	VI
Índice de figuras .....	VII
Capítulo 1. Introducción .....	8
1.1. Motivación .....	8
1.2. Descripción del proyecto.....	9
1.3. Objetivos .....	10
1.4. Alcances.....	10
Capítulo 2. Antecedentes Generales .....	11
2.1. Residuos y Valorización .....	11
2.2. Co-procesamiento .....	13
2.3. Contexto de la Industria del cemento.....	14
2.4. Co-procesamiento en la industria del cemento .....	15
2.4.1. Residuos Valorizables.....	16
2.4.2. Antecedentes nacionales e internacionales.....	17
2.5. Evaluación y comparación de proyectos.....	18
2.5.1. Valor actual neto (VAN).....	18
2.5.2. Tasa interna de retorno (TIR) .....	19
2.5.3. Período de recuperación de capital (PRC).....	20
2.5.4. HAIN .....	20
Capítulo 3. Estudio de Mercado .....	21
3.1. Estudio sobre mercado de clientes .....	21
3.1.1. Descripción del proceso de producción del cliente .....	23
3.2. Estudio sobre mercado de proveedores de materias primas .....	25
3.3. Discusiones estudio de mercado.....	28
3.4. Conclusiones del estudio de mercado.....	28
Capítulo 4. Estudio Técnico .....	30
4.1. Ubicación de la planta.....	30
4.1.1. Transporte .....	30
4.1.2. Normativa Ambiental Aplicable .....	33
4.1.3. Discusiones Ubicación de la planta .....	36
4.2. Caracterización materia prima.....	37
4.2.1. Poder calorífico .....	39

4.2.2.	Humedad .....	42
4.2.3.	Densidad aparente .....	42
4.2.4.	Granulometría .....	43
4.2.5.	Discusiones Caracterización materia prima .....	44
4.3.	Determinación del caso base .....	44
4.3.1.	Discusiones Caso base .....	49
4.4.	Determinación etapas del proceso y condiciones de operación .....	49
4.4.1.	Separación 1 .....	50
4.4.2.	Reducción de tamaño 1 .....	51
4.4.3.	Mezclado 1 .....	52
4.4.4.	Separación 2 .....	52
4.4.5.	Separación 3 .....	53
4.4.6.	Mezclado 2 .....	53
4.4.7.	Condiciones de operación .....	54
4.4.8.	Discusiones Etapas del proceso y Condiciones de operación .....	54
4.5.	Selección y Dimensionamiento de equipos, BM y BE .....	55
4.5.1.	Operaciones unitarias .....	55
4.5.2.	Transporte de materiales .....	63
4.5.3.	Discusiones Selección y Dimensionamiento de equipos, BM y BE .....	64
4.6.	Layout .....	64
4.6.1.	Discusiones Layout .....	65
4.7.	Conclusiones Estudio Técnico .....	66
Capítulo 5.	Evaluación del Proyecto .....	67
5.1.	Evaluación económica .....	67
5.1.1.	Modelo de Negocios .....	67
5.1.2.	Cálculo CAPEX .....	67
5.1.3.	Cálculo OPEX .....	68
5.1.4.	Ingresos y beneficios .....	68
5.1.5.	Flujo de caja y cálculo indicadores económicos .....	68
5.1.6.	Análisis de sensibilidad .....	69
5.1.7.	Discusiones Evaluación Económica .....	69
5.2.	Evaluación integral: HAIN .....	69
5.3.	Conclusiones Evaluación del Proyecto .....	73
Capítulo 6.	Conclusiones .....	75

Bibliografía .....	77
Anexos.....	81
Anexo A. Estimación costos de transporte	
Anexo B. Estimación poder calorífico residuos modelo	
Anexo C. Diagrama de flujos	
Anexo D. Metodología balance de masa	
Anexo E. Dimensionamiento teórico cintas transportadores y bomba centrifuga	
Anexo F. Dimensionamiento zonas de acopio y tanque de almacenamiento de MLC	
Anexo G. Layout	

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Interpretación del VAN.....	19
Tabla 3.1: Valores límites de los parámetros fisicoquímicos del CAS que se puede incorporar al proceso de fabricación de cemento en Planta Teno [16] .....	22
Tabla 3.2: Contenido Base de datos año 2012 Hidronor Chile S.A. ....	25
Tabla 3.3: Rubros generadores de residuos valorizables.....	26
Tabla 3.4: Selección de rubros generadores de residuos valorizables .....	27
Tabla 3.5: Empresas modelo por rubros .....	27
Tabla 4.1: Normativa ambiental.....	33
Tabla 4.2: Contenido de Base de datos acotada del año 2012 de Hidronor Chile S.A.....	37
Tabla 4.3: Clasificación de los Residuos de la Base de datos acotada .....	38
Tabla 4.4: Residuos modelo .....	38
Tabla 4.5: Estimación Poder Calorífico Inferior (PCI) Residuos Modelo .....	41
Tabla 4.6: Resultados experimentales análisis de humedad .....	42
Tabla 4.7: Resultados experimentales medición densidad aparente .....	43
Tabla 4.8: Granulometría empírica .....	43
Tabla 4.9: Proyección recepción de residuos valorizables.....	45
Tabla 4.10: Horas trabajadas y flujo CAS demandado por Cementos Bío Bío (CBB) Teno .....	45
Tabla 4.11: Proyección demanda CAS por CBB Teno para 10 años .....	46
Tabla 4.12: Posibles horas anuales de trabajo en planta CAS.....	46
Tabla 4.13: Cálculo flujo de diseño planta producción de CAS.....	47
Tabla 4.14: Composición flujo de entrada al proceso.....	48
Tabla 4.15: Medidas equipos e instalaciones planta .....	64

## Índice de figuras

Figura 2.1: Generación de Residuos Industriales en Chile período 2000-2009 [1].....	11
Figura 2.2: Porcentaje de residuos valorizados sobre el total de residuos valorizables en Chile [1] .....	13
Figura 2.3: Evolución de emisiones de CO <sub>2</sub> v/s producción de cemento en Chile [7].....	15
Figura 2.4: Porcentaje de sustitución (energía) de combustibles fósiles por alternativos en la industria cementera europea (2004) [13].....	18
Figura 3.1: Esquema Proceso Producción de Cemento en Planta Teno [16].....	24
Figura 4.1: Esquema Alternativa 1 .....	31
Figura 4.2: Esquema Alternativa 2 .....	32
Figura 4.3: Datos históricos recepción de residuos Planta Pudahuel .....	45
Figura 4.4: Esquema Etapa 1 .....	51
Figura 4.5: Esquema Etapa 2 .....	51
Figura 4.6: Esquema Etapa 3 .....	52
Figura 4.7: Esquema Etapa 4 .....	52
Figura 4.8: Esquema Etapa 5 .....	53
Figura 4.9: Esquema Etapa 6 .....	53
Figura 4.10: Diagrama de bloques del proceso.....	54
Figura 4.11: Esquema partes trituradora. ....	58
Figura 4.12: Esquema Tritotutto modelo 100/80D (medidas en centímetros) [26].....	58
Figura 4.13: Esquema Mezclador de doble eje para sólidos.....	60

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación

A nivel mundial, los residuos son un tema de suma relevancia, puesto que requieren integrar un sistema que permita enfrentar la gestión de los mismos de manera sustentable y bajo las normas ambientales establecidas en cada país.

En 1989, la EPA (Environmental Protection Agency) adoptó una jerarquía de prácticas de administración de residuos, que estaban orientadas a establecer una guía para las comunidades durante la elaboración de planes de gestión de residuos. La mencionada política fue adoptada por las entidades gubernamentales chilenas, y ha sido reflejada en el Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile, donde se establece la siguiente jerarquía de gestión [1]:

- A. Prevención
- B. Reutilización
- C. Reciclaje
- D. Valorización Energética
- E. Eliminación

El fuerte crecimiento económico de Chile en los últimos años ha provocado un aumento en el volumen de residuos generados, siendo el vertido de los mismos, incontrolado en muchas ocasiones, el sistema de tratamiento más extendido frente a otras opciones más sostenibles como la recuperación.

La vía de gestión menos recomendable para los residuos, debido a su mayor impacto ambiental, es la eliminación, que tiene como efecto directo el condicionar el futuro de las áreas geográficas en que se realiza. Otra vía de gestión poco recomendable es la incineración, ya que además de requerir la construcción de plantas específicas para su funcionamiento, generan nuevos residuos como escorias, cenizas, gases, etc.

Diversas instituciones internacionales, entre ellas algunas a las que se ha adscrito nuestro país, como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), están presionando cada vez con más fuerza para que la eliminación y el vertido en particular, deje de ser una herramienta de gestión de residuos [2]. Esto pone de manifiesto la necesidad de realizar mayores esfuerzos en Chile para acercarse a los objetivos de gestión de residuos implantados a nivel mundial.

La valorización material<sup>1</sup> y, especialmente, la energética<sup>2</sup>, son alternativas escasamente implantadas en el país, y en este sentido el sector cementero aporta un nicho de aplicación muy atractivo, ya que al incorporar ciertos residuos en el proceso de fabricación de cemento se posibilita el reciclado y valorización energética de los mismos. En adelante, a la integración de ambos tipos de valorizaciones en un mismo proceso productivo se le llamará co-procesamiento.

Por otro lado, la fuerte crisis energética que se ha comenzado a gestar hace algunos años, abre las puertas a proyectos que involucren fuentes de energía alternativas a los combustibles tradicionales, lo que insta a empresas de los rubros que posean procesos con alto requerimiento de calor a estudiar la viabilidad de la incorporación de residuos como materia prima energética.

Es necesario destacar, que la valorización energética de residuos peligrosos, y por extensión los no peligrosos, es considerada por el Convenio de Basilea como una alternativa viable para la disposición final de estos [1]. En el mismo sentido, se destaca que la Unión Europea ha establecido, para la fabricación de cemento, el uso del co-procesamiento como Mejor Técnica Disponible [3].

## **1.2. Descripción del proyecto**

El presente trabajo nace de la necesidad de Hidronor Chile S.A. de estudiar alternativas de tratamiento y disposición para los residuos industriales que reciben actualmente. Hidronor es la empresa de gestión de residuos más grande del país, con plantas ubicadas en las cercanías de la ciudad de Antofagasta, Concepción y Santiago.

La alternativa en estudio se basa en un proyecto de producción de un Combustible Alternativo Sólido (CAS) a partir de residuos industriales para ser, finalmente, co-procesado en una aplicación industrial presente en la zona central del país. De ser positivo el resultado de la evaluación, este proyecto representará una nueva alternativa de tratamiento para los residuos industriales con poder calorífico y una nueva fuente energética para el proceso de producción involucrado.

El proyecto abarca una etapa de captación de residuos como materia prima, etapas de clasificación, pretratamiento y tratamiento de los mismos, para, finalmente, ser transformados en un combustible alternativo.

---

<sup>1</sup> Valorización del material constituyente de los residuos.

<sup>2</sup> Uso de residuos combustibles para generar energía a través de su combustión.

### 1.3. **Objetivos**

El objetivo de este trabajo de título es realizar una evaluación técnica y económica a un proyecto de producción de combustible alternativo sólido a partir de residuos industriales. En específico, se espera lo siguiente:

- Estudiar el mercado nacional de industrias generadoras de residuos industriales peligrosos y no peligrosos, para estimar el potencial valorizable y disponibilidad de cada tipo de residuo generado.
- Decidir la especificación del producto a comercializar.
- Desarrollar ingeniería conceptual de la planta de producción de CAS.
- Evaluar el proyecto.

### 1.4. **Alcances**

Se espera entregar el resultado de la evaluación técnica y económica del proyecto a nivel de pre-factibilidad, realizando una ingeniería conceptual, determinando si es recomendable para la empresa que encargó este estudio, Hidronor Chile S.A., avanzar a las siguientes etapas: ingeniería básica e ingeniería de detalle, y con ello realizar una evaluación a nivel de factibilidad.

El estudio de mercado se realizará con la información disponible la fecha, minimizando al máximo el uso de supuestos. Esto se llevará a cabo gracias a que la empresa Hidronor Chile S.A. entregará información substancial para el desarrollo del proyecto, ya que recibe los residuos de gran parte de la industria en la región Metropolitana y regiones colindantes, debido a, como se mencionó anteriormente, su liderazgo en el mercado actual de tratamiento de residuos industriales peligrosos y no peligrosos. Se espera estimar, específicamente a las potenciales empresas proveedoras, además de una estimación del flujo disponible de residuos valorizables.

Entre los alcances del estudio técnico y económico se encuentra obtener una descripción de las etapas y equipos del proceso de producción, una ubicación potencial para la planta y una estimación de los costos de inversión y operación del proyecto, para con ello sostener una evaluación de pre-factibilidad.

## Capítulo 2. Antecedentes Generales

Esta sección tiene por objetivo introducir al lector en la temática a abordar, para posteriormente estudiar a fondo el co-procesamiento en la industria seleccionada: la cementera. A modo de comparación, se analizará lo que ocurre en otros países en cuanto a esta aplicación. Además, se describirán conceptos esenciales, que serán utilizados posteriormente en el desarrollo de este trabajo de título.

### 2.1. Residuos y Valorización

Los residuos, a nivel industrial, se producen debido a la ineficiencia de los procesos [4]. Actualmente se tiene que los procesos no transforman completamente sus materias primas en productos, generando desechos tales como emisiones gaseosas, residuos líquidos y sólidos. Estas sustancias, por disposiciones legales, deben ser evitadas, reutilizadas, recicladas, valorizadas o eliminadas, en orden de prioridad. Por lo tanto, las actividades industriales, deben enfrentar el problema de la generación de residuos comenzando por la optimización de todos sus subsistemas y subprocesos; continuando luego con el reaprovechamiento de todos los recursos descartados en una primera instancia.

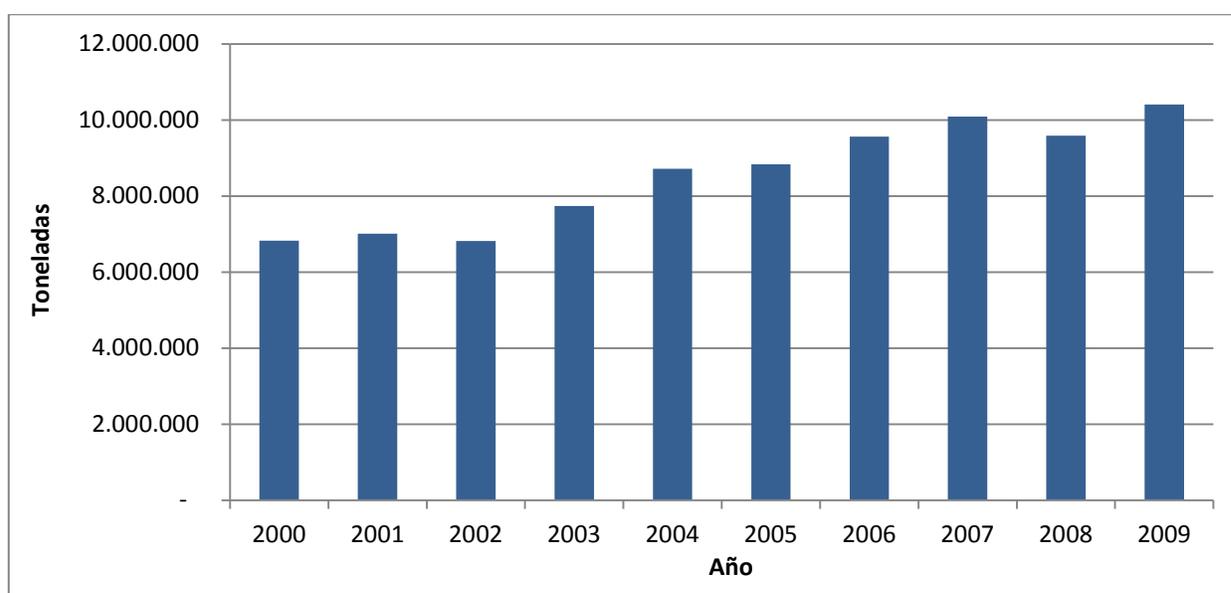


Figura 2.1: Generación de Residuos Industriales en Chile período 2000-2009 [1]

Siguiendo esta pauta de aprovechamiento de los recursos disponibles, en Chile y el mundo, los procesos industriales han ido reduciendo progresivamente su producción de residuos en los últimos años. El cambio tecnológico, el uso eficiente del agua y la energía, las mejoras operativas en los procesos y la implementación de sistemas de reciclaje y recuperación de materiales antes del tratamiento final de las fracciones

resultantes, han redundado en mejoras económicas que además de reducir el impacto ambiental de estas actividades hacen más competitivos los productos de esta manera elaborados. Pero, debido al crecimiento económico del país, la suma de los residuos industriales ha ido aumentando (ver Figura 2.1), lo que se puede aplacar si es que se implementan medidas que incentiven a las industrias a evitar su generación, o se promueven proyectos que los reutilicen, reciclen o valoricen.

Los residuos industriales, según el Decreto Supremo 148, se clasifican en [5]:

- Residuos industriales peligrosos
- Residuos industriales no peligrosos

Los primeros se diferencian porque su flujo industrial, concentración o características físicas, químicas o infecciosas pueden causar o contribuir significativamente a un aumento en enfermedades serias o irreversibles, o con incapacidad temporal, o presentan un riesgo inmediato o potencial para la salud de las personas y el medio ambiente cuando se tratan, almacenan, transportan o disponen de una manera inapropiada, de acuerdo a lo que dicta la ley.

La generación de residuos y su gestión son aspectos importantes para el desarrollo sustentable del país. En Chile, el proceso más ampliamente utilizado para el manejo de residuos es la disposición final y, en forma incipiente, su valorización.

La valorización es una alternativa de manejo de residuos, que si se desarrolla teniendo presente el concepto de sustentabilidad, facilita la disminución de residuos cuyo destino es la disposición final, evita la utilización de nuevas materias primas, disminuye la energía necesaria para su transformación, reduciendo las emisiones de gases contaminantes y evitando la utilización de productos químicos en los procesos industriales y de los vertidos que se generan.

Se tiene que en Chile en el período 2000-2009, la tasa de valorización de residuos (de origen domiciliario e industrial) fue en aumento (ver Figura 2.2). Tomando en cuenta esta tendencia, es posible inferir que se han instalado nuevas plantas de valorización, entre las cuales se encuentran instalaciones de reciclaje, de co-procesamiento y de compostaje. Uno de los factores que motivó este aumento son las diversas políticas públicas que buscan optimizar la gestión de residuos, otorgando más permisos ambientales y generando incentivos para que existan gestores de residuos que planteen la valorización como una de sus políticas principales.

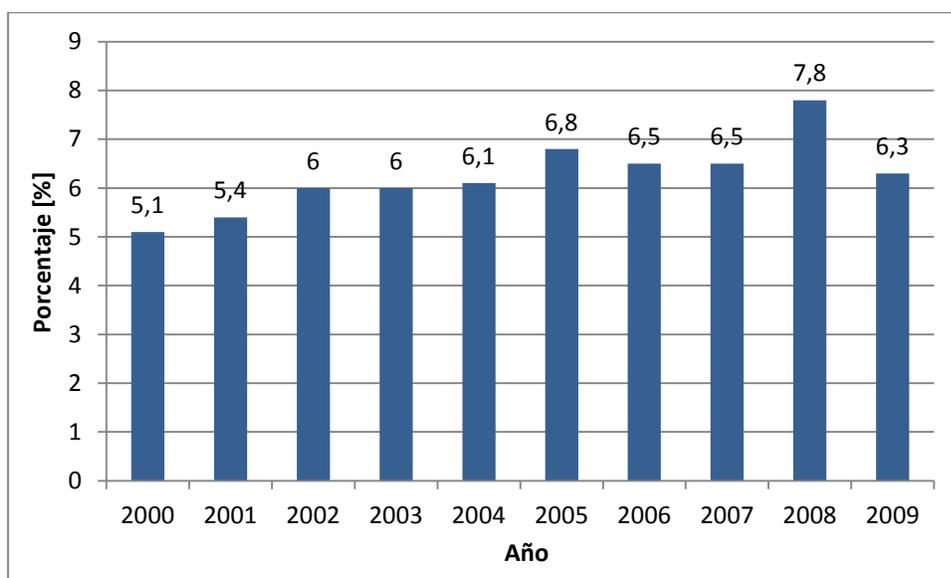


Figura 2.2: Porcentaje de residuos valorizados sobre el total de residuos valorizables en Chile [1]

Además se tiene que de la Figura 2.2 es posible desprender que aún hay espacio para la valorización, existiendo muchos residuos con potencial energético simplemente eliminados en rellenos sanitarios o de seguridad.

## 2.2. Co-procesamiento

El co-procesamiento consiste en la incorporación de residuos, que previamente han sido acondicionados, en procesos industriales, tales como producción de cemento o acero, o en cualquier otra planta de combustión a gran escala. De esa forma, parte de los materiales de desecho se elimina, por medio de su combustión, y el resto pasa a ser ceniza o material mineral inocuo y con un volumen mucho menor.

Los residuos posibles de eliminar utilizando esta tecnología son todos aquellos que tengan una composición química compatible con el proceso destino y las normas ambientales, junto con los requerimientos técnicos de producción.

Los procesos productivos con alto requerimiento energético en la Región Metropolitana o en sus proximidades corresponden a siderúrgicas, productoras de vidrio, generadoras de electricidad y cementeras. El trabajo se enfocará en esta última industria debido a que en ella el co-procesamiento es ampliamente utilizado, por lo que existe un mayor número de documentos de investigación enfocado en su aplicación y, por otro lado, las grandes plantas ubicadas en Chile tienen (o están en proceso de obtener) el permiso ambiental correspondiente para implementarlo.

Al llevar a cabo el co-procesamiento en los hornos de las plantas productoras de cemento, los residuos son totalmente transformados, esto se debe a que la parte orgánica del material se combustiona completamente, y la parte mineral que queda, junto con el residuo sólido de la combustión (ceniza), pasan a formar parte del producto final como elemento constituyente del clínker [6].

### **2.3. Contexto de la Industria del cemento**

A grandes rasgos, el cemento puede conceptualizarse como un conglomerante hidráulico, que al mezclarse con áridos y agua genera una mezcla homogénea, maleable y plástica capaz de fraguar y endurecer, a la que comúnmente se le llama hormigón.

De todos los conglomerantes hidráulicos, es el cemento portland y sus derivados los más utilizados en el sector construcción e ingeniería civil. Aquello se debe a que están formados por mezclas de caliza, arcilla y yeso, minerales de gran abundancia en la naturaleza; además, su precio es relativamente bajo en comparación con otros materiales y tiene propiedades conocidas y valoradas para sus diversos usos.

La industria del cemento es intensiva en materiales y en energía, y debido a esto es que presenta significativos índices de emisión de dióxido de carbono. Sólo por producir una tonelada de clínker se emiten a la atmósfera más de 350[kg CO<sub>2</sub>] [7], lo que significa, sólo por la acción del horno de clínker, para una sola planta productiva de tamaño promedio, 175.000[ton CO<sub>2</sub>/año].

Por concepto de producción de cemento, se generan 498,5[kg CO<sub>2</sub>/ton cemento] [7]. En el año 2012, las 3 grandes cementeras presentes en Chile produjeron 4.722.130 [ton Cemento] [8], lo que se traduce en la emisión de más de 2,3 [Millones ton CO<sub>2</sub>/año]. Como punto de comparación, se tiene que las emisiones netas de CO<sub>2</sub> en Chile el año 2006 fueron 39 [Millones ton CO<sub>2</sub>] aproximadamente, y teniendo en cuenta que el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre el año 2000 y 2006 fue de un 37% [9], se puede estimar que en el año 2012 las emisiones fueron de 53 [millones ton CO<sub>2</sub>]. Estos números, sumado a los datos históricos (ver Figura 2.3), reflejan la dimensión de este problema y su aumento permanente a través de los años.

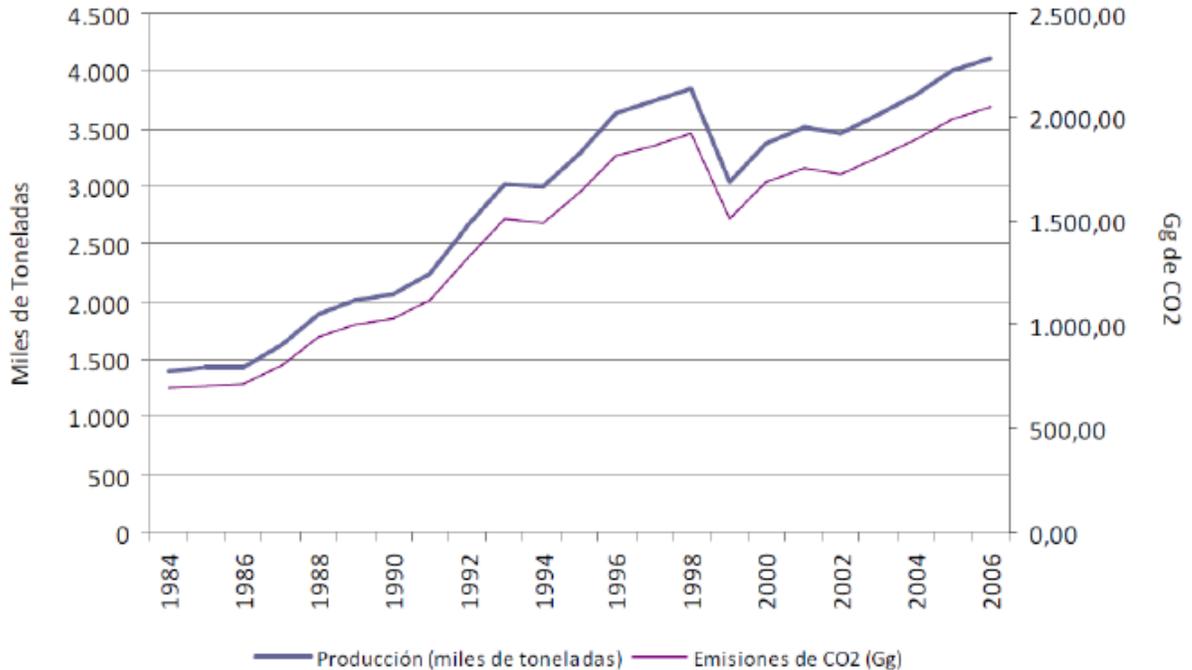


Figura 2.3: Evolución de emisiones de CO<sub>2</sub> v/s producción de cemento en Chile [7]

La producción de cemento requiere gran cantidad de energía térmica, donde el principal consumo se realiza en el proceso de fabricación del clínker, específicamente en el horno donde se calcina la materia prima. Dicho equipo consume más del 99% del gasto energético total del proceso de producción de cemento. La materia prima necesita alcanzar una temperatura de 1.500[°C] para que se lleven a cabo las reacciones necesarias que dan lugar al clínker. En general, para alcanzar esa temperatura los hornos cuentan con una llama principal que arde a 2.000[°C], y según el tipo de producción, puede existir una llama secundaria. Estas llamas se alimentan con combustibles tradicionales líquidos o sólidos, como carbón, petcoke o petróleo, o con el co-procesamiento de combustibles alternativos [10].

## 2.4. Co-procesamiento en la industria del cemento

El co-procesamiento en la industria cementera se logra gracias a las condiciones de operación del horno presente en la etapa de calcinación, ya que favorecen la utilización de desechos como material combustible. Dichas condiciones son [11]:

- Altas temperaturas de llama, que pueden llegar a 2.000 [°C].
- Estabilidad térmica del sistema.
- Altos tiempos de residencia de la materia sólida y de los gases, valores que se acercan a los 20 [min] para el material sólido y de 6 a 8 [s] para los gases.
- Alta turbulencia de los gases, con un Reynolds mayor a 100.000.

- Atmósfera oxidante y básica, que sumado al mezclado intensivo, favorecen la absorción de los componentes volátiles de la fase gaseosa.
- Alta absorción de elementos minerales en el clínker, en donde los desechos quedan cristalizados y encapsulados gracias a un fenómeno conocido como sinterización.
- Proceso en contracorriente, que permite que la mayor parte de los elementos químicos, que se puedan arrastrar por los gases, se condensen sobre la materia prima que ingresa al horno.
- Alta eficiencia en la destrucción de los componentes orgánicos, valor que alcanza el 99,99%.
- Proceso que no genera residuos, ya que las cenizas se incorporan al clínker.
- Presencia de precipitadores electrostáticos o filtros de mangas, como equipos de control de las emisiones de material particulado.

El co-procesamiento ocurrirá de forma correcta sólo si la materia prima ingresada, de ahora en adelante, residuos valorizables, tiene una composición que se encuentre bajo los parámetros establecidos para evitar la generación de emisiones gaseosas. El análisis de los residuos valorizables se presenta en la siguiente sección del presente informe.

#### **2.4.1. Residuos Valorizables**

El Combustible Alternativo Sólido (CAS), elaborado a partir de residuos valorizables, entrega un valor agregado al cemento, pues le entrega poder calorífico y valor material (mineral), pero debe cumplir: requisitos legales (en contaminación, salud, seguridad y técnicas), priorizar la jerarquía de gestión de residuos, descartar los efectos perjudiciales en el producto y la producción, y minimizar los costos de producción.

Los límites de contaminantes estipulados para el co-procesamiento dependen de la reglamentación del país y del proceso productivo de formación del clínker. Estas características están relacionadas directamente con las emisiones que se producirían durante su combustión y con las condiciones que se requieren para que el desecho se pueda co-procesar. De esta forma, se debe cumplir que el residuo (potencialmente combustible) tenga un bajo contenido de cloro y azufre, además de estar dentro de los límites establecidos para la concentración de metales pesados.

Existe una gran gama de materiales factibles de ser co-procesados, recuperando su contenido energético a través del uso de los hornos y, a la vez, evitando la disposición de los mismos en rellenos o incineradores, ellos son [6]:

- i. Residuos lodosos
  - a. Hidrocarburos Pesados
  - b. Lodos Petroleros
  - c. Barros-Lodos Fondo de Tanque
  - d. Barros-Lodos Tratamiento de Efluentes
  - e. Barros-Lodos Fondos de Destilación
  - f. Barros-Lodos de Pintura
  
- ii. Residuos Líquidos
  - a. Aceite Usado
  - b. Mezclas de Hidrocarburos con agua
  - c. Líquidos Especiales
  - d. Solventes Usados
  
- iii. Residuos triturables
  - a. Polímeros
  - b. Mezclas de Plásticos No Peligrosos
  - c. Maderas contaminadas peligrosas
  - d. Descartes de Producción
  - e. Otros Absorbentes / Impregnantes
  - f. Residuos farmacéuticos y veterinarios
  - g. Carbón Contaminado
  - h. Papel y cartón

A lo anterior se debe agregar, que en la autorización nacional se establece que no se pueden ingresar a los hornos de cemento: los residuos radiactivos, bio-peligrosos y/o explosivos, además de los residuos con PCB.

#### **2.4.2. Antecedentes nacionales e internacionales**

A nivel nacional existe sólo una planta de co-procesamiento, Coactiva, la cual opera desde el año 2005. Esta planta es una unidad de negocio del Grupo Polpaico, perteneciente a su vez al Grupo Cementero Internacional Holcim. La capacidad de la planta Coactiva es de 25.000[Ton/año] para residuos líquidos y de 45.000[Ton/año] para residuos sólidos [12]. Esta empresa sólo recibe residuos industriales valorizables (ver sección 2.4.1), los cuales poseen un alto poder calorífico y propiedades fisicoquímicas específicas que permiten co-procesarlos en su horno cementero sin riesgos en la operación ni para el medio ambiente.

A nivel internacional, se tiene que el co-procesamiento de residuos, particularmente en la industria cementera, es común, quedando esto reflejado en el porcentaje de sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos (ver Figura 2.4). Tomando por base el año 2004, en la actualidad el porcentaje de sustitución de combustibles fósiles con CAS debería ser mayor en cada uno de los países citados.

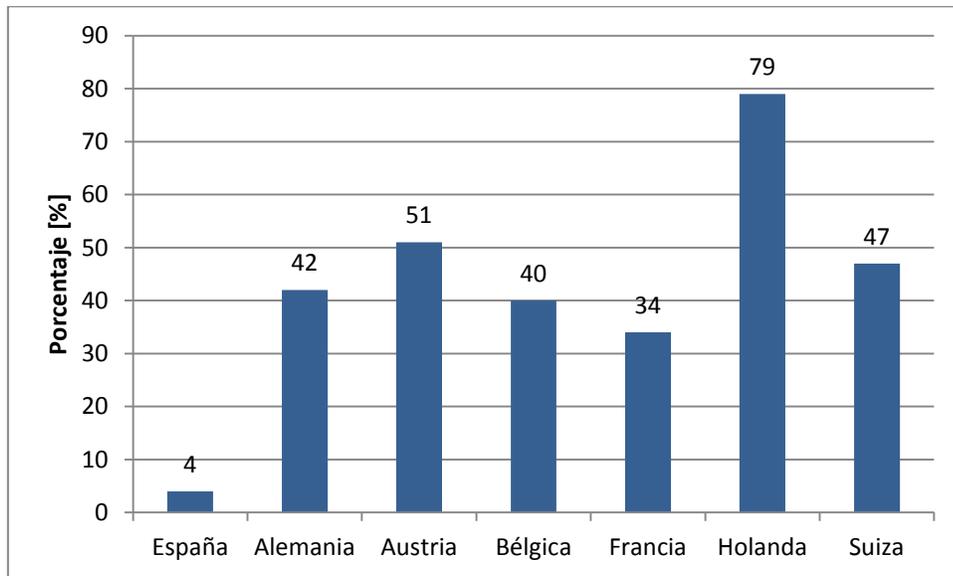


Figura 2.4: Porcentaje de sustitución (energía) de combustibles fósiles por alternativos en la industria cementera europea (2004) [13]

## 2.5. Evaluación y comparación de proyectos

En el principio de esta sección se muestran los índices económicos comúnmente utilizados para la evaluación y comparación de proyectos [14]. Estos índices entregan una visión general de los beneficios económicos a largo plazo de la selección de una alternativa por sobre otra. Los indicadores que se utilizarán como herramienta para realizar una correcta elección son: Valor actual neto, Tasa interna de retorno y Período de recuperación de capital.

Además, en este estudio se realizará una evaluación del proyecto desde una perspectiva integral, utilizando una metodología que fue propuesta en un trabajo de título de un exalumno de Ingeniería Civil Química de la Universidad de Chile en el año 2012 [15], denominada Herramienta de Análisis Integral (HAIN), la cual se describirá en el punto 2.5.4 de esta sección.

### 2.5.1. Valor actual neto (VAN)

Es un índice que permite determinar el valor presente de un determinado número de flujo de caja futuros, utilizando una tasa de descuento acorde al rendimiento mínimo esperado. Básicamente la metodología consiste en actualizar, mediante la tasa elegida, todos los flujos de caja esperados del proyecto:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (1)$$

Donde  $V_t$  representa los flujos de caja para cada período,  $I_0$  es el valor de la inversión inicial,  $n$  es el número de períodos considerados y  $k$  es la tasa de descuento elegida. La interpretación del índice se entrega en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Interpretación del VAN

Valor	Significado	Decisión
$VAN > 0$	La inversión produce ganancias por sobre lo exigido	Realizar el proyecto
$VAN = 0$	La inversión no produce ganancia ni pérdidas	Depende de factores no económicos
$VAN < 0$	La inversión produce ganancias menores a las exigidas	Rechazar el proyecto

Cuando se comparan dos proyectos similares se puede usar el mismo factor para evaluar los beneficios que se obtienen de usar una alternativa por sobre la otra:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ahorro\ anual_t}{(1+k)^t} - \Delta I_0 \quad (2)$$

En la ecuación, el  $Ahorro\ anual_t$  interioriza la diferencia en los flujos de caja anuales entre los dos proyectos y  $\Delta I_0$  es la diferencia de inversión entre ambos proyectos.

### 2.5.2. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa de descuento con la cual el VAN del proyecto es nulo. De esta forma el TIR es un indicador de la rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR, mayor rentabilidad.

Por lo tanto, para calcular la TIR la ecuación (1) se iguala a cero y se despeja la tasa de descuento obteniendo la siguiente expresión:

$$TIR = \frac{-I_0 + \sum_{t=1}^n V_t}{\sum_{t=1}^n t \cdot V_t} \quad (3)$$

Al igual que en el caso anterior, se puede calcular la TIR para la comparación de proyectos similares:

$$TIR = \frac{-\Delta I_0 + \sum_{t=1}^n Ahorro\ anual_t}{\sum_{t=1}^n t \cdot Ahorro\ anual_t} \quad (4)$$

Si  $TIR \geq$  Costo de oportunidad de la empresa, entonces se debe preferir el proyecto que genera el ahorro adicional.

### **2.5.3. Período de recuperación de capital (PRC)**

Es un criterio estático de valoración de inversiones que permite comparar proyectos en base a cuánto tiempo se demora en recuperar la inversión inicial. Este índice es útil cuando se realizan inversiones de alta incertidumbre.

La expresión es la siguiente:

$$PRC = \frac{I_0}{V_t} \quad (5)$$

En este caso, se tiene que a mayor PRC, se tiene un proyecto menos atractivo, pues la recuperación de la inversión se producirá en un horizonte de tiempo mayor.

### **2.5.4. HAIN**

Esta metodología está basada en un conjunto de preguntas que permiten establecer reflexiones cualitativas sobre el entorno relacionado con el proyecto, permitiendo sustentar una evaluación no sólo basada en aspectos técnicos y económicos. La HAIN se basa en la aplicación de una Base Ética [15], que busca generar un cuestionamiento a la responsabilidad y moralidad de la técnica ingenieril y las consideraciones referidas al impacto social, ambiental y económico de esta.

Con la aplicación de la HAIN se logra que aquello que la economía tradicional llama externalidad sea parte del proyecto -incluso parte de la ingeniería-, dado que debe ser analizada y evaluada de la misma manera que un costo o beneficio percibido por el tomador de decisiones.

Así, a la hora de analizar las alternativas para la realización de un proyecto, esta herramienta permitirá considerar su relación con la comunidad (Conciencia Social), identificar partes interesadas en el proyecto o influenciadas por las consecuencias de este (Integración). Además, se analizan posibilidades de mejorar el proyecto, tomando en cuenta efectos no previstos (Creatividad y Reflexión Crítica). Adicionalmente la HAIN busca establecer la relación del proyecto con el desarrollo social, considerando su sostenibilidad y equidad (Desarrollo), para reflexionar, finalmente, sobre las consecuencias del proyecto en el bienestar social (Bien Común). Todo esto en conjunto permite cuestionar los proyectos, plantear nuevas alternativas y ejercer la ingeniería.

## **Capítulo 3. Estudio de Mercado**

A continuación se describirá la metodología y resultados obtenidos a partir del Estudio de Mercado. El objetivo de esta etapa, como se enunció en el Capítulo 1, es la determinación del cliente que recibirá el CAS producido y verificar la existencia de proveedores de materia prima para el proyecto.

### **3.1. Estudio sobre mercado de clientes**

Antes de definir la composición del producto, es necesario definir al cliente, ya que los requerimientos de un CAS serán diferentes dependiendo del contexto de uso, pues cada empresa está supeditada a reglamentación ambiental diferente según su ubicación geográfica o tipo de proceso involucrado, esto último además influirá en los requerimientos específicos para el combustible (PCI, Humedad, granulometría, entre otros).

La utilización de combustibles de sustitución por medio de co-procesamiento es recomendable en procesos que posean altas temperaturas de funcionamiento (mayores a 1000°C), tiempos de residencia mayores a 5s y un buen control de la entrada de oxígeno [6]; todos estos elementos permiten disminuir las emisiones contaminantes a niveles admisibles. Entre los procesos industriales que presentan las características anteriormente mencionadas se encuentra la producción de cemento, la producción de electricidad a partir de fuentes térmicas, la producción y tratamiento de acero, producción de vidrio y las fundiciones de diversos metales.

A nivel mundial, la única industria que ha implementado el co-procesamiento hace más de una década, y en la que se han desarrollado diversas investigaciones acerca de su funcionalidad, es en la cementera. Particularmente en Chile, la industria cementera es la única que ha implementado la co-procesamiento. Estos hechos motivaron a que el presente estudio se enfocara en esta industria, ya que en su contexto, la co-procesamiento es una tecnología madura.

En Chile, existen tres actores importantes en el mercado actual de la industria cementera, los cuales corresponden a grandes consorcios que en conjunto abarcan más del 95% del mercado: Cementos Melón (Grupo Brescia, Perú), Cementos Polpaico (Holcim, Suiza) y Cementos Bio Bío (Grupo Briones) [8]. Para determinar cuál de estas tres entidades representa la mejor opción como consumidor del producto a desarrollar por el presente proyecto, se consideró como principal factor de elección su experiencia en el uso de combustibles alternativos como fuente energética para su proceso y, como factor secundario, sus relaciones de interés con Hidronor Chile S.A. A partir del análisis de ambos factores, Hidronor Chile S.A. determinó que Cementos Bío Bío será la empresa considerada como cliente para desarrollar el presente trabajo.

Luego de la selección, se contactó con el cliente y se llevó a cabo una visita a la Planta Teno de Cementos Bío Bío. Esta planta, se encuentra ubicada en la Región del Maule y posee la mayor capacidad de producción de cemento del país. Luego de que la empresa accediera a la evaluación, se recibieron datos necesarios para llevar a cabo el estudio técnico del proyecto, que corresponden a la caracterización fisicoquímica del producto (Combustible Alternativo Sólido), dadas sus restricciones legales y operacionales, y la capacidad de recepción que posee la Planta Teno, que se presenta como el único lugar de recepción para este producto, debido a su cercanía a la planta Pudahuel de Hidronor y a su alto requerimiento energético en el horno clínter.

La caracterización del CAS entregada se observa a continuación en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Valores límites de los parámetros fisicoquímicos del CAS que se puede incorporar al proceso de fabricación de cemento en Planta Teno [16]**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
<b>Poder calorífico</b>	> 3.500 kcal/kg
<b>Cloro [Cl]</b>	< 2%
<b>Flúor [F]</b>	< 0,2%
<b>Azufre [S]</b>	< 2%
<b>Mercurio [Hg]</b>	< 1 ppm
<b>Cadmio [Cd]</b>	< 100 ppm
<b>Antimonio [Sb]</b>	< 100 ppm
<b>Arsénico [As]</b>	< 200 ppm
<b>Cobalto [Co]</b>	< 200 ppm
<b>Níquel [Ni]</b>	< 1000 ppm
<b>Cromo [Cr]</b>	< 1000 ppm
<b>Vanadio [V]</b>	< 1000 ppm
<b>Plomo [Pb]</b>	< 1000 ppm
<b>Manganeso [Mn]</b>	< 1000 ppm
<b>Berilio [Be]</b>	< 50 ppm
<b>Selenio [Se]</b>	< 50 ppm
<b>Teluro [Te]</b>	< 50 ppm
<b>PCBs</b>	< 50 ppm
<b>pH</b>	5 - 10
<b>Humedad</b>	20% promedio
<b>Granulometría</b>	<10 cm 100% <5 cm 80%
<b>Densidad Aparente</b>	0,4 kg/m <sup>3</sup>

La capacidad de recepción de CAS de la Planta Teno se encuentra delimitada por el permiso ambiental que se encuentran tramitando desde el año 2012 para la incorporación de CAS a su proceso productivo, a través de la Declaración de Impacto Ambiental “Reemplazo de la Matriz de Combustibles en el Proceso de Fabricación de Cemento”, la cual se espera sea aprobada en los últimos meses del año 2013 sin modificaciones respecto a su última versión ingresada en abril del 2013. De ocurrir lo descrito anteriormente y considerando las proyecciones estimadas por el personal de la empresa, se tiene que la Planta Teno recibirá en un corto plazo entre 0,5 y 1 [Ton/h], en aumento, hasta lograr, en un largo plazo, una entrada de 3 [Ton/h] [17]. Esta información será utilizada posteriormente en la sección 4.3, para la determinación del caso base para el proyecto.

### **3.1.1. Descripción del proceso de producción del cliente**

Las principales etapas del proceso de producción de cemento en la Planta Teno de Cementos Bío Bío son [16], [18]:

1. Recepción de materias primas, tanto para la producción de clínker (caliza, mineral de hierro y arena) como para la de cemento (yeso, puzolana y otras adiciones).
2. Tratamiento primario de materias primas: Dependiendo de la naturaleza de las materias primas y de las condiciones que llegan a la planta de cemento, pueden sufrir uno o varios tratamientos primarios como: cribado, reducción de tamaño, homogenización, secado, concentración de carbonato y selección de acuerdo a composición química.
3. Dosificación de materias primas: Como las características y la calidad del clínker dependen de los compuestos mineralógicos y éstos dependen del porcentaje en que está presente cada una de las materias primas, se hace necesaria esta etapa.
4. Molienda de crudo: La molienda de las materias primas tiene por objeto reducirlas de tamaño, a un estado pulverulento, para que puedan reaccionar químicamente durante la calcinación.
5. Precalentamiento: La alimentación al horno clínker se realiza a través de un precalentador de ciclones, que calienta la materia prima para facilitar su cocción por medio de los gases provenientes del horno que ascienden en contracorriente y que se encuentran a altas temperaturas, logrando precalentar el crudo hasta los 1000°C.
6. Reacción y cocción: Esta etapa se lleva a cabo en un horno rotatorio, en el cual el crudo avanza hasta alcanzar los 1500°C, a esta temperatura se producen diversas reacciones químicas que dan lugar al clínker. Para alcanzar las

temperaturas necesarias para la cocción de las materias primas y la producción de clínker, el horno cuenta con una llama que arde a 2000°C, la cual se puede alimentar de combustibles tradicionales o alternativos.

7. Enfriamiento: El clínker que sale desde el horno es enfriado con aire del exterior, disminuyendo su temperatura desde los 1500°C a los 100°C aproximadamente.
8. Molienda de cemento: En esta etapa se muele, mezcla y homogeniza el clínker, que ya se encuentra a menor temperatura, con yeso, puzolana y otros compuestos, en proporciones adecuadas. En la actualidad la planta cuenta con dos molinos, uno de bolas y otro de rodillos.
9. Almacenamiento y despacho: El cemento es almacenado en silos para luego ser transportado por camiones cisterna a los puntos de despacho.

Para lograr una mayor comprensión del proceso, en la Figura 3.1, se presenta un esquema en que es posible observar las etapas con sus correspondientes corrientes y equipos. Es importante mencionar, que en el esquema se determinó el lugar donde se encontraría la corriente de entrada de CAS a la etapa de reacción y cocción, en caso de llevar a cabo el proyecto en evaluación.

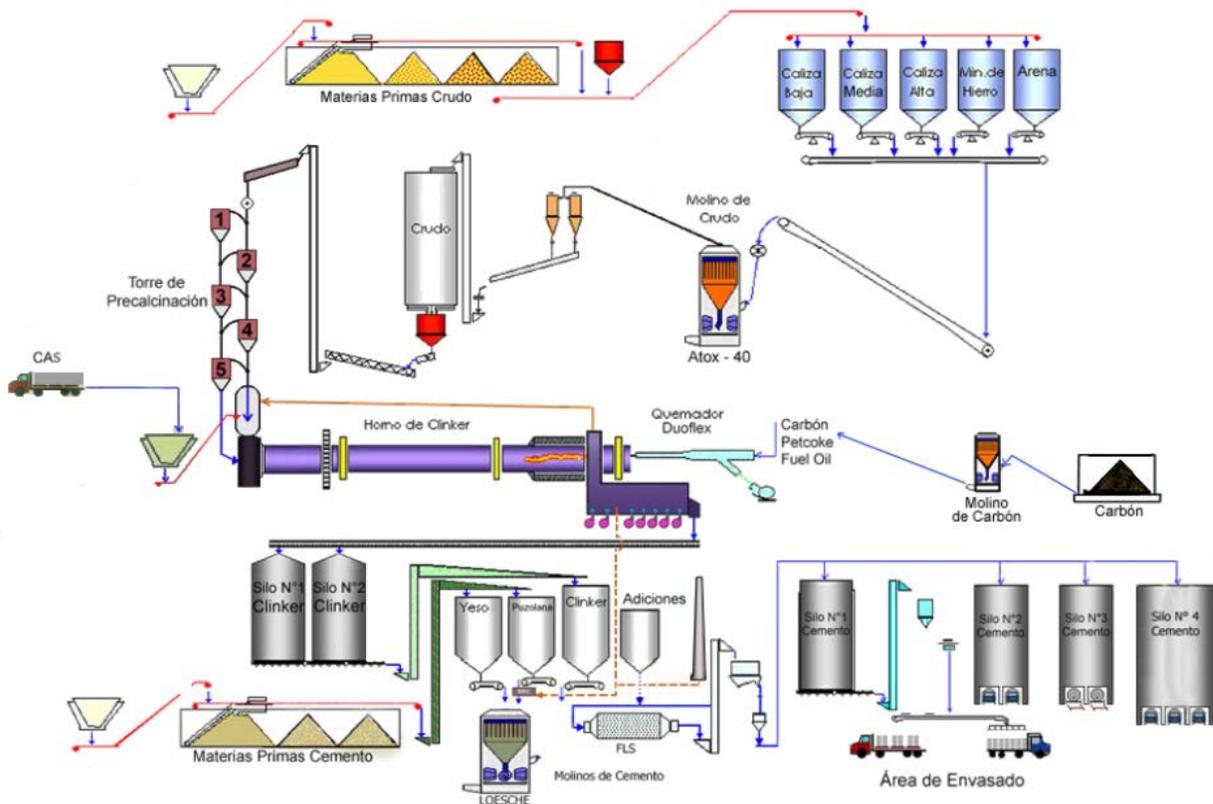


Figura 3.1: Esquema Proceso Producción de Cemento en Planta Teno [16]

### 3.2. Estudio sobre mercado de proveedores de materias primas

Esta sección del estudio de mercado tiene por finalidad determinar cuáles son las materias primas útiles disponibles en el mercado actual de residuos industriales en la zona centro de Chile y cuáles son las empresas que los generan, determinando, así, si es posible llevar a cabo el proyecto desde el punto de vista de existencia de proveedores.

Para que un residuo califique como materia prima, su composición y características fisicoquímicas deben ser tales que el producto del proceso se encuentre dentro de los límites establecidos por la entidad que lo consumirá, en este caso, Planta Teno de Cementos Bío Bío. Esto pues en el proceso de producción de CAS no se llevan a cabo transformaciones químicas, las propiedades finales del CAS dependerán de la proporción en la que se mezclen los residuos, y de las propiedades de cada uno de ellos.

Para determinar cuáles residuos son idóneos como materia prima para la producción de CAS, es necesario poner atención a su composición fisicoquímica, pero, dado que la posibilidad de estudiar la composición de todos los residuos presentes en el mercado, o de todos los recibidos por la empresa Hidronor, es infactible, dado el alcance y características de este trabajo, es que, se tomará como supuesto que el proceso de coprocesamiento llevado a cabo por la empresa Coactiva del Grupo Polpaico presenta características similares al proceso en estudio. Con lo anterior es posible tomar como base para el presente trabajo la descripción de materias primas útiles declaradas por Coactiva, la que se puede observar en la sección 2.4.1. Con la información anterior, se tienen los requerimientos para que un residuo sea valorizable.

Para lograr obtener una porción del mercado de residuos valorizables representativa y con una posibilidad de acceso real a ella, se decidió tomar como base de estudio los datos de clientes ingresados durante el año 2012 a la planta Pudahuel de Hidronor Chile S.A. Tales datos se encuentran caracterizados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Contenido Base de datos año 2012 Hidronor Chile S.A.

<b>Residuos Totales</b>	146.967 [Ton/año]
<b>N° de Residuos</b>	6.698
<b>Empresas Totales</b>	810

La base de datos en estudio, posee una caracterización general del residuo que se trata, el peso ingresado y la empresa que lo genera.

A partir de la información anterior y la caracterización de la materia prima utilizada por Coactiva, se filtraron los residuos valorizables energéticamente del total, que corresponden a 24.312 [Ton/año] y a un 17% del total.

Para generar una clasificación lógica dentro de los residuos valorizables, que permita reducir el universo de residuos a caracterizar fisicoquímicamente de forma experimental y que no involucre la naturaleza de los residuos, pues se tiene una variedad de más de 2500 tipos, es que en la primera etapa del trabajo el esfuerzo de clasificación se enfocó en las empresas, las que correspondían a 520. A cada empresa se le asoció un rubro, con lo que se identificaron 29 rubros con sus respectivos flujos de residuos, informados Tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Rubros generadores de residuos valorizables**

<b>N°</b>	<b>Rubro</b>	<b>Residuos [ton/año]</b>
1	Agrícola	37
2	Alimentos	587
3	Petróleos, refinerías, asfálticas y estaciones de servicio	9.745
4	Automotriz	54
5	Administración (oficinas)	30
6	Ingeniería, construcción y maquinaria	407
7	Cementeras	263
8	Generación y distribución de electricidad	573
9	Productos químicos	719
10	Minería	3.162
11	Cosméticos	169
12	Plásticos y embalaje	844
13	Maquinarias y equipos	158
14	Maderera, forestal y papelera	131
15	Metalmecánica, siderúrgica, y fundición	1.465
16	Gases	28
17	Hotelería	15
18	Industria gráfica	149
19	Industria marítima	248
20	Tratamiento de residuos y aguas	3.394
21	Óptica	2
22	Pinturas	1.266
23	Productos electrónicos y computacionales	18
24	Productos farmacéuticos y servicios de salud	59
25	Textil	47
26	Transporte	682
27	Universidades	14
28	Vidrio	33
29	Vitivinícola	12
<b>Total</b>		<b>24.312</b>

Con la información anterior se seleccionaron los rubros con mayores aportes en tonelaje anual al total de residuos valorizables energéticamente, con el fin de disminuir los tipos de residuos en estudio. El resultado de esta selección se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4: Selección de rubros generadores de residuos valorizables**

<b>N°</b>	<b>Rubros</b>	<b>Residuos [Ton/año]</b>
1	Alimentos	587
2	Petróleos, refinerías, asfálticas y estaciones de servicio	9.745
3	Ingeniería, construcción y maquinaria	407
4	Generación y distribución de electricidad	573
5	Productos químicos	719
6	Minería	3.162
7	Plásticos y embalaje	844
8	Metalmecánica, siderúrgica, y fundición	1.465
9	Tratamiento de residuos y aguas	3.394
10	Pinturas	1.266
11	Transporte	682
<b>Total</b>		<b>22.845</b>

Considerando que la selección de los rubros con mayor aporte en tonelaje representa el 94% del total de los residuos valorizables, el acotamiento de la información debe ser mayor, por lo que se seleccionó una o dos empresas modelo por cada uno de los once rubros seleccionados (ver Tabla 3.5).

**Tabla 3.5: Empresas modelo por rubros**

<b>N°</b>	<b>Rubro</b>	<b>Empresas Modelo</b>	<b>Residuos [Ton/año]</b>
1	Alimentos	A y B	442
2	Petróleos, refinerías, asfálticas y estaciones de servicio	C	5.530
3	Ingeniería, construcción y maquinaria	D	25
4	Generación y distribución de electricidad	E	399
5	Productos químicos	F	75
6	Minería	G	2.251
7	Plásticos y embalaje	H e I	465
8	Metalmecánica, siderúrgica, y fundición	J y K	424
9	Tratamiento de residuos y aguas	L	569
10	Pinturas	M	332
11	Transporte	N	173
<b>Total</b>			<b>10.684</b>

Dado que las empresas pertenecientes a un mismo rubro poseen los mismos procesos y productos objetivo, los tipos de residuos generados son similares, por lo que al caracterizar fisicoquímicamente los residuos de la empresa modelo seleccionada, es posible extrapolar el resultado al rubro completo, lo que se considera una estimación acorde al nivel de pre-factibilidad de la evaluación a realizar.

### **3.3. Discusiones estudio de mercado**

La selección de la empresa para la cual se preparará el CAS, se basó en los resultados de experiencias similares a nivel internacional y en la realidad nacional de las empresas de los rubros con altos requerimientos energéticos. La selección de un único cliente se vio influenciada por la posibilidad de tener un único set de requerimientos a los cuales atenderse para desarrollar el producto, mientras que si la evaluación se expandía a la posibilidad de poseer más de un cliente objetivo, los parámetros fisicoquímicos probablemente variarían, lo que complicaría el modelamiento del proceso y la definición del caso base. De todas formas es importante recalcar que el proceso es escalable a nuevos requerimientos.

En cuanto al estudio de proveedores, se obtuvo un resultado satisfactorio, particularmente por la posibilidad de cubrir el requerimiento de flujo másico de la empresa Cementos Bío Bío, con los residuos valorizables que se reciben actualmente en Hidronor. Esto, pues a pesar de trabajar sobre la base de datos del año 2012, los residuos recibidos por Hidronor de un año a otro no presentan grandes variaciones, por lo que los datos se pueden proyectar en el tiempo, considerando un porcentaje de aumento que se estimará en la sección de Evaluación Económica del presente informe.

El grupo de empresas modelo, con sus respectivos residuos, serán la base para comenzar a trabajar en el Estudio Técnico. Todas sus características se extrapolarán al total de residuos valorizables, lo que se considera un supuesto válido dado el nivel de la ingeniería y de la evaluación que se plantea en este estudio.

### **3.4. Conclusiones del estudio de mercado**

En el sector industrial Chileno, existen industrias que tienen la posibilidad de ingresar combustibles alternativos a su proceso. Entre ellas el sector cementero ya posee experiencia y tecnología certificada en la co-procesamiento.

Teniendo en cuenta el mercado de la industria cementera en el país, y factores como la experiencia en la co-procesamiento y las relaciones de interés comercial con Hidronor, se determinó que el proyecto considerará como único cliente a la planta Teno de

Cementos Bío Bío, con quien se tomó contacto para obtener información indispensable para el desarrollo del proyecto, como la caracterización del producto y el requerimiento de éste a futuro.

Del estudio de proveedores, se logró determinar que sí hay disponibilidad de materia prima para llevar a cabo el proyecto cubriendo la demanda del cliente considerado.

## **Capítulo 4. Estudio Técnico**

El objetivo de éste capítulo es desarrollar la ingeniería conceptual de la planta de producción de CAS. Más específicamente, se espera entregar una caracterización de la materia prima, un caso base justificado bajo el contexto real del proyecto, una descripción detallada de las etapas del proceso y de la operación; además de un dimensionamiento de los equipos a utilizar y un layout de la instalación, todo lo anterior entrega los insumos necesarios para realizar la posterior evaluación del proyecto.

En este capítulo también se considera la selección de la ubicación geográfica del proyecto, describiendo los parámetros considerados para la elección, lo que se puede apreciar en la sección 4.1.

### **4.1. Ubicación de la planta**

Se consideraron dos lugares como ubicaciones posibles de la planta de producción de CAS: Planta Pudahuel Hidronor Chile S.A. y Planta Teno de Cementos Bío Bío S.A. Para dirimir entre ambas opciones se consideraron como parámetros de selección el costo de transporte (de la materia prima y del producto) y la normativa ambiental aplicable en cada zona geográfica.

#### **4.1.1. Transporte**

Dado que el transporte de la materia prima y del producto será uno de los principales costos asociados a la utilización del CAS, es que el estudio de este parámetro se hace fundamental para seleccionar una ubicación.

El transporte de materia prima se realizará desde los proveedores hacia la planta de CAS (2 alternativas), luego el CAS producido deberá ser transportado hasta la planta de producción de cemento donde se utilizará (planta Teno Cementos Bío Bío), y por último, se tiene que los residuos producidos durante el proceso deberán ser llevados al emplazamiento de disposición de residuos (planta Pudahuel Hidronor). Para cada alternativa de ubicación, el flujo de residuo y la distancia a transportar variarán, y con ello variará el costo.

Para elegir una alternativa según este parámetro, se determinará el costo de transporte en el que se incurrirá según cada ubicación:

### **Alternativa 1: Planta de producción de CAS en planta Pudahuel de Hidronor Chile S.A.**

En este caso, el total de la materia prima deberá ser transportada desde la ubicación de cada una de las empresas proveedoras, que para efecto de este estudio sólo serán las 14 empresas modelo definidas en la sección 3.2, hacia la planta Pudahuel de Hidronor, en donde se podrán disponer los residuos generados en el proceso sin necesidad de un transporte extra, y por último, se tiene que el CAS producido deberá ser llevado desde la planta Pudahuel de Hidronor hasta la Planta Teno de Cementos Bío Bío.

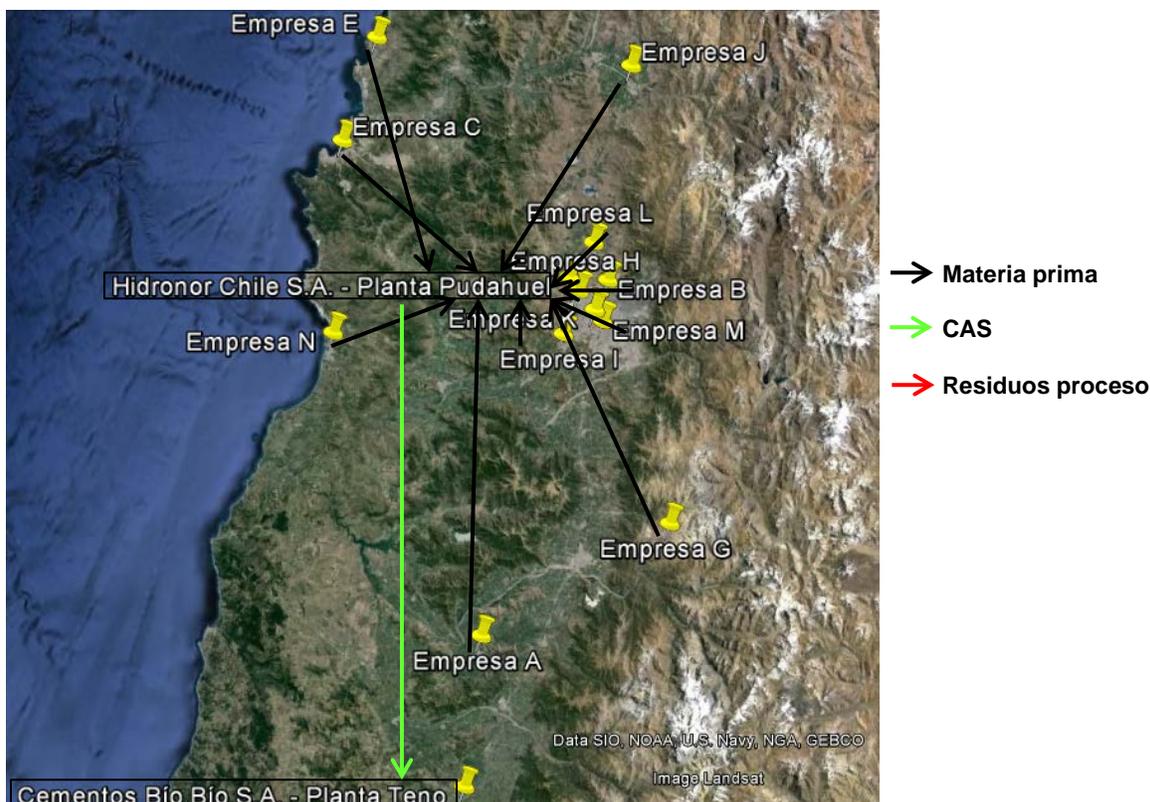


Figura 4.1: Esquema Alternativa 1

Con lo anterior, se tiene que el traslado de la materia prima a la planta Pudahuel corresponden a \$550.479.003, mientras que el traslado del CAS desde la planta Pudahuel a la Planta Teno asciende a \$575.298.473, sumando ambos valores, se tiene que el costo total del transporte al ubicar la planta de producción de CAS en la planta Pudahuel de Hidronor es de \$1.125.777.506, que corresponden a US\$2.181.739.

El detalle del cálculo se puede observar en el Anexo A.

## **Alternativa 2: Planta de producción de CAS en planta Teno de Cementos Bío Bío S.A.**

Esta alternativa requiere que la materia prima sea transportada desde la ubicación de cada uno de los proveedores, que para efectos del cálculo solo serán consideradas las mismas 14 empresas que en la alternativa anterior, hasta la planta Teno de Cementos Bío Bío, en donde el producto CAS será utilizado en el mismo lugar, pero ahora se tendrá la necesidad de transportar los residuos generados por el proceso a la planta Pudahuel de Hidronor Chile S.A.

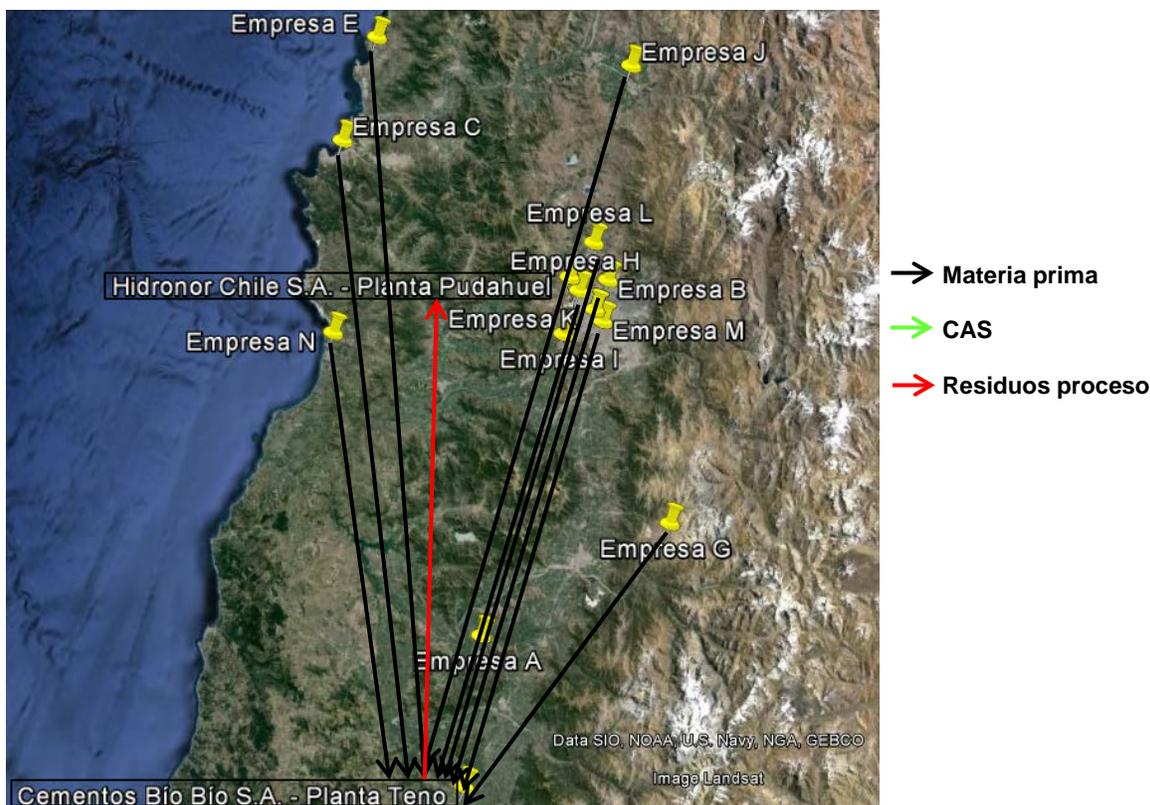


Figura 4.2: Esquema Alternativa 2

Dadas las consideraciones anteriores, el costo del traslado de las materias primas es de \$1.235.209.084, y el traslado de los residuos y descartes del proceso a la planta Pudahuel tiene un costo de \$34.099.909. Por lo tanto, el costo total del transporte para la alternativa 2 asciende a \$1.269.308.993, que corresponde a US\$2.459.901.

El detalle del cálculo se puede apreciar en el Anexo A.

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se tiene que instalar la planta en el terreno ubicado en la comuna de Pudahuel de Hidronor Chile S.A. se presenta como la mejor alternativa. Además, en cuanto al transporte, es importante considerar el posible impacto social negativo por el traslado de residuos de una a otra, la mayor probabilidad

de riesgos en el transporte de residuos peligrosos por distancias más largas y el beneficio que produce que los camiones transporten CAS en lugar de materia prima (residuos) por distancias más largas. El detalle de estas consideraciones se analiza en la sección 4.1.3.

#### 4.1.2. Normativa Ambiental Aplicable

Dentro de las normativas que aplican a proyectos de producción de nuevos productos o materiales se tiene que la ambiental presentará grandes variaciones respecto a la ubicación, esto ocurre pues dependiendo de la zona geográfica en donde se pretenda instalar el emplazamiento industrial existirán leyes y decretos aplicables propios, pues cada zona tendrá componentes ambientales del medio físico, biótico, socioeconómico, usos del suelo y construido diferentes.

En este caso, se tiene una alternativa ubicada en la Región Metropolitana y otra en la Región del Maule. Actualmente, son conocidos los problemas ambientales que presenta la Región Metropolitana, originados por su amplia actividad industrial y gran cantidad de población.

A partir de la Declaración de Impacto Ambiental de la planta Coactiva de Cementos Polpaico [19], que como se explicitó en capítulos anteriores, es la única planta que existe en la actualidad de producción de CAS, se realizó una descripción preliminar de la normativa aplicable a este proyecto (ver Tabla 4.1), la cual se debe mejorar y detallar en posteriores etapas de evaluación del proyecto.

Tabla 4.1: Normativa ambiental

Normativa	Temática	RM	VII Región
<b>Ley 19.300</b>	Establece que aquellos proyectos o actividades considerados susceptibles de causar impacto ambiental, sólo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental, por medio de la entrega de DIA o EIA según corresponda.	✓	✓
<b>D.S. 95/2001</b>	Establece criterios aplicables para determinar si se producen los efectos, características o circunstancias que diferencian la necesidad de desarrollar una DIA o EIA.	✓	✓

<b>Normativa</b>	<b>Temática</b>	<b>RM</b>	<b>VII Región</b>
<b>D.S. 47/92</b>	Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Dispone que los establecimientos industriales y de bodegaje son calificados caso a caso por el SESMA en consideración a los riesgos que estos puedan ocasionar a sus trabajadores, vecindario o comunidad.	✓	✓
<b>D.S. 144/61</b>	Regula emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza producidos por cualquier establecimiento fabril o lugar de trabajo, establece que éstos deberán captarse o eliminarse en forma tal que no causen peligros, daños o molestias al vecindario.	✓	✓
<b>D.S. 812/95</b>	Regula la emisión de material particulado por fuentes puntuales.	✓	✓
<b>D.S. 32/90</b>	Regla el funcionamiento de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos en situaciones de emergencia de contaminación atmosférica.	✓	✓
<b>Res. N°1.215/78</b>	Normas mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica	✓	✓
<b>DFL 725</b>	Regula la disposición adecuada de los residuos, desperdicios y basuras	✓	✓
<b>DFL 1/89</b>	Regula las instalaciones, obras y lugares destinados a la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos	✓	✓
<b>DFL 594/99</b>	Regula la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos sólidos industriales fuera del predio industrial	✓	✓
<b>DFL 90/96</b>	Fija los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir las instalaciones de almacenamiento, refinación, transporte y expendio al público de combustibles líquidos derivados del petróleo.	✓	✓
<b>NCh 1411/78 y NCh 2190/93</b>	Identificación e información de riesgos de materiales y sustancias peligrosas a través de rotulación y marcas en los envases de transporte y almacenamiento.	✓	✓

<b>Normativa</b>	<b>Temática</b>	<b>RM</b>	<b>VII Región</b>
<b>D.S. 146/84</b>	Establece los niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos generados por fuentes fijas.	✓	✓
<b>D.S. 594/99</b>	Establece que la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos sólidos industriales, fuera del predio industrial, requiere de autorización sanitaria.	✓	✓
<b>DFL 725</b>	Respecto de las instalaciones, obras y lugares destinados a la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos, se indican las materias que requieren autorización sanitaria expresa. También, regula lo relacionado con la higiene y seguridad del ambiente y de los lugares de trabajo.	✓	✓
<b>D.S. 4/92</b>	Regula la emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales ubicadas en la RM, y crea un sistema de compensación de emisiones para este mismo contaminante.	✓	
<b>D.S. 16 y 20</b>	Plan de Prevención y descontaminación Atmosférica para la RM. Tiene por objeto velar por el cumplimiento con las normas de calidad de aire, y así proteger la salud de la población.	✓	
<b>Res. N°20/94</b>	Regulación a instalación y operación de actividades productivas. Establece que las actividades productivas deberán ser clasificadas por el SESMA antes del permiso de edificación y que los proyectos deberán resolver de manera integral los impactos negativos que generen. Dispone los estándares mínimos de estacionamientos de vehículos motorizados. Define el uso de suelo específico de la zona en donde se construirá el proyecto.	✓	
<b>Res. N°15.027/94</b>	Establece procedimiento de declaración de emisiones para fuentes estacionarias ubicadas en la RM.	✓	

<b>Normativa</b>	<b>Temática</b>	<b>RM</b>	<b>VII Región</b>
<b>Res. N°5081/93</b>	Establece un sistema de declaración y seguimiento de residuos sólidos industriales para la RM, que regula la generación, acumulación, transporte y disposición final a objeto de prevenir riesgos y daños en el orden sanitario ambiental.	✓	

### **4.1.3. Discusiones Ubicación de la planta**

El proyecto posee dos ubicaciones posibles dadas sus características, planta Teno de Cementos Bío Bío, privilegiando la cercanía al consumidor del producto, y planta Pudahuel de Hidronor, que se encuentra más cercana a los proveedores y al lugar de disposición de los residuos y/o descartes del proceso.

Para determinar la ubicación del proyecto se consideraron dos factores principales: transporte, abarcando sus costos y sus riesgos asociados, y la normativa ambiental aplicable para cada alternativa.

En cuanto al transporte, el primer supuesto importante fue considerar solo el traslado de los residuos desde las 14 empresas modelo, lo que representa un flujo único en un año dado.

Otro supuesto que tiene efectos en el costo calculado es que solo se consideró el uso de camiones de 28 [ton], y el costo de éstos será por kilómetro, lo que no considera la economía de escala que se produce en el mercado del transporte, donde el valor del kilómetro recorrido es menor al recorrer una distancia mayor, es decir, el costo por kilómetro de un viaje dentro de la RM es más caro que el de un viaje desde la RM a la Región del Maule.

Para incluir el efecto de la consolidación de los camiones en el costo, se estimó que en el caso del transporte de la materia prima la consolidación es menor que para el transporte de CAS, esto se considera válido ya que la materia prima es heterogénea y se encuentra embalada o contenida dentro de los camiones dependiendo de su naturaleza y no siempre la cantidad proveniente de una empresa alcanzará a llenar un camión; mientras que el CAS corresponde a un producto uniforme y que puede ser transportado una vez que ya se ha producido lo suficiente como para llenar un camión.

Respecto a los riesgos asociados al transporte, se tiene el posible impacto social negativo que se puede generar en la comunidad de la región del Maule, en caso que el proyecto se ejecute en Teno, por el ingreso a su región de residuos desde la RM sin tratar.

La normativa ambiental aplicable es mayor en la RM que en la Región del Maule, esto dado que la primera ha poseído problemas de contaminación desde hace más de una década, lo que instó a las autoridades a mejorar la fiscalización y operación de las diversas industrias presentes en el territorio nacional. Otra perspectiva respecto a la normativa es que si la planta se instalará en Teno, se estaría extendiendo el negocio de Cementos Bío Bío desde producción de cemento a tratamiento y gestión de residuos, lo que se presenta como un desafío mayor, por la complejidad y el tiempo que abarca recibir la certificación para dicha actividad.

## 4.2. Caracterización materia prima

Tomando en cuenta los requerimientos establecidos por Cementos Bío Bío para el producto, es que se hace necesario conocer varias propiedades de la materia prima, para así lograr idear un proceso que establezca una dosificación que cumpla con los estándares establecidos.

Para determinar las propiedades se consideró necesario acotar el total de la materia prima disponible a un grupo menor de residuos, esto pues se disminuye el número de muestras a caracterizar en laboratorio y las restricciones a considerar para la dosificación de la materia prima. Al grupo de residuos acotados se le realizarán análisis de laboratorio para obtener su caracterización fisicoquímica y, así, poder extrapolar los datos a todos los residuos.

En la fase de Estudio de mercado, se obtuvo como resultado que Hidronor recibe residuos con las características necesarias para llevar a cabo el proyecto, además, se determinó que para entregar un insumo adecuado a la fase técnica era necesario acotar el universo de datos, por lo que seleccionaron una o dos empresas modelo por rubro, las cuales se caracterizan por presentar los mayores aportes en cuanto a tonelaje anual de residuos. Con lo anterior, se tiene que la base de datos ha reducido su contenido a lo observado en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2: Contenido de Base de datos acotada del año 2012 de Hidronor Chile S.A.**

<b>Residuos Totales</b>	10.684 [Ton/año]
<b>N° de Residuos</b>	320
<b>Empresas Totales</b>	14

Para realizar la caracterización de la materia prima la importancia se centra en los tipos de residuos, ya que las propiedades fisicoquímicas son particulares para cada uno de ellos, por lo que se podrá tomar un residuo modelo y estimar que sus propiedades son

las mismas para todos los residuos de su mismo tipo. Para ello, se clasificaron los 320 residuos en 12 tipos, que se enumeran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Clasificación de los Residuos de la Base de datos acotada**

<b>N°</b>	<b>Clasificación</b>
1	Materiales líquidos combustibles
2	Adhesivos envasados
3	Arenas
4	Aserrín
5	Plásticos
6	Carbón
7	Textiles
8	Papel y cartón
9	Lodos
10	Maderas
11	Resinas
12	Tierras

Para cada uno de los 12 tipos, se seleccionó un residuo representativo, que corresponde a aquel con mayor tonelaje dentro de su categoría. Con lo anterior se generó un grupo de 11 residuos modelo (ver Tabla 4.4). Se excluyó la categoría Materiales líquidos combustibles, puesto que ya se encuentran caracterizados.

**Tabla 4.4: Residuos modelo**

<b>Clasificación</b>	<b>Empresa</b>	<b>Residuo Modelo</b>	<b>Peso [Ton/año]</b>
<b>Materiales líquidos combustibles</b>	-	-	3.764
<b>Adhesivos envasados</b>	H	Adhesivos vencidos	64
<b>Arenas</b>	G	Arena contaminada con petróleo	248
<b>Aserrín</b>	K	Aserrín	1
<b>Plásticos</b>	F	Envases plásticos vacíos	5
<b>Carbón</b>	C	Carbón activado	19
<b>Textiles</b>	I	Paños y huaipes contaminados	32
<b>Papel y cartón</b>	G	Papeles y cartones	1
<b>Lodos</b>	C	Lodos planta fenoles	325
<b>Maderas</b>	C	Madera contaminada	34
<b>Resinas</b>	C	Resinas aniónicas	66
<b>Tierras</b>	C	Tierra con hidrocarburos	1.155
<b>Total</b>			<b>5.705</b>

La suma de flujos recibidos de estos 12 residuos modelo es de 5.705 [Ton/año] lo que representa un 23,5% del total de residuos valorizables recibidos por Hidronor el año 2012 y un 53,4% del total de residuos provenientes de las 11 empresas modelo

descritas en la Tabla 3.5. Este grupo de residuos resulta ser, dado los porcentajes anteriores, una muestra representativa del total de residuos recibidos por Hidronor y factible de analizar en laboratorio para obtener su caracterización fisicoquímica.

Por otro lado, se tiene que los requerimientos del cliente se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Concentración de elementos químicos: Cloro, Flúor, Azufre, Mercurio, Cadmio, Antimonio, Arsénico, Cobalto, Níquel, Cromo, Vanadio, Plomo, Manganeso, Berilio, Selenio, Teluro y PCBs.
- pH
- Poder calorífico
- Humedad
- Granulometría
- Densidad aparente

Dada la dificultad que presentará el definir la dosificación de materia prima en el caso base para el proceso de producción de CAS por la gran cantidad de propiedades que se presentarán como variables en el problema, es que sólo se analizarán las que se puedan obtener de bibliografía confiable y específica o en el laboratorio de Hidronor con el equipamiento actual y que representen propiedades significativas para la selección y dimensionamiento de equipos, estas son: poder calorífico, humedad, granulometría y densidad aparente, estableciendo que el estudio de los demás requerimientos se debe realizar en posteriores etapas de la ingeniería del proyecto.

#### **4.2.1. Poder calorífico**

La estimación del poder calorífico inferior de los 12 residuos modelo se realizó de forma teórica, a partir de datos bibliográficos y de experiencia del personal del laboratorio de Hidronor. Para el caso de la categoría Material líquido combustible, el dato se obtuvo a partir de análisis realizados por el laboratorio, lo que arrojó un valor de 5.966[kcal/kg].

Es importante mencionar que existe la tecnología para medir el poder calorífico de los sólidos involucrados como materias primas en este proceso, por lo que al operar la planta se debería contar con un calorímetro [20].

Para comenzar, se realizó una estimación del contenido de los residuos seleccionados con ayuda del personal del laboratorio de Hidronor y de un grupo de colaboración de memoristas del Departamento de Ingeniería Química y en Biotecnología de la Universidad de Chile [21], que se detalla a continuación:

- i. Adhesivo vencido  
Dado que el adhesivo Agorex es de los más vendidos en Chile, se estima que el residuo Adhesivos vencidos, corresponderá en un 80% a este producto, considerando que el 20% restante se compone de compuestos sin poder calorífico.
- ii. Arena contaminada con petróleo  
En el laboratorio de Hidronor le han realizado pruebas de composición para metales pesados a este material, y es a partir de esa experimentación que el personal del laboratorio estimó que el residuo está compuesto por un 10% de petróleo, que para efectos del cálculo del poder calorífico, se considerará como diésel, y un 90% de arena y otros compuestos sin poder calorífico.
- iii. Aserrín  
Se consideró que para que se envíe aserrín a Hidronor, dado el costo asociado, éste debe estar contaminado con petróleo. El personal de laboratorio estimó que ese contenido sería igual al 10% en peso. Nuevamente en este caso se considera el petróleo como diésel. El aserrín se considerará con una humedad de 18% y además se considerará que posee un 10% de compuestos sin poder calorífico.
- iv. Envase plástico vacío  
El polímero más común para fabricar envases plásticos es el polietileno, es por ello que se consideró que este material se compone en un 90% de este compuesto, y que puede poseer un 10% de compuestos sin poder calorífico.
- v. Carbón activado  
Generalmente el carbón activado es utilizado en el proceso de depuración de corrientes gaseosas, por su gran capacidad de captar los contaminantes gracias a su gran porosidad. Por lo anterior se considera que el 50% en peso del carbón activado contaminado ingresado a Hidronor corresponde a compuestos sin poder calorífico, y el otro 50% corresponderá a carbón sub-bituminoso.
- vi. Paños y huaipes contaminados  
Según personal del laboratorio la estimación de la composición de paños y huaipes es de un 50% algodón, 10% poliéster, 30% de petróleo y un 10% de compuestos sin poder calorífico, ya que estos en general son utilizados en la limpieza de equipos y superficies contaminadas con combustible.
- vii. Papeles y cartones  
Las empresas envían papeles y/o cartones de desecho, los que en general no se encuentran contaminados y llegan a la planta de Hidronor como agregado a la

carga peligrosa. De todas formas, como margen de seguridad, se considerará que un 10% de su peso corresponde a otros compuestos sin poder calorífico.

- viii. Lodo planta fenoles  
En pruebas realizadas dentro del laboratorio de Hidronor se obtuvo que estos lodos están compuestos por un 60% de arena u otros compuestos sin poder calorífico y un 40% de fenol en peso.
- ix. Madera contaminada  
Se considera que esta madera posee un 10% en peso de petróleo, un 80% de madera húmeda al 15% y un 10% de compuestos sin poder calorífico.
- x. Resina aniónica  
Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua; este tipo de resinas es utilizada para el tratamiento de aguas, donde se intercambian iones indeseados que se encuentren presente en el agua. Personal de laboratorio estimó que la presencia de materiales sin poder calorífico en las resinas puede llegar a un 80% en peso al ser desechadas.
- xi. Tierra con hidrocarburos  
En análisis de laboratorio realizados por Hidronor se ha determinado que en promedio estas tierras se componen de un 5% en peso de petróleo y un 95% de compuestos sin poder calorífico.

Con la estimación de la composición, se investigaron los poderes caloríficos inferiores de cada compuesto que forma parte de los residuos modelo. El resultado de la ponderación de poderes caloríficos se observa en la Tabla 4.5. Los detalles de los cálculos se encuentran en el Anexo B.

**Tabla 4.5: Estimación Poder Calorífico Inferior (PCI) Residuos Modelo**

<b>Residuo</b>	<b>Detalle</b>	<b>Estimación PCI [kcal/kg]</b>
Materiales líquidos combustibles	Promedio análisis laboratorio 2012	5.966
Adhesivo vencido	80% Agorex + 20% compuestos sin poder calorífico	5.419
Arena contaminada con petróleo	10% petróleo (diésel) + 90% arena y otros compuestos sin poder calorífico	1.097
Aserrín	80% aserrín + 10% petróleo (diésel) + compuestos sin poder calorífico	3.266
Envase plástico vacío	90% PET + 10% compuestos sin poder calorífico	6.496

<b>Residuo</b>	<b>Detalle</b>	<b>Estimación PCI [kcal/kg]</b>
Carbón activado	50% carbón sub-bituminoso + 50% compuestos sin poder calorífico	2.621
Paños y huaipes contaminados	30% petróleo + 50% algodón + 10% poliéster + 10% compuestos sin poder calorífico	6.096
Papeles y cartones	45% papel + 45% cartón + 10% compuestos sin poder calorífico	3.592
Lodo planta fenoles	40% fenol + 60% compuestos sin poder calorífico	3.203
Madera contaminada	80% madera + 10% petróleo + 10% compuestos sin poder calorífico	4.049
Resina aniónica	20% resina aniónica + 80% compuestos sin poder calorífico	956
Tierra con hidrocarburos	5% petróleo (diésel) + 95% compuestos sin poder calorífico	549

#### **4.2.2. Humedad**

La determinación de la humedad de los 11 residuos sólidos en estudio, se realizó mediante el *Método de la estufa* [22], el cual tiene por objetivo determinar el contenido de agua de la muestra. Los resultados experimentales del análisis se pueden ver a continuación en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6: Resultados experimentales análisis de humedad**

<b>Residuo</b>	<b>% Humedad</b>
Materiales líquidos combustibles	18
Adhesivos vencidos	5
Arena contaminada con petróleo	4
Aserrín	17,9
Envases plásticos vacíos	5
Carbón activado	12,2
Paños y huaipes contaminados	9,9
Papeles y cartones	5
Lodos planta fenoles	43,3
Madera contaminada	15
Resinas aniónicas	70,8
Tierra con hidrocarburos	11,5

#### **4.2.3. Densidad aparente**

La densidad aparente de los residuos sólidos se determinó mediante el procedimiento establecido en la NCh 1116 para áridos, mientras que para la muestra de la categoría

de Materiales líquidos combustibles se utilizó un picnómetro. Los resultados se observan en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7: Resultados experimentales medición densidad aparente**

<b>Residuo</b>	<b>Densidad aparente [ton/m<sup>3</sup>]</b>
Materiales líquidos combustibles	0,88
Adhesivos vencidos	0,99
Arena contaminada con petróleo	0,98
Aserrín	0,73
Envases plásticos vacíos	0,2
Carbón activado	0,55
Paños y huaipes contaminados	0,12
Papeles y cartones	0,49
Lodos planta fenoles	0,71
Madera contaminada	0,01
Resinas aniónicas	1,05
Tierra con hidrocarburos	1,44

#### **4.2.4. Granulometría**

La granulometría necesaria para dimensionar y seleccionar los equipos es bastante general, por lo que se realizaron medidas en terreno a muestras aleatorias de los residuos seleccionados y se determinaron rangos, lo anterior se observa en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8: Granulometría empírica**

<b>Residuo</b>	<b>Granulometría</b>
Materiales líquidos combustibles	N/A
Adhesivos vencidos	> 5[cm] 100%
Arena contaminada con petróleo	< 5[cm] 100%
Aserrín	< 5[cm] 100%
Envases plásticos vacíos	> 5[cm] 100%
Carbón activado	< 5[cm] 100%
Paños y huaipes contaminados	> 5[cm] 100%
Papeles y cartones	> 5[cm] 100%
Lodos planta fenoles	< 5[cm] 100%
Madera contaminada	> 5[cm] 100%
Resinas aniónicas	< 5[cm] 100%
Tierra con hidrocarburos	< 5[cm] 100%

#### **4.2.5. Discusiones Caracterización materia prima**

La caracterización de materia prima se realizó a partir de 12 muestras, cada una representando a una de las categorías desarrolladas al clasificar la materia prima. Se considera que la extrapolación de los resultados a toda la categoría a la cual pertenece cada muestra es aceptable, dado el nivel de ingeniería que se está realizando para evaluar el presente proyecto.

El estudio bibliográfico para la determinación del Poder Calorífico Inferior fue exhaustivo, y por lo tanto, se tienen resultados confiables para calcular la dosificación ideal para el caso base del proyecto.

Se utilizaron métodos certificados para las mediciones en laboratorio de humedad y densidad aparente de los residuos, lo que permite establecer que el error presente en los resultados es mínimo. En cuanto a la granulometría, se realizaron mediciones en terreno y estimaciones en conjunto con personal de la planta, ya que el detalle requerido en los resultados por las etapas de selección y dimensionamiento de equipos es bajo.

#### **4.3. Determinación del caso base**

El caso base se puede definir desde dos puntos de vista: disponibilidad de materia prima para procesar o demanda del producto por parte de los clientes. En este caso se utilizará la segunda perspectiva ya que, se proyecta que existirá un único cliente, por lo que si se genera más CAS, al procesar toda la materia prima disponible, éste producto no tendrá donde ser utilizado. Es importante mencionar, que a pesar de lo anterior, el flujo de materia prima también será considerado, ya que éste deberá cubrir la demanda calculada.

Al año 2012 existió un flujo de residuos valorizables igual a 24.312 [ton/año]. Esta cartera de residuos puede ser proyectada al futuro, lo que es factible ya que, por referencias de la empresa, la composición de los residuos industriales no varía significativamente año a año, por lo que se pronosticará el mismo crecimiento que el estimado para el total de los residuos recibidos. Dado lo anterior, en la Figura 4.3 se puede observar la tendencia de la recepción de residuos de la planta Pudahuel de Hidronor Chile S.A. desde el año 1998 al 2012 y la aproximación lineal de la tendencia.

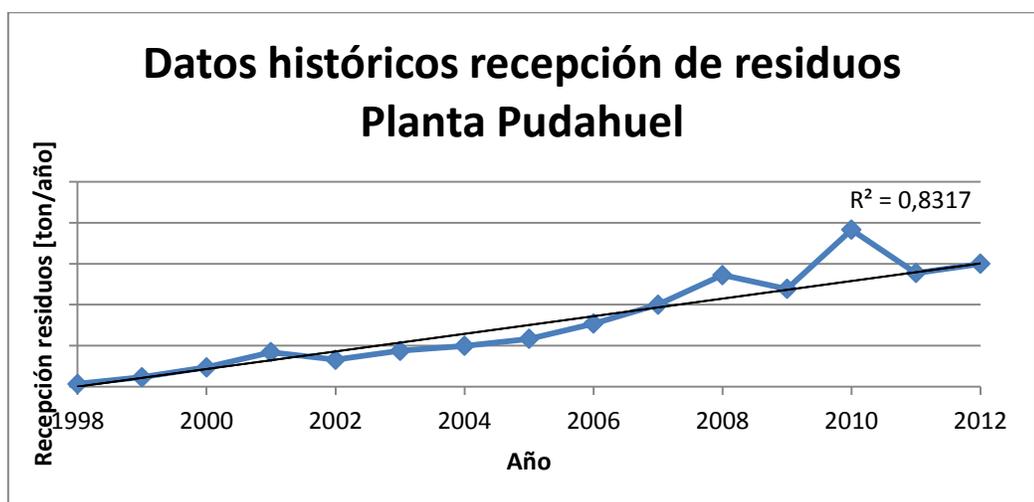


Figura 4.3: Datos históricos recepción de residuos Planta Pudahuel con aproximación lineal de la tendencia

Con la tendencia anterior, se realizó una proyección del flujo de residuos valorizables recibidos por Hidronor desde el año 2013 a 2023, lo que se puede observar en la Tabla 4.9. Con dicha información, se podrá confirmar si la disponibilidad de materia prima alcanza a cubrir la demanda de CAS por parte de Bío Bío.

Tabla 4.9: Proyección recepción de residuos valorizables

Flujo anual	2012	2013	2014	2015	2016	2017
[Ton/año]	24.312	26.114	27.916	29.718	31.520	33.323

Flujo anual	2018	2019	2020	2021	2022	2023
[Ton/año]	35.125	36.927	38.729	40.531	42.333	44.135

La demanda de CAS provista por Cementos Bío Bío, en un corto plazo corresponde a 0,5 [Ton/h] operando 24 horas los 7 días de la semana y en un largo plazo (sobre 5 años) se espera alcanzar, aumentando gradualmente, una capacidad de 3 [Ton/h]. Para calcular el flujo de producción necesario de la planta productora de CAS, es necesario llevar dichos flujos a régimen anual (ver Tabla 4.10) y así poder relacionarlo con la estimación de horas anuales trabajadas de la planta a diseñar.

Tabla 4.10: Horas trabajadas y flujo CAS demandado por Cementos Bío Bío (CBB) Teno

Horas trabajadas anualmente CBB Teno	
24	[h/día]
330	[días/año]
7.920	[h/año]
Flujo CAS demandado por CBB Teno	
Corto plazo	Largo plazo
0,5	3
[Ton/h]	[Ton/h]
3.960	23.760
[Ton/año]	[Ton/año]

Con estos datos se realizó la proyección de la demanda de CAS por 10 años, para lo cual se estimó que el flujo de 3 [Ton/h] lo demandarían a partir del año 6 (largo plazo), y que el aumento del consumo desde el año 1 al 5 se produciría en una tasa constante. Lo anterior se plasma en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11: Proyección demanda CAS por CBB Teno para 10 años**

<b>Demanda CAS</b>	<b>Año 1 (2014)</b>	<b>Año 2 (2015)</b>	<b>Año 3 (2016)</b>	<b>Año 4 (2017)</b>	<b>Año 5 (2018)</b>
<b>[Ton/año]</b>	3.960	7.920	11.880	15.840	19.800

<b>Demanda CAS</b>	<b>Año 6 (2019)</b>	<b>Año 7 (2020)</b>	<b>Año 8 (2021)</b>	<b>Año 9 (2022)</b>	<b>Año 10 (2023)</b>
<b>[Ton/año]</b>	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760

Dichos flujos de CAS demandado deben ser cubiertos por la materia prima disponible en el año correspondiente (tomando una eficiencia global del proceso de un 92,8% [23]), lo que efectivamente ocurre. Dado lo anterior, lo importante es que la producción de la planta a diseñar sea concordante a la demanda, para lo cual se debe definir una capacidad de diseño para la planta que se ajuste a las variaciones anuales estimadas. Ya que la desviación de la demanda es importante en los primeros años, se decidió variar el número de turnos por día y el número de días trabajados al año para no invertir en una planta de máxima producción desde el primer año, cuya capacidad ociosa sería alta.

Se consideraron 6 tipos de regímenes horarios distintos con los que podría trabajar la planta CAS, los que consideran de 1 a 3 turnos de 8 horas diarias, y la posibilidad de trabajar los fines de semanas y feriados, aumentando los días trabajados al año de 240 a 330 (ver Tabla 4.12).

**Tabla 4.12: Posibles horas anuales de trabajo en planta CAS**

<b>Posibles horas anuales de trabajo de Planta CAS</b>						
	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>	<b>Caso 5</b>	<b>Caso 6</b>
<b>[h/día]</b>	8	16	24	8	16	24
<b>[día/año]</b>	240	240	240	330	330	330
<b>[h/año]</b>	1.920	3.840	5.760	2.640	5.280	7.920

Con lo anterior y el flujo de producto demandado por CBB Teno, se calculó el flujo para el cual se debe diseñar la planta, la decisión utilizó como insumo la información contenida en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Cálculo flujo de diseño planta producción de CAS

		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>[h<sub>trabajo</sub>/año]</b>	<b>Demanda anual [Ton CAS/año]</b>	3.960	7.920	11.880	15.840	19.800	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760
1920	Flujo de diseño [Ton CAS/h]	2,06	4,12	6,18	8,25	10,31	12,37	12,37	12,37	12,37	12,37
3840	Flujo de diseño [Ton CAS/h]	1,03	2,06	3,093	4,125	5,15	6,18	6,18	6,18	6,18	6,18
5760	Flujo de diseño [Ton CAS/h]	0,68	1,37	2,06	2,75	3,43	4,12	4,12	4,12	4,12	4,12
2640	Flujo de diseño [Ton CAS/h]	1,5	3	4,5	6	7,5	9	9	9	9	9
5280	Flujo de diseño [Ton CAS/h]	0,75	1,5	2,25	3	3,75	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
7920	Flujo de diseño [Ton CAS/h]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3	3	3	3

Observando la tabla anterior, y por recomendaciones de expertos, se buscará el flujo de diseño óptimo, que asegure que la capacidad de la planta sea lo más parecida a la producción, con la menor inversión inicial posible. Lo anterior se logra con la compra de 2 módulos de producción gemelos, cada uno con una capacidad de producción de 2,1 [Ton/h], lo que considerando una eficiencia global del proceso de 92,8% [23] corresponde a un flujo de entrada de materia prima igual a 2,26 [Ton/h], a lo cual además, se le aplicará un factor de seguridad igual a 1,2; por lo tanto el dimensionamiento de los equipos de cada módulo se realizará para un flujo de entrada igual a 2,7 [Ton/h].

Volviendo a la Tabla 4.13, para que la producción siga a la demanda en el año 1 la planta funcionará 1.920 [h/año], al siguiente año se aumentarán a 2 turnos por día con lo que aumentan las horas trabajadas a 3.840 [h/año]; al año 3, serán 3 los turnos diarios que corresponden a 5.760 [h/año]; al cuarto año, se aumentarán los días trabajados de 240 a 330, abarcando fines de semanas y feriados, y se mantendrán los 3 turnos con lo que se aumentan las horas a 7.920 [h/año]; en el año 5 deberá comenzar a operar el segundo módulo, y con ello, se requerirán 3 turnos diarios, durante 240 días al año, para cubrir la demanda de largo plazo (año 5 en adelante).

En cuanto a la composición de la materia prima, el caso base estará dado por una segregación del flujo de la entrada que permita llegar a niveles adecuados de poder calorífico. Para la estimación se utilizó como base la distribución de la materia prima de entrada, y a ésta se le aplicaron correcciones no mayores a 20% para lograr el óptimo en cuanto a la composición, arrojando como resultado lo plasmado en la Tabla 4.14.

**Tabla 4.14: Composición flujo de entrada al proceso**

<b>Residuo</b>	<b>Composición [% peso/peso]</b>
Materiales líquidos combustibles	8
Adhesivos envasados	5
Arenas	10
Aserrín	2
Plásticos	16
Carbón	5
Textiles	10
Papel y cartón	8
Lodos	16
Maderas	5
Resinas	3
Tierras	12

### **4.3.1. Discusiones Caso base**

La determinación del caso base a partir de la demanda del producto por parte del cliente se sustenta en que el proyecto presenta, de manera preliminar, un único comprador, por lo que producir mayor cantidad de CAS no tiene sentido debido a que no se podría vender.

Para proyectar la materia prima disponible para el proyecto, se realizó una estimación a partir de la proyección temporal de la recepción de residuos industriales en la planta Pudahuel de Hidronor desde el año 1998 a 2012, con lo que se determinó un valor hasta el año 2023, el que corresponde al décimo año de operación si la planta comienza a funcionar el año 2014. Este cálculo se considera válido dado que el porcentaje de los residuos recibidos que corresponden a material revalorizable energéticamente no presenta variaciones significativas según los datos históricos disponibles.

La demanda de CAS entregada por Cementos Bío Bío no posee el detalle necesario para determinar un valor anual de forma específica, por lo que se estimó que el largo plazo correspondía a 5 años a partir del inicio del proyecto y que del año 1 al 5 existiría un crecimiento a una tasa constante, lo que no debería diferir considerablemente de la realidad. Con la consideración anterior, se tiene que el ingreso de la materia prima es mayor a la demanda a lo largo de los 10 años de operación, y el flujo no utilizado en promedio corresponde a un 44%.

Para calcular el flujo de diseño de la planta, se proyectó la utilización de diferentes horarios y días de trabajo, lo que de acuerdo a expertos de la empresa Hidronor es factible, y se prefiere por sobre la posibilidad de realizar una inversión alta en los primeros años y que parte de la capacidad de la planta no se utilice.

En cuanto a la dosificación de la materia prima, se establecieron porcentajes de composición que permiten, de forma holgada, que las propiedades del producto de salida se encuentren bajo los parámetros establecidos por el consumidor. Esto se encuentra basado en los resultados de la caracterización realizada anteriormente y que se encuentra plasmada en la sección 4.2.

### **4.4. Determinación etapas del proceso y condiciones de operación**

El proceso diseñado consiste en la producción de Combustible Alternativo Sólido a partir de residuos industriales, tanto sólidos como líquidos, por medio de operaciones físicas, como trituración, separación y mezclado, las cuales tienen por objetivo adecuar

la forma y el tamaño de las materias primas de tal manera que puedan ser ingresadas al horno clinker que se utiliza en la producción de cemento.

Como ya se ha detallado en secciones anteriores del trabajo, los objetivos y parámetros de diseño se basarán en los requerimientos establecidos por la empresa Cementos Bío Bío S.A. (ver Tabla 3.1), quienes serán los únicos consumidores del producto a generar (preliminarmente).

El diseño del proceso se basó en información bibliográfica respecto a otras plantas de producción de Combustible Alternativo Sólido o Refuse Waste/Derived Fuel [23], [24], [25], y a desarrollo personal y en asesoría con los profesores guía, co-guía e integrantes.

A continuación se enumerarán y describirán las etapas que se diseñaron para el proyecto:

#### **4.4.1. Separación 1**

Para el presente estudio se considerará que el pesaje y validación de los residuos que ingresan a la empresa Hidronor no forman parte de las etapas de esta línea de producción.

Los residuos valorizables energéticamente que son ingresados a Hidronor son llevados al patio de recepción. En general, estos residuos arriban de las siguientes formas:

1. Tambores o IBC<sup>3</sup>: Aquellos residuos líquidos con alto poder calorífico tales como aceites, solventes, pinturas con solventes, etc.
2. Pallets: Residuos como papel, cartón y envases plásticos. Además es común que estos residuos lleguen en IBC adecuados para almacenar sólidos.
3. Tambores para sólidos: Residuos como adhesivos envasados, carbón activado, paños y huaipes contaminados, lodos, resinas, aserrín contaminado, arenas y tierras contaminadas.
4. Camiones tolva: Residuos sólidos o pastosos como lodos, maderas contaminadas, aserrín contaminado, arenas y tierras contaminadas.

En el patio deberán ser clasificados según granulometrías y almacenados en fosas y/o bodegas que posean las características necesarias.

Es importante mencionar que la presente etapa es discontinua, pues depende de la recepción de residuos.

---

<sup>3</sup> IBC: Estanque para líquidos de 1000[lit] de capacidad con una estructura exterior de rejillas tubulares de acero.

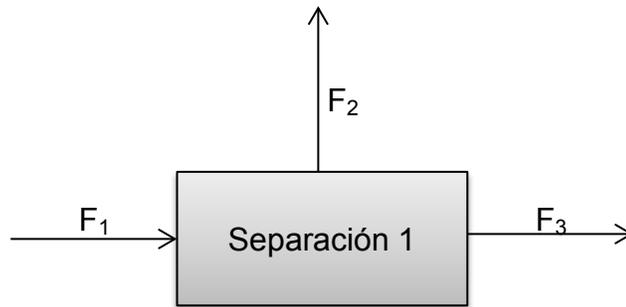


Figura 4.4: Esquema Etapa 1

Corriente de entrada ( $F_1$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente

Corriente de salida ( $F_2$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $< 5[\text{cm}]$

Corriente de salida ( $F_3$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $> 5[\text{cm}]$

#### 4.4.2. Reducción de tamaño 1

Corresponde a una etapa de acondicionamiento de residuos sólidos, en donde se busca disminuir el tamaño de aquellos residuos de grandes dimensiones. Se espera que el producto de esta etapa sean sólidos con una granulometría menor a  $5[\text{cm}]$ .

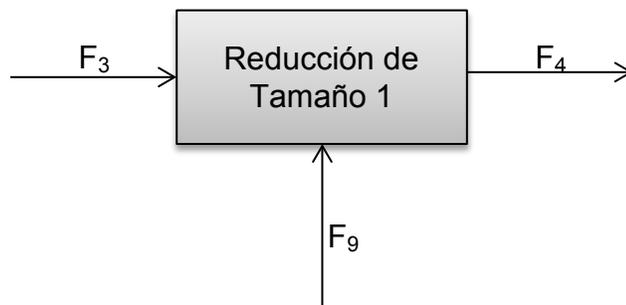


Figura 4.5: Esquema Etapa 2

Corriente de entrada ( $F_3$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $> 5[\text{cm}]$

Corriente de entrada ( $F_9$ ): Reciclo Separación 2 (CAS con granulometría  $> 10[\text{cm}]$ )

Corriente de salida ( $F_4$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $< 5[\text{cm}]$

### 4.4.3. Mezclado 1

En esta etapa se mezclan los sólidos en un contenedor de gran tamaño con el objetivo de lograr una composición ideal en cuanto a parámetros fisicoquímicos, como lo son poder calorífico y humedad.

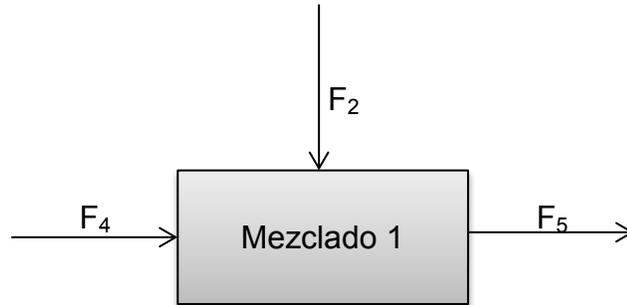


Figura 4.6: Esquema Etapa 3

Corriente de entrada ( $F_2$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $< 5[\text{cm}]$

Corriente de entrada ( $F_4$ ): Residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $< 5[\text{cm}]$

Corriente de salida ( $F_5$ ): Mezcla homogénea de residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $< 5[\text{cm}]$

### 4.4.4. Separación 2

El objetivo de esta etapa es la separación de todo material metálico ferromagnético que pueda estar presente en el producto.

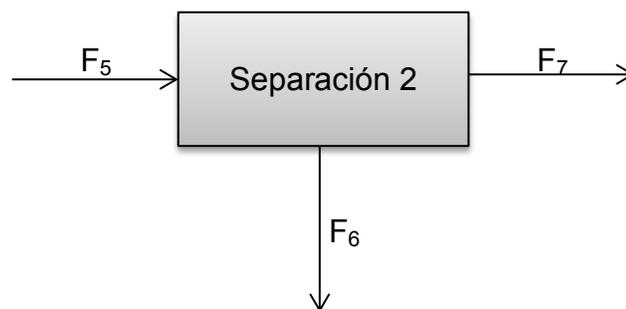


Figura 4.7: Esquema Etapa 4

Corriente de entrada ( $F_5$ ): Mezcla homogénea de residuos sólidos valorizables energéticamente con granulometría  $< 5[\text{cm}]$

Corriente de salida ( $F_6$ ): Sólidos metálicos

Corriente de salida ( $F_7$ ): Mezcla homogénea de residuos sólidos valorizables con granulometría  $< 5[\text{cm}]$  y libre de metales (CAS)

#### 4.4.5. Separación 3

El objetivo de esta etapa es separar el CAS según tamaño de partícula en 2 grupos: el primero que posea un tamaño mayor a 10[cm], por lo cual debe ser recirculado a la etapa Reducción de tamaño 2, y el segundo que posea un tamaño menor a 10[cm].

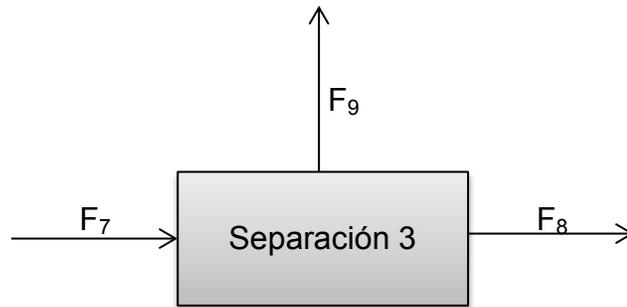


Figura 4.8: Esquema Etapa 5

Corriente de entrada ( $F_7$ ): Mezcla homogénea de residuos sólidos valorizables libre de metales (CAS)

Corriente de salida ( $F_8$ ): CAS con granulometría < 10[cm]

Corriente de salida ( $F_9$ ): CAS con granulometría > 10[cm]

#### 4.4.6. Mezclado 2

En esta última etapa se debe mezclar el CAS con Materiales líquidos combustibles, obteniendo así el producto final con las características indicadas. La proporción de mezcla en este diseño preliminar será fija, pero luego de adquirir experiencia en el funcionamiento de la planta, la proporción debería depender de las propiedades del material proveniente de ambas corrientes de entrada.

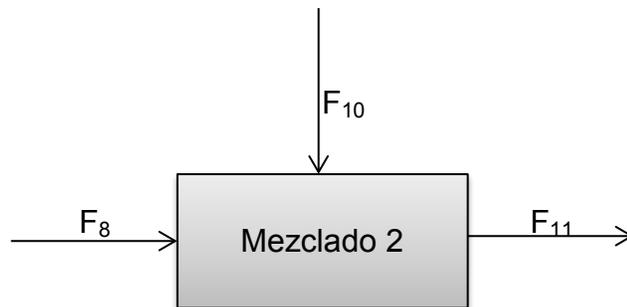


Figura 4.9: Esquema Etapa 6

Corriente de entrada ( $F_8$ ): CAS

Corriente de entrada ( $F_{10}$ ): Materiales líquidos combustibles

Corriente de salida ( $F_{11}$ ): CAS final

En la Figura 4.10, es posible observar un esquema resumen del proceso, para apreciar de manera general la secuencia de las etapas.

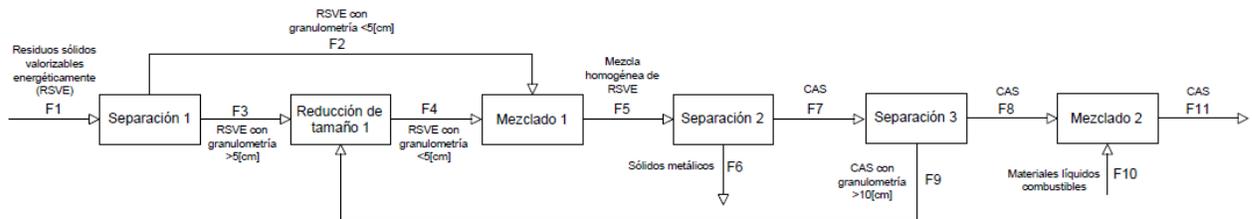


Figura 4.10: Diagrama de bloques del proceso

#### 4.4.7. Condiciones de operación

Dentro del proceso, la primera etapa se operará discontinuamente, dado que dependerá de ciertos factores naturalmente discontinuos, como lo es la llegada de residuos a la planta. Luego de la clasificación, se asegurarán las cantidades de materia prima necesarias para que el proceso a partir del mezclado 1 hasta el mezclado 2 sea continuo, esto será posible si es que los contenedores en que se ingresará la materia prima ya clasificada son del tamaño suficiente para acumular lo necesario para operar la planta durante un día en horario de trabajo normal. Este régimen de operación es consecuente con el caso base y la demanda estimada del producto por parte del cliente.

Como se explicó en el párrafo anterior, la autonomía de la planta dependerá directamente del espacio destinado para la acumulación de materias primas, lo que se logrará asegurar con el diseño de dichas áreas, dicho cálculo se puede apreciar en el Anexo F.

#### 4.4.8. Discusiones Etapas del proceso y Condiciones de operación

Las etapas del proceso fueron determinadas a partir de bibliografía y el desarrollo de ingeniería aplicada especialmente enfocada en las condiciones que se tienen para este caso en particular.

El objetivo otorgado a cada etapa es preliminar, y con el desarrollo de las siguientes fases de ingeniería se prevé que existirán cambios.

La aplicabilidad de las condiciones de operación diseñadas es alta, dado que el tener fosas o bodegas de almacenamiento adecuadas, es posible asegurar la continuidad de las 4 últimas etapas del proceso.

## **4.5. Selección y Dimensionamiento de equipos, BM<sup>4</sup> y BE<sup>5</sup>**

El proceso de selección y dimensionamiento de equipos se realizó tanto para las operaciones unitarias, como para el transporte de materiales entre las operaciones unitarias. Esto se llevó a cabo tomando en cuenta que el proceso posee sólo 6 etapas, por lo que la probabilidad que la adquisición de los equipos de transporte de materiales representen un porcentaje importante de la inversión total es alta, por lo que su valorización ayudará a lograr mayor exactitud en los resultados de la evaluación económica que se presenta en el siguiente capítulo.

### **4.5.1. Operaciones unitarias**

Para cada una de las operaciones unitarias se seleccionará y dimensionará un equipo que logré cumplir de la mejor manera posible con el objetivo de operación de la etapa.

Para definir en detalle cada uno de los equipos, la estrategia de trabajo utilizada fue seguir los siguientes pasos:

- (1) Descripción de los objetivos de cada etapa
- (2) Estudio bibliográfico de las tecnologías que existen para lograr dicho objetivo
- (3) Selección de una de las tecnologías
- (4) Aplicación de supuestos (eficiencias) para desarrollar un BM y un BE preliminar
- (5) Dimensionar teóricamente los equipos, entregando como resultado la dimensión característica necesaria para la posterior etapa de cotización o valorización
- (6) Cotización o valorización
- (7) Actualización del BM y dimensionamientos
- (8) Determinación de las necesidades energéticas del equipo

En esta sección del informe solo se plasmará un resumen del ciclo completo del trabajo realizado. El punto (4) se omitirá por redundancia respecto a los resultados finales, respecto al punto (5), se tiene que la dimensión característica para cotizar fue el flujo de entrada arrojado por el BM, y por último, los resultados de los puntos (7) y (8) se plasman en el Diagrama de Flujos final (Anexo C), mientras que la metodología del punto (7) con su respectivo ejemplo de cálculo se observa en el Anexo D.

En cuanto al punto (4) es importante notar que por la inexistencia de cambios de temperatura dentro del proceso, no existen entalpías asociadas, por lo que la ecuación general para el balance de energía no entrega información extra.

---

<sup>4</sup> BM: Balance de Masa

<sup>5</sup> BE: Balance de Energía

Para lograr un entendimiento cabal de la descripción del trabajo realizado es que se recomienda dirigirse anticipadamente al Anexo C, donde se encuentra el Diagrama de Flujos final del proceso, con el resumen de los resultados de esta sección.

#### **4.5.1.1. Separación 1**

Esta operación unitaria es una separación por granulometría de la materia prima. Esto es necesario debido a que uno de los requerimientos del producto final es un rango de tamaño, para lo que se usan equipos para reducir tamaño, los que se estima son diferentes dependiendo de las características de la materia prima y del objetivo de la corriente de salida.

La separación requiere seccionar la corriente  $F_1$ , según dos granulometrías distintas:

- RSVE<sup>6</sup> con granulometría mayor a 5[cm]
- RSVE<sup>6</sup> con granulometría menor a 5[cm]

Dado que los residuos ingresan a Hidronor agrupados según su origen y características principales por lo dispuesto en el DS 148 [5], es posible realizar esta operación de manera manual y prescindiendo de un equipo, distinguiendo tambores, IBC o pallets en el patio de recepción.

Para efectos del BM, la eficiencia de la etapa será de un 100%, por lo que la separación será óptima, el resultado se puede observar en el 0 y la metodología en el Anexo D.

La variable importante a dimensionar en este caso es: Velocidad de separación [kg/h/persona]. Este parámetro es usualmente utilizado en el tratamiento de residuos domiciliarios, en donde la velocidad difiere según el material (Periódicos y cartón, Vidrio mezclado, Vidrio por color, Plástico (PET, HDPE), Latas de aluminio, entre otros). Como en este caso se discrimina por tamaño, se puede decir que la dificultad es menor, por lo que se asignará la mayor velocidad en separación manual encontrada para residuos domiciliarios [11], igual a 700–4.500[kg/h/persona].

#### **4.5.1.2. Reducción de tamaño 1**

El objetivo de esta etapa es reducir el tamaño de aquellos residuos de mayores dimensiones, es decir, aquellos que posean una granulometría mayor a 5[cm], a una granulometría menor a 5[cm]. Como ya se detalló anteriormente, esta reducción de tamaño constituye una necesidad específica para el producto.

Entre los tipos de equipos de reducción de tamaño se encuentran:

---

<sup>6</sup> Residuos Sólidos Valorizables Energéticamente.

i. Molino de Martillo

Es usado comúnmente para los residuos mezclados, se compone principalmente de: rotor, martillo, barra rompedora y parrilla de aperturas. Según la orientación del rotor puede ser del tipo vertical u horizontal.

En su operación, los martillos del molino, que están acoplados a un elemento giratorio, golpean el material mientras ingresa, forzando al mismo a salir de la unidad, la que se encuentra equipada con parrillas de diversos tamaños, que dejan salir el material triturado cuando alcanza el tamaño especificado.

ii. Molino batiente

Este equipo, similar al molino de martillo, proporciona solamente una trituración del tipo gruesa, puesto que tienen una separación mayor de los martillo. Su sistema es considerado de un solo paso, ya que no cuenta con la parrilla de apertura. A menudo, este equipo se utiliza como rompedor de bolsas.

iii. Trituradora cortante

Este equipo, de alto esfuerzo de torsión y bajas revoluciones, cuenta con dos ejes paralelos horizontales que giran en forma contraria y cuentan con una serie de discos montados perpendicularmente, que sirven de cortadores. El material a triturar se va al centro de los ejes, reduciendo el tamaño mediante una acción de rasgado entre los discos. Debido al torque y su acción de corte, este tipo de máquinas se usan generalmente para materiales difíciles de triturar, como neumáticos, aluminio y plástico.

Dadas las características de los materiales que ingresan a la etapa Reducción de tamaño 1 (dureza principalmente) es necesaria una trituradora cortante.

La búsqueda arrojó que un equipo que es capaz de triturar todos los materiales considerados para este proyecto es la Tritotutto modelo 100/80D (Figura 4.12: Esquema Tritotutto modelo 100/80D (medidas en centímetros) [26]). En la Figura 4.11 se observa un esquema del equipo donde se identifican sus partes principales, y en la Figura 4.12 un esquema con sus medidas principales en [cm].

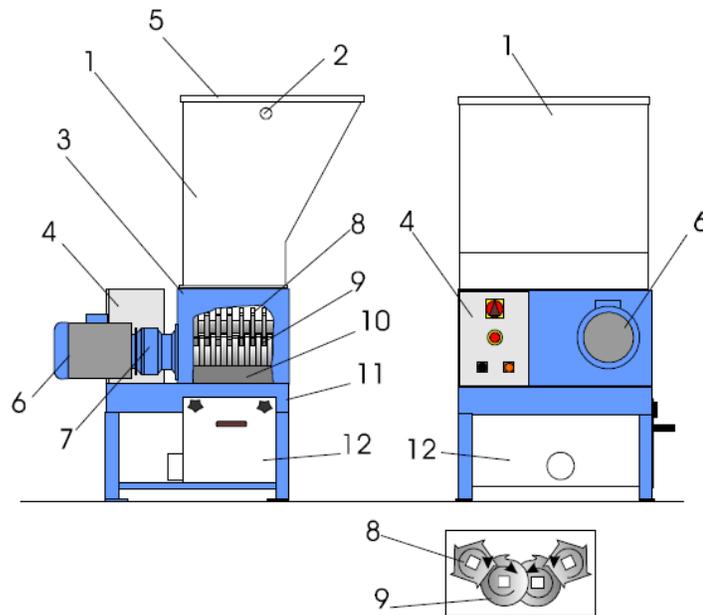


Figura 4.11: Esquema partes trituradora. (1. Tolva de carga, 2. Orificio de levantamiento y de transporte, 3. Cuerpo de la máquina, 4. Cuadro eléctrico, 5. Tapa de la tolva, 6. Motor, 7. Reductor epicycloidal, 8. Discos de introducción, 9. Grupo fresas, 10. Rejilla, 11. Bastidor de la máquina, 12. Tanque con boca de vaciado).

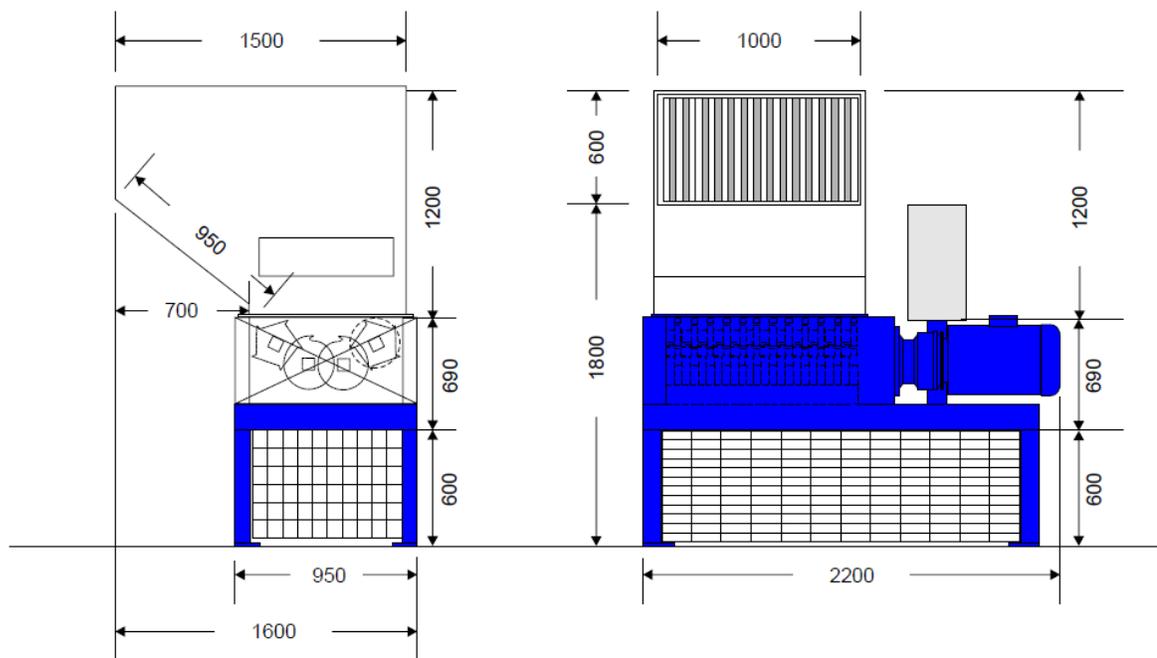


Figura 4.12: Esquema Tritotutto modelo 100/80D (medidas en centímetros) [26]

Esta trituradora tiene una eficiencia de catálogo del 95%, es decir, del total de la materia prima que ingresa, un 95% saldrá con una granulometría menor a 5[cm]. Con lo anterior, es posible desarrollar el BM, cuyo resultado se observa en el diagrama de flujos del Anexo C; y la metodología, en el Anexo D.

### 4.5.1.3. Mezclado 1

En esta operación unitaria se busca mezclar la corriente F2 y F3, logrando con ello una salida homogénea en cuanto a concentración de los diversos componentes que constituyen la materia prima.

Dado que los materiales a mezclar son sólidos, los mecanismos de mezclado son los siguientes:

- Movimiento convectivo: Este movimiento puede consistir en la inversión del lecho de sólido o por arrastre mediante una hélice o un tornillo sinfín.
- Mezclado por difusión: Se debe al movimiento aleatorio individual de las partículas.
- Mezclado por cizalla: Planos de deslizamiento en la masa de polvo en el interior del mezclador.

Además, se tiene que los factores que intervienen en el proceso son: tamaño, forma, rugosidad y densidad de las partículas, y proporción de los componentes de la mezcla.

Aunando lo anterior, se tiene que los dispositivos mezcladores de sólidos son los siguientes:

i. Mezcladores móviles (o de carcasa móvil)

Tienen facilidad para cargar, descargar y limpiar, son versátiles, son aptos para materiales friables, pero no para materiales cohesivos.

ii. Mezcladores estáticos con agitación interna

Realizan movimiento convectivo, difusivo y de cizalle, no apto para materiales friables y permite granulación húmeda.

iii. Mezcladores estáticos

Apto para materiales poco cohesivos y aplica mecanismo convectivo.

Dado que alguno de los compuestos que se requieren mezclar en este proyecto poseen una humedad mayor a 50%, y que el producto se espera tenga una humedad promedio de 20% es que se considera que existirá granulación húmeda, por lo que los dispositivos estáticos con agitación interna se presentan como la mejor elección.

Luego de consultas en el mercado de este tipo de tecnología, el equipo seleccionado es un Mezclador con doble eje (o Double Shaft Mixer), ver Figura 4.13.

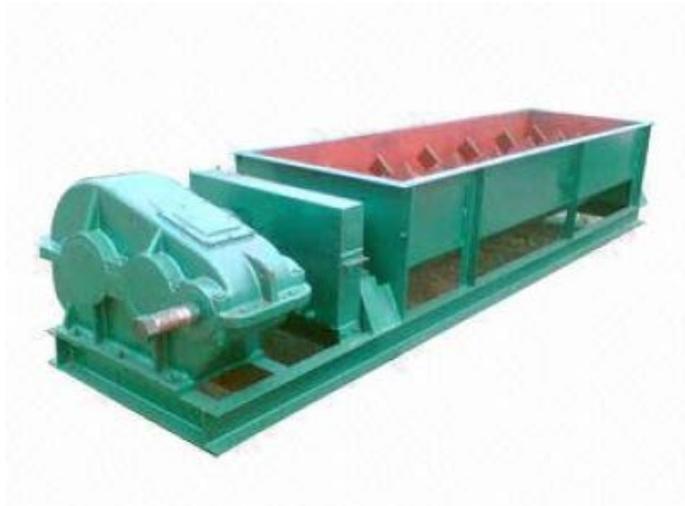


Figura 4.13: Esquema Mezclador de doble eje para sólidos

Este equipo no fue cotizado, por lo que no se seleccionó un modelo, pero desde la página web de una página exportadora se lograron extraer los datos necesarios para desarrollar este estudio, como el tamaño del equipo, capacidad de producción y potencia consumida. [27]

Se considerará, que no se retienen sólidos en este equipo por lo que la corriente F5 será igual a la suma de F2 y F4, el resultado de lo anterior se observa en el Diagrama de Flujos del Proceso en el Anexo C y el detalle de la metodología en el Anexo D.

#### 4.5.1.4. Separación 2

En esta etapa se busca extraer los sólidos metálicos del producto, pues estos no se pueden ingresar al horno clínker en el proceso de producción de cemento, pues se mezclarían con el producto de salida, lo cual no puede ocurrir por especificaciones de calidad.

La separación magnética y por campo eléctrico utilizan las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales (carga eléctrica y permeabilidad magnética). Los equipos comúnmente utilizados son:

i. Separador magnético

Esta técnica es usada para separar metales férricos. Estos separadores pueden ser tipo cinta, o de dos tambores.

ii. Separador electroestático

Este equipo permite separar materiales no conductores de los que sí lo son (metales). También permite separar materiales conductores, unos de otros, mediante la permisibilidad eléctrica del material.

iii. Separador por corriente Foucault

Este equipo basa su operación en la Ley de Faraday sobre inducción magnética; en donde, si se coloca en un campo variable un elemento conductor como el aluminio, se genera el flujo de una corriente que induce un campo magnético opuesto en polaridad al campo aplicado, expulsando al conductor fuera del campo magnético, separando el material.

Dado que el proyecto actual abarca la fabricación de CAS grueso, para lo cual el único objetivo es separar el fierro del resto de los materiales, no existe necesidad de separar los materiales conductores entre sí, y como además se busca minimizar los costos de inversión, es que se descarta el separador electrostático y el separador por corriente Foucault pues representan tecnologías más avanzada que la necesaria.

El separador magnético no fue cotizado, por lo que su dimensionamiento y valorización se llevó a cabo a partir de datos expuestos en otros trabajos ya realizados respecto a este tema [11], tomando relaciones respecto al flujo necesario a tratar que corresponde a F5.

Se consideró un separador magnético tipo cinta con una eficiencia del 99%, lo cual puede variar al obtener una cotización directa por medio de proveedores.

Los resultados del BM obtenido para esta etapa se observan en el Diagrama de Flujos del Proceso (Anexo C) y su metodología se encuentra plasmada en el Anexo D.

### **4.5.1.5. Separación 3**

Esta etapa tiene por objetivo separar las partículas que tengan un tamaño mayor a 10[cm] de la corriente F7, esto pues son de un tamaño mayor al permitido por la caracterización del CAS entregada por Cementos Bío Bío. La presencia de este material de tamaño mayor se debe a la ineficiencia de la etapa de Reducción de tamaño 1.

Se tiene que la operación mecánica utilizada para separar mezclas de materiales de distintas formas y tamaños es la cribación.

En los tipos de cribas se destacan:

i. Criba giratoria

La criba giratoria más usada en el procesamiento de residuos es el trómel o criba de tambor giratoria. Este equipo se usa para separar materiales en varias fracciones de tamaño. Su operación considera la alimentación por el fondo del tambor perforado

inclinado, el cual mientras gira, deja pasar el material fino mientras que el grueso permanece en el equipo.

ii. Cribas vibratorias

Este tipo de equipos se usa para separar pequeños materiales mediante una placa horizontal inclinada que vibra de un lado a otro, permitiendo la separación del material.

iii. Criba

Este equipo cuenta con 2 ejes horizontales paralelos con discos entrelazados dentados, en donde la fracción ligera se separa entre los espacios de los discos, y la fracción gruesa corre por sobre los discos, de manera de separar el material. Se puede separar una gran gama de materiales de diferentes tamaños en este equipo, mediante el ajuste en el espacio de los discos giratorios.

Teniendo en cuenta que es posible que en el futuro la empresa cliente presente la necesidad de un CAS fino, además del CAS grueso, y que entre las 3 opciones anteriores, las cribas giratorias son las únicas que pueden separar por más de 2 rangos de tamaño, es que se ha decidido optar por este tipo de equipo, específicamente por un trómel.

Para efectos del presente estudio, este equipo sólo separará la corriente de entrada F7 en dos, una con los sólidos de tamaño menor a 10[cm] y otra con aquellos de tamaño mayor a 10[cm] los cuales serán recirculados a la etapa de Reducción de tamaño 1.

No se realizó una cotización directa de este equipo, por lo que sus características principales como largo, diámetro y consumo energético fueron extrapoladas, con la capacidad necesaria calculada mediante el balance de masa de las etapas anteriores, a partir de información bibliográfica [23]. Para observar el resultado, ver el Diagrama de flujos del proceso en el Anexo C y la metodología en el Anexo D.

#### **4.5.1.6. Mezclado 2**

En esta operación unitaria se busca mezclar homogéneamente la corriente F8, que corresponde a una mezcla homogénea de productos sólidos revalorizables energéticamente con una granulometría menor a 10[cm], con la corriente F10, que se compone de una mezcla de Materiales Líquidos Combustibles, que agregarán poder calorífico al producto.

Como el porcentaje en peso de la corriente F10, respecto a la corriente de salida F11 (que corresponde a la suma de F8 y F10), es sólo de un 8% se tiene que la operación

se puede considerar como mezcla de materiales sólidos, por lo que la mejor opción es utilizar, al igual que en el Mezclado 1, es un mezclador con doble eje.

La descripción del equipo se obtuvo a partir de la extrapolación de los datos presentes en bibliografía [27], y al igual que en el Mezclado 1, se considera que el equipo no presenta retención de producto en su interior, por lo que la corriente de salida F11 será exactamente igual a la suma de las corrientes F8 y F10. El resultado numérico del BM se puede observar en el Anexo C y la metodología de cálculo en el Anexo D.

#### **4.5.2. Transporte de materiales**

La selección de equipos para el transporte de materiales entre operaciones unitarias se llevó a cabo mediante recomendaciones de expertos en el área de proyectos de la empresa que encargó este estudio.

Se tiene que el transporte entre la etapa Separación 1 y la etapa Reducción de tamaño 1 se llevará a cabo gracias a la operación de un cargador frontal, el que además transportará los materiales desde la Reducción de tamaño 1 y el Mezclador 1, pasando por medio de la zona de Acopio de materiales revalorizables que se describirá en la próxima sección Layout.

El cargador frontal que se requiere debe poder transportar 2,7 [ton/h], tomando en consideración la densidad aparente promedio arrojada por las pruebas de laboratorio (ver Tabla 4.7) y la composición porcentual de cada residuo estimada para en el caso base (ver Tabla 4.14), esto corresponde a 4 [m<sup>3</sup>/h] aproximadamente, y se tiene que la capacidad de la pala del cargador frontal más pequeño ofrecido por los proveedores del servicio de arriendo de maquinarias es de 1,9[m<sup>3</sup>], modelo John Deere 444K [28], lo que claramente bastará para cubrir las necesidades operacionales.

Para el transporte del material entre el resto de las operaciones unitarias, se utilizarán cintas transportadoras, las que dado que no fueron cotizadas, fueron dimensionadas teóricamente (el detalle de los cálculos se aprecian en el Anexo E). Es importante mencionar que en el dimensionamiento, se calculó el consumo energético de cada una de las cintas. Los resultados se observan en el Diagrama de Flujos del proceso en el Anexo C.

Por último, para el transporte del Material Líquido Combustible se consideró la presencia de una bomba centrífuga, la cual se dimensionó teóricamente (ver cálculos en Anexo E). Los resultados se aprecian en el Anexo C.

### 4.5.3. Discusiones Selección y Dimensionamiento de equipos, BM y BE

El trabajo llevado a cabo para seleccionar y dimensionar los equipos alcanzó el detalle requerido para el nivel de evaluación que se está llevando a cabo, por lo que los resultados son satisfactorios a pesar de no haber realizado cotizaciones formales para todos los equipos, lo que se debió al carácter confidencial del proyecto y el requerimiento de la empresa que encargo el estudio por no informar a los proveedores de maquinaria y equipos del rubro de los residuos respecto a esta evaluación.

Los resultados obtenidos pueden sufrir variaciones luego de ahondar más en la ingeniería de éste proyecto, pues como algunos equipos no fueron cotizados, no se tiene claridad respecto a la existencia de equipos en el mercado para la capacidad exacta requerida, esto es más probable en el caso de los equipos dimensionados teóricamente para el transporte de materiales, cintas transportadoras y bomba.

### 4.6. Layout

El layout corresponde a un esquema con la distribución de equipos e instalaciones que se contemplan para llevar a cabo la construcción de la planta de producción de combustible alternativo sólido.

En la Tabla 4.15 se pueden observar las medidas consideradas para el desarrollo del layout.

Tabla 4.15: Medidas equipos e instalaciones planta

Equipo o Instalación	Largo [m]	Ancho [m]	Diámetro [m]
Cargador frontal: Equipo	6,86	2,76	-
Área movimiento	-	-	20
Acopio de valorizables	14	40	-
Trituradora 1	2,2	1,6	-
Cinta Transportadora 1	3	0,39	-
Cinta Transportadora 2	3	0,55	-
Mezclador 1	4	1,2	-
Cinta Transportadora 3	3	0,78	-
Separador 1	3	0,78	-
Acopio metales	2	2	-
Cinta Transportadora 4	3	0,78	-
Separador 2	1,45	0,65	-
Cinta Transportadora 5	18	0,46	-
Cinta Transportadora 6	3	0,75	-
Mezclador 2	4	1,2	-

<b>Equipo o Instalación</b>	<b>Largo [m]</b>	<b>Ancho [m]</b>	<b>Diámetro [m]</b>
Tanque almacenamiento MLC <sup>7</sup>	-	-	2,2
Bomba Centrífuga 1	-	-	0,5
Cinta Transportadora 7	5,2	0,79	-

Las medidas de los equipos relacionados con operaciones unitarias, tal como se mencionó en la sección anterior, fueron extraídas de catálogos o de bibliografía. Los equipos de transporte de materia prima fueron dimensionados teóricamente (ver Anexo E; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), a excepción del cargador frontal, el cual se obtuvo de catálogo [28].

El acopio de valorizables y de metales se dimensionó con los flujos de material a soportar, y con una autonomía temporal razonable para la operación (3 días y 2 turnos respectivamente); el detalle de los supuestos y cálculos se observa en el Anexo F, en el mismo anexo anterior también se puede apreciar el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de MLC<sup>7</sup>.

Dado que la planta se ubicará en las dependencias actuales de Hidronor en la comuna de Pudahuel, donde ya se cuenta con áreas y edificios administrativos, se considera que esas mismas dependencias serán utilizadas por el personal de la planta de CAS. Este mismo antecedente determina que la orientación de la planta y su ubicación dentro del terreno, esté supeditada a lo que ya se encuentra con anterioridad.

En el Anexo G, es posible apreciar el layout de la Planta de producción de CAS, el cual grafica el emplazamiento general dentro de la planta de Hidronor. Es relevante mencionar que los puntos 1, 2, 3 y 4 son instalaciones que se encuentran actualmente en la planta de Hidronor y se dibujan solo para contextualizar el espacio.

#### **4.6.1. Discusiones Layout**

El desarrollo del Layout de la planta diseñada tomó medidas de equipos calculadas teóricamente, las que tienen una alta probabilidad de variar luego de cotizar en el mercado los equipos, con lo que se deberá reevaluar la ubicación de la planta dentro de las instalaciones de Hidronor planta Pudahuel.

La distancia entre los equipos relacionados a operaciones unitarias fue de 3[m], lo que se estimó considerando factores como la constructibilidad, riesgos asociados a propagación de problemas eléctricos y accesibilidad para mantención o reemplazo de los equipos [29]. No se consideran áreas de comida, de higiene ni administrativas pues se utilizarán las mismas que existen actualmente en la planta.

---

<sup>7</sup> Mezcla de Líquidos Combustibles

## **4.7. Conclusiones Estudio Técnico**

Se logró determinar la ubicación más favorable para instalar este proyecto entre las alternativas disponibles, que corresponde a la planta Pudahuel de Hidronor. La elección analizó tres factores, los que fueron: transporte (costo y seguridad), de la materia prima a la planta de producción, del producto al lugar de consumo y de los residuos generados por el proceso a la instalación de disposición final, y normativa aplicable. Es importante destacar que cada uno de los aspectos analizados indica el atractivo de la opción escogida por sobre las demás, reforzando la elección.

La caracterización de la materia prima abarcó cuatro de los parámetros incluidos en los requerimientos de composición del cliente. El resto se debe analizar antes de llevar a cabo el proyecto, para verificar la idoneidad de las materias primas. Los resultados de este punto tienen un error asociado, pero este es tolerable dentro de la etapa de pre-factibilidad en la que se encuentra esta evaluación.

El caso base se determinó a partir del supuesto de tomar un único cliente, y la composición del producto final se definió a partir de los requerimientos establecidos por él mismo (y con la caracterización obtenida del punto anterior). Dada la variabilidad en el requerimiento de producto a través de los 5 primeros años, se privilegió evitar tener capacidad ociosa durante los primeros años, lo que conlleva a variar los regímenes horarios durante los primeros años y a proyectar la instalación de dos módulos gemelos de producción, el primero instalado en el año 0 y el segundo en el año 5.

Se logró determinar las etapas para llevar a cabo el proceso en estudio, lo que representará la base para la realización de la evaluación económica del próximo capítulo. Se definió además las condiciones de operación del proceso, estableciendo que la primera parte del proceso será batch y que a partir del mezclador de doble eje 1, se operará de forma continua.

Los resultados de la selección y dimensionamiento de equipos, permitieron crear el Diagrama de Flujos final del proceso. El proceso elegido se sostiene sobre la factibilidad técnica de producir un combustible alternativo sólido con las materias primas disponibles, en el contexto de mercado en que se enmarca el proyecto.

## **Capítulo 5. Evaluación del Proyecto**

En el presente capítulo se evaluará el proyecto, primero, desde una perspectiva clásica, analizando su factibilidad económica y luego con una mirada integral, abarcando ámbitos ambientales y sociales. Esto teniendo en cuenta que ya se verificó la factibilidad técnica en el capítulo anterior.

Al final de este capítulo se concluirá respecto a la realización de las siguientes etapas de ingeniería del proyecto, definiendo si es recomendable llevarlo a cabo o no, dependiendo de los resultados de las evaluaciones.

### **5.1. Evaluación económica**

Para llevar a cabo un análisis económico del proyecto en estudio, se establecerá el modelo de negocios para el producto, luego, se calculará el costo de inversión (CAPEX) y el costo de operación (OPEX) de la planta, además se detallarán los ingresos y beneficios considerados para el negocio, para finalmente desarrollar el flujo de caja y calcular los indicadores económicos clásicos, definidos en el Capítulo 2, sección 2.5.

Con todo lo anterior, se logrará determinar si invertir en este proyecto es atractivo por sobre invertir el capital en otros medios o proyectos.

Además, se realizará un análisis de sensibilidad con las variables posibles a modificar, con el objetivo de encontrar el mejor escenario económico del proyecto.

En esta versión, los puntos siguientes no serán presentados por términos de confidencialidad de la empresa, bajo un acuerdo con todos los integrantes de la comisión evaluadora del presente trabajo de título.

#### **5.1.1. Modelo de Negocios**

#### **5.1.2. Cálculo CAPEX**

Para el cálculo del costo de inversión se consideraron costos directos, costos indirectos, costos administrativos y costos de contingencia. El detalle de todos los aspectos considerados se puede observar en los puntos siguientes.

##### **5.1.2.1. Costos directos**

#### **5.1.2.2. Costos indirectos**

#### **5.1.2.3. Costos administrativos**

#### **5.1.2.4. Costos de contingencia**

### **5.1.3. Cálculo OPEX**

Para calcular el costo de operación de la planta de producción de combustible alternativo sólido, se consideraron costos fijos, costos variables y contribuciones. Como se tiene que la planta variará su producción y horas de funcionamiento los 6 primeros años, se calculó un OPEX diferenciado para esos años, pues este depende directamente de las horas de trabajo y producción.

#### **5.1.3.1. Costos fijos**

#### **5.1.3.2. Costos variables**

#### **5.1.3.3. Contribuciones**

### **5.1.4. Ingresos y beneficios**

#### **5.1.4.1. Ingresos**

#### **5.1.4.2. Beneficios**

### **5.1.5. Flujo de caja y cálculo indicadores económicos**

Se realizará el flujo de caja para el proyecto puro, no se considera financiación ya que la empresa posee un flujo de capitales tal que permite realizar este tipo de inversiones directamente.

La realización de la evaluación económica de este proyecto será en dólares, ya que esta moneda posee las siguientes características:

- Moneda conocida y ampliamente utilizada.

- La mayoría de los costos tienen precios expresados en esta moneda.
- La moneda se relaciona con las operaciones de las cementeras y la compra de combustible.

Para la evaluación el valor del dólar se fijará en 520 pesos [30].

El horizonte de evaluación comprende 10 años desde la operación del proyecto. Esto considera desde el año 2014 hasta el año 2023. El periodo no se extendió por más tiempo dado que el mercado de los combustibles es ampliamente variable y dependiente a la estabilidad de los países productores y de los grandes consumidores.

Los conceptos o instrumentos financieros considerados para el desarrollo del flujo de caja son:

Depreciaciones:

Impuesto de primera categoría:

Pérdida de ejercicios anteriores:

IVA inversión:

### **5.1.6. Análisis de sensibilidad**

### **5.1.7. Discusiones Evaluación Económica**

## **5.2. Evaluación integral: HAIN**

Como se mencionó en la sección 2.5.4, en el presente trabajo, se realizará una evaluación integral mediante el uso de la Herramienta de Análisis Integral (HAIN). La HAIN se aplica mediante un conjunto de preguntas, cuyas respuestas orientan la evaluación integral de un proyecto.

Se exhiben, a continuación, tales preguntas y sus respuestas:

**Estudio de la factibilidad social y medioambiental:** ¿Realizaría esta acción si fuese parte de la comunidad?

Como la planta se ubicará en un recinto industrial que actualmente ya presenta permisos ambientales y relaciones establecidas con la comunidad cercana, no se presentan impactos negativos nuevos que impidan su realización.

Es importante mencionar también que los residuos del proceso serán tratados dentro del mismo centro de tratamiento de residuos en el que se ubica la planta, por lo que estos no sufrirán transporte fuera de la planta.

Como el producto del proceso es un combustible alternativo fabricado a partir de residuos y que reemplazará el uso de petcoke en una planta de la industria cementera, las emisiones globales de CO<sub>2</sub> se verán disminuidas, lo que representa un beneficio medioambiental.

Además, no se tienen emisiones que puedan provocar aire maloliente o agua maloliente. Algo similar ocurre con la emisión de ruido, la que se considera no producirá efectos negativos pues la planta se encontrará lejos de centros urbanos.

**Reflexión crítica:** ¿Cuáles son las consecuencias del proyecto? ¿Qué precauciones se tienen que tener?

El proyecto puede impulsar el co-procesamiento por sobre el reciclaje, lo que no sigue la priorización de la pirámide de gestión de residuos con la que el gobierno se alineó, la cual establece que es mejor reciclar que co-procesar.

Se debe tener precauciones al exponer el proyecto a la opinión pública, ya que a nivel mundial, organizaciones medioambientales se han mostrado abiertamente en contra de la cogeneración de residuos en plantas cementeras, pues no representa la mejor opción para la gestión de estos materiales. Pero, dado que en el país no existen alternativas para los residuos industriales, basta exponer bien las razones que elevan este proyecto como la mejor opción disponible.

Se está reemplazando el uso del petcoke, el cual corresponde al combustible derivado del petróleo más contaminante.

Disminución del uso de depósitos de seguridad, ya que este proyecto utiliza como materia prima residuos que en la actualidad se disponen en dicho lugar, el cual representa una alternativa viable y ambientalmente correcta, pero que es la menos recomendable de realizar según la priorización de la pirámide de gestión de residuos impulsada por el gobierno.

En cuanto a las precauciones, es importante mencionar que la toxicidad que presenta para el hombre es nula, pues se considera el manejo de sustancias peligrosas/tóxicas con los debidos elementos de protección personal y protocolos de seguridad.

Otra precaución que se deberá tener al implementar el proyecto es el análisis químico constante de los residuos utilizados como materia prima, por cualquier descuido que pueda tener el generador a la hora de describir su residuo, lo que puede afectar la composición del producto final y con ello a las emisiones de las cementeras que lo utilicen.

Un cuestionamiento que se deberá resolver al momento de diseñar el control de la operación de la planta es la posibilidad de que no ingresen todos los residuos indicados como componentes del flujo de materia prima (ver Tabla 4.14), pues ya que si eso ocurre se deberá determinar una nueva composición para el flujo de entrada a la planta, el que variará dependiendo de cuál es el componente que no se encuentra disponible.

**Integración entre partes interesadas:** ¿Qué conflicto podría despertar esta alternativa en las partes interesadas?

Intención del cliente o proveedores de materias primas (residuos) de capturar parte de los beneficios, disminuyendo la viabilidad económica al proyecto.

Por otro lado, se tiene que la probable disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> que presentará el uso de CAS frente a alternativas como el petcoke, podría ser un beneficio para el cliente, pues al huella de carbono de su producto, cemento, disminuiría; esto corresponde a una integración positiva entre las partes.

Como se mencionó en el punto anterior, es posible que organizaciones medioambientales nacionales se muestren en contra de la realización del proyecto, por no ser la mejor alternativa para el tratamiento de residuos, ya que antes se encuentran el reciclaje, la reutilización y la disminución de su generación. Este conflicto se puede manejar si se expone claramente que el presente proyecto representa una mejora en la gestión actual de residuos de Hidronor. Es recomendable además, que la empresa se muestre dispuesta a seguir desarrollando y evaluando proyectos que se alineen con las mejores alternativas, demostrando que el compromiso medioambiental es un eje central para su crecimiento.

**Creatividad:** ¿Qué nuevas soluciones pueden hacerse? ¿Hay efectos no previstos?

Se podría seleccionar de manera óptima los residuos a co-procesar, para llevar las emisiones al mínimo. Otra posible optimización es realizar una búsqueda en el mercado de residuos actual y captar nuevos clientes que posean residuos de “mejor calidad”.

Como el diseño del proceso se basó en bibliografía reciente, es posible declarar que las plantas de producción de este tipo de combustible en el mundo no presentan mayor innovación en sus etapas. La única variación importante es la presentación del producto final, ya que este se puede presentar suelto, con una alta densidad aparente, o compactado por medio de pelletizadoras o equipos compactadores, lo que mejoraría la densidad energética del producto, disminuyendo el número de camiones necesario para el transporte y con ello el uso de combustibles fósiles para su operación.

Grandes variaciones en la composición de los residuos utilizados como materia prima pueden causar efectos no estudiados en las características finales del CAS, lo que posteriormente afectaría al usuario de éste combustible alternativo, las cementeras, las cuales podrían producir cemento fuera de especificación, con una calidad menor o con compuestos tóxicos.

**Desarrollo integral:** ¿Se incluye en la toma de decisiones a todos los grupos sociales?

Las decisiones técnicas serán tomadas por técnicos y profesionales expertos en los procesos involucrados, tanto desde la planta de Hidronor y de Cementos Bío Bío. Por otra parte, se tomará en cuenta la opinión de las autoridades pertinentes mediante la tramitación de una DIA para la implementación del proyecto, donde se buscará desarrollar las mejores soluciones a todas las inquietudes que se podrían llegar a plantear. Para recabar ideas, propuestas y/o críticas al presente proyecto que podrían surgir desde la sociedad, es importante la instauración de buenos canales de comunicación entre la empresa y la población (vecinos, agrupaciones medio ambientales o cualquier interesado en el desarrollo del proyecto), que es algo que actualmente no se realiza por parte de Hidronor.

Si se lleva a cabo el presente proyecto, se estaría promoviendo la simbiosis industrial, que corresponde a la integración de diversos sectores productivos mediante el uso de cruzado de productos, subproductos o residuos. Esto pues se lograría que el sector cementero utilice como insumo en su proceso los residuos de diversas industrias.

**Desarrollo equilibrado:** ¿Se aporta de manera balanceada en todos los grupos sociales?

Además de generar ganancias para los inversionistas y ahorros para la empresa en donde se utilizará el producto, se generarán nuevos empleos y una nueva mirada en la gestión de tratamientos presente en Chile que puede llegar a permitir a futuro, la utilización de residuos domiciliarios en proyectos como estos con beneficios a los proveedores de dichos materiales. Ahora bien, desde un punto de vista netamente

económico, el aporte no es balanceado por ser el proyecto de un privado, quien privilegiará el obtener retornos a partir de su inversión.

Puede que al aumentar la vida útil del depósito de seguridad, se provoque una estabilización del precio del uso de este, pues no se estaría elevando el costo de uso de suelo, lo que afectaría positivamente a los usuarios de este servicio, que en este caso corresponden a las industrias nacionales.

**Desarrollo sostenible:** ¿Se compromete de alguna manera el desarrollo del futuro?

No se compromete el desarrollo del futuro, ya que el producto corresponde a un combustible que se podría considerar como renovable, pues se fabrica a partir de residuos, por lo que no agotará los recursos del país. Por otro lado, se está ayudando a que el flujo de residuos generados en el país se trate de manera más adecuada, abriendo las posibilidades de proyectos futuros en la materia.

Un efecto no previsto puede ser el desincentivar la reducción de la generación de residuos, por el valor agregado que pueden obtener en proyectos como éste, lo que podría llegar a comprometer el desarrollo del futuro, es por ello, y como se dijo anteriormente, la empresa debe desarrollar y evaluar continuamente proyectos a partir de mejores alternativas, como el reciclaje, para lograr ser pioneros en la gestión de residuos y ser líderes, ahora y en el futuro, en la temática.

**Bien común:** ¿Cómo se afecta a la generación y distribución de riquezas sociales?

Dado que el proyecto corresponde a un tratamiento de residuos, se logra beneficiar a la población generando menos contaminación y aumentando la vida útil de los actuales lugares de disposición, evitando así la generación de nueva infraestructura de acumulación, lo que permitiría utilizar el suelo, que antes podría haber sido destinado para la construcción de un depósito de seguridad, en otro tipo de proyectos menos invasivos.

Tomando en cuenta los beneficios medioambientales y sociales descritos en los puntos anteriores, se considera que el proyecto es viable de forma integral.

### **5.3. Conclusiones Evaluación del Proyecto**

Del análisis HAIN también es posible concluir que se recomienda llevar a cabo el proyecto, esto debido a sus amplios beneficios sociales y ambientales que provoca. Entre los más importantes se tiene el evitar la disposición de los residuos en depósitos de seguridad, lo que extiende la vida útil de estos, evitando que se use más suelo en la

construcción de instalaciones de disposición de residuos; y por otro lado, el uso del producto, CAS, provoca una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> frente al uso de combustibles fósiles tradicionales, lo que beneficia a toda la comunidad.

Otros puntos importantes que es posible extraer del análisis HAIN es la necesidad de comprobar en laboratorio, que el producto cumple con los demás parámetros exigidos por el cliente (ver Tabla 3.1), que no fueron abarcados en esta primera evaluación. Otro punto es comprobar que la llegada de la materia prima será tan distribuida en el tiempo como los supuestos utilizados, y estudiar la posibilidad de tener más de una alternativa de composición del flujo de entrada, lo que ayudaría a facilitar el funcionamiento de la planta a pesar de que alguna de las materias primas no haya ingresado.

Aunando lo anterior, se recomienda invertir en el proyecto, sólo si es posible volver realidad supuestos como el precio de venta del CAS de 42 [USD/ton].

## Capítulo 6. Conclusiones

El uso de combustibles derivados de residuos industriales es una alternativa ampliamente usada en Europa que puede ser aplicada en una serie de industrias que presentan altos consumos energéticos en Chile. Debido al conocimiento del sector cementero de este producto, y las aplicaciones actuales en plantas de producción de clínker es que se dispuso que esa fuera la industria objetivo para desarrollar el producto, pues ya poseen los sistemas de abatimiento de emisiones, especialmente en el control de dioxinas y furanos.

La investigación de la factibilidad técnica y económica del uso del CAS en otros sectores productivos, y la determinación de las tecnologías apropiadas para su combustión, pueden ser contempladas en futuros estudios para la aplicación de ésta técnica en el país. Un potencial mercado de análisis es la industria del ladrillo, dentro de la cual existentes algunas empresas Europeas han implementado el co-procesamiento.

La producción de CAS a partir de residuos que actualmente ingresan a la planta de gestión y tratamiento de residuos de Hidronor Chile S.A. ubicada en la comuna de Pudahuel es factible técnica y económicamente a un nivel de ingeniería conceptual. Ofreciendo un sistema sustentable, que permite otorgar un tratamiento alternativo para los residuos industriales que son manejados por la empresa.

El desarrollo del estudio técnico, fue llevado a cabo con una profundidad coherente con el nivel de ingeniería de este estudio. Se diseñó una planta para tratar un flujo tal que permita satisfacer la demanda del producto planteada por Cementos Bío Bío en su Declaración de Impacto Ambiental para la modificación de su matriz energética, donde proyectan reemplazar parte del flujo de combustibles fósiles por combustibles alternativos, en los que el CAS tiene un papel protagónico [16].

Esta alternativa, aparte de ser rentable, significa un aporte a la comunidad por ser amigable con el medio ambiente, ya que, por un lado, se está evitando que los residuos industriales sean llevados a vertederos o rellenos sanitarios de baja seguridad, lugares en los que estarán emitiendo gas metano y además, estarán produciendo lixiviados que dañarán los suelos y eventualmente contaminarán napas subterráneas. Todo lo anterior trae consigo la instauración del nombre de la empresa industrial como una asociación aún más comprometida con la comunidad y con el medio ambiente, situándola como sustentable y sostenible.

Para el cliente se tiene que el uso del CAS, evitará contaminaciones secundarias ya que el residuo es totalmente destruido, utilizando su valor energético en la producción de un producto con valor comercial (cemento) a partir de un residuo transformado en combustible. Esto es posible de asegurar pues el co-procesamiento es a altas

temperaturas, lo que evita la producción de gases por combustión incompleta, por lo que las emisiones son sólo de CO<sub>2</sub> y trazas de otros gases como metano, óxido nitroso, perfluorocarbonos y hexafluorocarbonos.

Este es un proyecto ya evaluado por el conglomerado cementero Holcim, el cual integra tanto la fabricación del CAS como su posterior utilización en sus plantas de producción de clínker, en ese escenario, la cogeneración se presenta como un proyecto de inversión efectivo y con reporte de ganancias. Para un escenario en que la empresa que produzca el CAS sea diferente a la que lo consume, no se tienen datos de viabilidad económica, pero dado los resultados del análisis llevado a cabo, es factible.

El descenso de emisiones de CO<sub>2</sub> no se logra estimar con exactitud debido a los alcances con las materias primas utilizadas en los estudios que se poseen y se refieren al tema [23]. Por lo anterior, y dado que su desarrollo sería un gran atractivo para el consumidor del combustible alternativo, se plantea como trabajo futuro el desarrollo de un LCA del proceso de producción de CAS, ya que con ello se podrá verificar que el uso del combustible alternativo reduce la huella de carbono del cemento.

Finalmente, con una análisis más completo de las características del producto y la verificación de la producción del CAS a escala piloto basado en los hallazgos de este estudio permitiría validar la producción y el uso de este combustible alternativo.

## Bibliografía

- [1] Comisión Nacional del Medio Ambiente, «Primer Reporte del manejo de Residuos Sólidos en Chile,» Santiago, Chile, 2010.
- [2] Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos, «Evaluaciones de desempeño ambiental, Chile,» París, Francia, 2005.
- [3] Unión Europea, «Decisión de Ejecución de la Comisión,» *Diario Oficial de la Unión Europea*, pp. 1-45, 26 Marzo 2013.
- [4] C. Sáez, Apuntes del curso Residuos Sólidos, Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009.
- [5] Instituto de Seguridad del Trabajo, *Decreto Supremo N°148*, Santiago, Chile, 2003.
- [6] GTZ & Holcim, «Coprocem,» [En línea]. Available: <http://www.coprocem.com/Guidelines>. [Último acceso: 20 Julio 2013].
- [7] POCH Ambiental, «Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero,» 2008. [En línea]. Available: [http://www.sinia.cl/1292/articles-50188\\_recurso\\_1.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-50188_recurso_1.pdf). [Último acceso: 15 Octubre 2013].
- [8] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, «ICH,» Departamento de comunicación digital de ICH, [En línea]. Available: <http://ich.cl/?p=97>. [Último acceso: 15 Julio 2013].
- [9] Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile., «Documento Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático,» 2011. [En línea]. Available: [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-50880\\_documentoComunicadoCambioClimatico.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-50880_documentoComunicadoCambioClimatico.pdf). [Último acceso: 15 Octubre 2013].
- [10] Instituto Español del Cementos y sus Aplicaciones, «El Cemento: Proceso de fabricación (IECA),» 2013. [En línea]. Available: [http://www.ieca.es/reportajeT.asp?id\\_rep=6](http://www.ieca.es/reportajeT.asp?id_rep=6). [Último acceso: 17 Octubre 2013].
- [11] G. Tapia, «Simulación del co-procesamiento de residuos sólidos municipales en la industria cementera,» Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso, 2011.
- [12] Grupo Polpaico, «Coactiva,» [En línea]. Available: [http://www.coactiva.cl/?page\\_id=207](http://www.coactiva.cl/?page_id=207). [Último acceso: 20 Julio 2013].
- [13] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente CEMA, «Valorización de Residuos en la Industria Cementera Europea: Estudio Comparado,» Madrid, España, 2006.
- [14] N. Sapag, *Proyectos de Inversión, Formulación y Evaluación*, Prentice Hall, 2007.
- [15] R. Martínez, «Dilemas éticos en la ingeniería química,» Universidad de Chile, Departamento Ingeniería Química y en Biotecnología, Santiago, 2012.
- [16] AMBYGEST Consultorías, «Declaración de Impacto Ambiental: Reemplazo de la matriz de combustibles en el proceso de fabricación de cemento. Cementos Bío Bío Centro S.A.,» 2013.
- [17] Á. Contreras, Interviewee, *Reunión posible contrato para co-procesamiento*. [Entrevista]. Junio 2013.

- [18] Cementos Bío Bío, «Cementos: Manuales y Guías,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.cbb.cl/cementos/manuales.aspx?id=1&DetalleId=5>. [Último acceso: 17 Octubre 2013].
- [19] Cementos Polpaico S.A., «Servicio de Evaluación Ambiental. Gobierno de Chile.,» 17 Diciembre 2003. [En línea]. Available: [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id\\_expediente=6246](http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=6246). [Último acceso: 23 Septiembre 2013].
- [20] Parr Instrument Company, «Productos: Calorímetros de Bomba de Oxígeno,» [En línea]. Available: <http://www.parrinst.com/es/products/oxygen-bomb-calorimeters/>. [Último acceso: 06 Noviembre 2013].
- [21] F. Díaz, D. Adán, E. Díaz, N. Fredes, G. Martínez, J. Miranda, E. Soto, R. Schlatter, M. Tapia, G. Valenzuela y I. Zapata, Interviewees, *Colaboración en trabajos de título DIQBT*. [Entrevista]. 19 Julio 2013.
- [22] Dirección General de Normas. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial., «Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Determinación de Humedad.,» Ciudad de México, 1984.
- [23] R. Solís, «Análisis de ciclo de vida para empresas industriales con residuos potencialmente co-procesables,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2012.
- [24] KOMPTECH, «Brochure Refuse Derived Fuel,» [En línea]. Available: <http://www.komptech.com/en/waste/refuse-derived-fuel.htm>. [Último acceso: 28 Octubre 2013].
- [25] S. Montalvo, «Planta de producción de CSR en Atenas (Grecia),» *Infoenviro*, nº Noviembre/Diciembre, pp. 17-18, 2009.
- [26] ISVE, «Productos. Trituradores y Moledores. Documentos.,» 2009. [En línea]. Available: [http://isve.com/files/pdf/trito\\_sp.pdf](http://isve.com/files/pdf/trito_sp.pdf). [Último acceso: 10 Diciembre 2013].
- [27] Gongyi Fengyuan Machinery Manufacturing Co. Ltd., «Products,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.fybrickmachine.com/index.php?ac=article&at=read&did=141>. [Último acceso: 10 Diciembre 2013].
- [28] John Deere, «Producto: Cargador con ruedas 444K,» 2013. [En línea]. Available: [http://www.deere.com/common/docs/products/equipment/wheel\\_loaders/DKAKUL\\_DRLA.pdf](http://www.deere.com/common/docs/products/equipment/wheel_loaders/DKAKUL_DRLA.pdf). [Último acceso: 16 Diciembre 2013].
- [29] R. Campos, E. Vergara y V. Proboste, Interviewees, *Reuniones de trabajo para determinar parámetros de diseño y evaluación de proyectos*. [Entrevista]. Noviembre 2013.
- [30] Banco Central, «Base de datos estadísticos: Indicadores diarios,» [En línea]. Available: <http://si3.bcentral.cl/Indicadoresiete/secure/Indicadoresdiarios.aspx>. [Último acceso: 12 Noviembre 2013].
- [31] Henkel Chile Ltda., «Ficha de Seguridad Agorex.,» [En línea]. Available: <http://www.agorex.cl/index/wp-content/agorex/2012/03/Hoja-de-Seguridad1.pdf>. [Último acceso: 30 Agosto 2013].
- [32] Gobierno de España. Ministerio de Trabajo y Asuntos sociales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «Tabla 1.4: Poder Calorífico de diversas sustancias,» [En línea]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267>

- \_04/Ficheros/tabla1\_4.pdf. [Último acceso: 25 Agosto 2013].
- [33] U. Bossel, «Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle,» de *European Fuel Cell Forum*, Oberrohrdorf, Switzerland, 2003.
- [34] M. A. Fernandoy Elmes, *Optimización del Sistema de Alimentación de Combustible a Caldera N°1 en Aserradero Los Coigües*, Valdivia: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela Ingeniería Civil Mecánica, 2007.
- [35] D. Green y R. Perry, *Perry's Chemical Engineers Handbook*, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [36] NPL National Physical Laboratory. Kaye & Laby, «Calorific values of solid, liquid and gaseous fuels,» [En línea]. Available: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/chemistry/3\\_11/3\\_11\\_4.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/chemistry/3_11/3_11_4.html). [Último acceso: 25 Agosto 2013].
- [37] R. Vanbrabant, J. Deckers y O. Luyckx, «40 Years of Experience in Incineration of Radioactive Waste in Belgium,» *BelgoProcess N.V.*
- [38] Rexnord, «Engineering data. Conveying properties of materials,» [En línea]. Available: <http://www.rexnord.com.br/webpts/inbox/downloads/8/16%20-%20Enginnering%20Data.pdf>. [Último acceso: 3 Noviembre 2013].
- [39] Universidad de Granada de España, «Diseño tanques de almacenamiento,» [En línea]. Available: [http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/descargas/documentos/Disenio\\_Tanques\\_Almacenamiento.pdf](http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/descargas/documentos/Disenio_Tanques_Almacenamiento.pdf). [Último acceso: 2 Noviembre 2013].
- [40] Polytex, «Productos: Envases y Productos PP: Maxisacos,» [En línea]. Available: <http://www.polytex.cl>. [Último acceso: 30 Julio 2013].
- [41] W. D. Winter, «Poly(ethylene terephthalate) Film Recycling,» *Agfa-Gevaert N.V., Research & Development, Septestraat*, 1993.
- [42] Instituto Nacional de Normalización (Chile), *NCh 148, Of.68*.
- [43] Matches, «Matches' Process Equipment Cost Estimates,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.matche.com/EquipCost/index.htm>. [Último acceso: 11 Diciembre 2013].
- [44] Dirección del Trabajo. Gobierno de Chile, «Centro de consultar laborales: Protección al trabajador,» [En línea]. Available: <http://www.dt.gob.cl/consultas/1613/w3-article-60435.html>. [Último acceso: 12 Diciembre 2013].
- [45] Aguas Andinas, «Cliente: Tarifas,» 28 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.aguasandinas.cl/cliente/tarifas>. [Último acceso: 22 Noviembre 2013].
- [46] Chilectra, «Tarifas vigentes,» 2013. [En línea]. Available: [http://www.chilectra.cl/wps/wcm/connect/0a30ad0044100acc96999e65fe3686ef/Tarifas\\_Suministro\\_ClientesRegulados\\_2013\\_12\\_01.pdf?MOD=AJPERES&Tipo=DO C](http://www.chilectra.cl/wps/wcm/connect/0a30ad0044100acc96999e65fe3686ef/Tarifas_Suministro_ClientesRegulados_2013_12_01.pdf?MOD=AJPERES&Tipo=DO C). [Último acceso: 22 Noviembre 2013].
- [47] Servicio de Impuestos Internos (SII), «Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado,» 1 Enero 2003. [En línea]. Available: [http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm). [Último acceso: 12 Noviembre 2013].

[48] Servicio de Impuestos Internos (SII), «Impuesto de primera categoría (impuesto a las utilidades),» 2012. [En línea]. Available: [http://www.sii.cl/portales/inversionistas/imp\\_chile/impuesto\\_primera.htm](http://www.sii.cl/portales/inversionistas/imp_chile/impuesto_primera.htm). [Último acceso: 12 Noviembre 2013].

## **Anexos**

**Anexo A. Estimación costos de transporte**

**Anexo B. Estimación poder calorífico residuos modelo**

**Anexo C. Diagrama de flujos**

**Anexo D. Metodología balance de masa**

**Anexo E. Dimensionamiento teórico cintas transportadores y  
bomba centrífuga**

**Anexo F. Dimensionamiento zonas de acopio y tanque de  
almacenamiento de MLC**

**Anexo G. Layout**

## Anexo A. Estimación costos de transporte

Detalle cálculos de estimación de costos de transportes para el proceso de producción de CAS.

### Alternativa 1: Planta de producción de CAS en planta Pudahuel de Hidronor Chile S.A.

En este caso se tiene que existirán 2 distancias a recorrer: Desde cada una de las empresas modelo a la planta de producción de CAS en Hidronor Pudahuel, y desde ese lugar a planta Tenos de Cementos Bío Bío. Estas distancias se calcularon por medio del uso de las herramientas del programa Google Earth. En la Tabla A.1, se pueden observar los resultados.

Tabla A.1: Distancias recorridas en Alternativa 1

N°	Empresa	Distancias Alternativa 1	
		A Hidronor [km]	A Bío Bío [km]
1	A	148	182
2	B	18	
3	C	103	
4	D	6	
5	E	140	
6	F	18	
7	G	134	
8	H	9	
9	I	29	
10	J	88	
11	K	17	
12	L	27	
13	M	22	
14	N	116	

Con dichas distancias se procedió a aplicar el costo de transporte recibido desde el área de Logística de Hidronor Chile S.A., el cual corresponde a \$5.547/km, para un camión de 28 toneladas. Para el cálculo se tomaron los siguientes supuestos:

- Dadas las diferencias de densidades entre todos los residuos que trae cada una de las empresas consideradas y a que los camiones en muchas ocasiones no llegarán a estar consolidados, es que sólo trasladarán un 50% de su capacidad en peso, es decir, 14 toneladas.
- Para el caso del CAS, los camiones trasladarán un 70% de su capacidad en peso, dada la homogeneidad del material a trasladar y a la posibilidad de

consolidar los camiones, pues corresponde al traslado de un producto en constante elaboración.

Con lo anterior, se obtuvo que:

Tabla A.2: Detalle cálculos costos de transporte Alternativa 1

Alternativa 1								
N°	Empresa	Residuos a trasladar [Ton]	Distancia 1 [km]	Costo Transporte Distancia 1 \$CLP	CAS a trasladar [Ton]	Distancia 2 [km]	Costo Transporte Distancia 2 \$CLP	Costo Total \$CLP
1	A	400	148	29.965.855	380	182	572.298.473	1.125.777.506
2	B	42	18	380.768	40			
3	C	5758	103	298.812.394	5470			
4	D	61	6	199.450	58			
5	E	399	140	28.346.079	379			
6	F	75	18	707.141	71			
7	G	2305	134	155.903.432	2190			
8	H	171	9	788.734	162			
9	I	294	29	4.294.219	279			
10	J	160	88	7.180.201	152			
11	K	264	17	2.260.434	251			
12	L	569	27	7.751.353	541			
13	M	335	22	3.723.067	318			
14	N	173	116	10.165.907	164			
				550.479.033	10.456			

**Alternativa 2: Planta de producción de CAS en planta Teno de Cementos Bío Bío S.A.**

Para esta alternativa también se tiene que existirán 2 distancias a recorrer: Desde cada una de las empresas modelo a la planta de producción de CAS que se ubicaría dentro de la planta Teno de Cementos Bío Bío, y desde ese lugar a planta Pudahuel de Hidronor Chile S.A. Estas distancias se calcularon por medio del uso de las herramientas del programa Google Earth. En la Tabla A.3, se pueden observar los resultados.

Tabla A.3: Distancias recorridas en Alternativa 2

N°	Lista	Distancias Alternativa 2	
		A Bío Bío [km]	A Hidronor [Km]
1	A	71	182
2	B	176	
3	C	278	

N°	Lista	Distancias Alternativa 2	
		A Bío Bío [km]	A Hidronor [Km]
4	D	170	
5	E	317	
6	F	176	
7	G	128	
8	H	175	
9	I	178	
10	J	259	
11	K	167	
12	L	196	
13	M	161	
14	N	187	

Para calcular el costo del transporte para recorrer dichas distancias, se aplicó el mismo valor que para la Alternativa 1 (\$5.547/km para un camión de 28 toneladas). Para el cálculo se tomaron los siguientes supuestos:

- Dadas las diferencias de densidades entre todos los residuos que trae cada una de las empresas consideradas y a que los camiones en muchas ocasiones no llegarán a estar consolidados, es que sólo trasladarán un 50% de su capacidad en peso, es decir, 14 toneladas.
- Para el caso del transporte de los residuos y descartes del proceso de producción de CAS, los camiones trasladarán un 70% de su capacidad en peso, dada la posibilidad de consolidar los camiones, pues los residuos tendrán una generación constante.

Con lo anterior, se obtuvo que:

Tabla A.4: Detalle cálculos costos de transporte Alternativa 2

Alternativa 2								
N°	Empresa	Residuos a trasladar [Ton]	Distancia 1 [km]	Costo Transporte Distancia 1 \$CLP	Residuos y Descartes a trasladar [Ton]	Distancia 2 [km]	Costo Transporte Distancia 2 \$CLP	Costo Total \$CLP
1	A	400	71	14.375.511	20	182	34.099.909	1.269.308.993
2	B	42	176	3.723.067	2			
3	C	5758	278	806.503.354	288			
4	D	61	170	5.651.084	3			
5	E	399	317	64.183.621	20			
6	F	75	176	6.914.267	4			
7	G	2305	128	148.922.682	115			
8	H	171	175	15.336.498	9			
9	I	294	178	26.357.622	15			

Alternativa 2								
N°	Empresa	Residuos a trasladar [Ton]	Distancia 1 [km]	Costo Transporte Distancia 1 \$CLP	Residuos y Descartes a trasladar [Ton]	Distancia 2 [km]	Costo Transporte Distancia 2 \$CLP	Costo Total \$CLP
10	J	160	259	21.132.636	8			
11	K	264	167	22.205.436	13			
12	L	569	196	56.269.081	28			
13	M	335	161	27.246.082	17			
14	N	173	187	16.388.143	9			
				1.235.209.084	550			

## Anexo B. Estimación poder calorífico residuos modelo

Detalle cálculos de estimación de poder caloríficos residuos modelo.

i. Adhesivo vencido

80% Agorex y 20% compuestos sin poder calorífico.

Los principales componentes del Agorex son [31]:

- 50% Ciclohexano
- 20% Acetona
- 4% Metil Etil Cetona

Tabla B.1: Estimación poder calorífico Adhesivo vencido

Composición Adhesivo vencido	Composición	PCI [kcal/kg] [32]
Agorex	80%	6.773
Compuestos sin poder calorífico	20%	0
<b>Total ponderado</b>		5.419

ii. Arena contaminada con petróleo

10% petróleo y 90% arena y otros compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.2: Estimación poder calorífico Arena contaminada con petróleo

Composición Arena contaminada con petróleo	Composición	PCI [kcal/kg] [33]
Petróleo	10%	10.970
Arena y otros compuestos sin poder calorífico	90%	0
<b>Total ponderado</b>		1.097

iii. Aserrín contaminado

10% petróleo, 80% aserrín y 10% de compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.3: Estimación poder calorífico Aserrín contaminado

Composición Aserrín contaminado	Composición	PCI [kcal/kg] [33] [34]
Petróleo	10%	10.970
Aserrín	80%	2.711
Compuestos sin poder calorífico	10%	0
<b>Total ponderado</b>		3.266

iv. Envase plástico vacío

90% polietileno y 10% impurezas.

Tabla B.4: Estimación poder calorífico Envase plástico vacío

Composición Envases plásticos vacíos	Composición	PCI [kcal/kg] [35]
Polietileno	90%	7.218
Compuestos sin poder calorífico	10%	0
<b>Total ponderado</b>		<b>6.496</b>

- v. Carbón activado  
50% contaminantes y 50% carbón sub-bituminoso.

Tabla B.5: Estimación poder calorífico Carbón activado

Composición Carbón activado	Composición	PCI [kcal/kg] [35]
Carbón sub-bituminoso	50%	5.214
Compuestos sin poder calorífico	50%	0
<b>Total ponderado</b>		<b>2.621</b>

- vi. Paños y huaipes contaminados  
50% algodón, 10% poliéster, 30% de petróleo y 10% compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.6: Estimación poder calorífico Paños y huaipes contaminados

Composición Paños y huaipes contaminados	Composición	PCI [kcal/kg] [33] [35]
Algodón	50%	4.410
Poliéster	10%	6.000
Petróleo	30%	10.970
Compuestos sin poder calorífico	10%	0
<b>Total ponderado</b>		<b>6.096</b>

- vii. Papel y cartón  
50% cartón y 50% papel.

Tabla B.7: Estimación poder calorífico Papel y cartón

Composición Papel y cartón	Composición	PCI [kcal/kg] [35]
Cartón	45%	3.991
Papel	45%	3.991
Compuestos sin poder calorífico	10%	0
<b>Total ponderado</b>		<b>3.592</b>

- viii. Lodo planta fenoles  
40% fenol y 60% compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.8: Estimación poder calorífico Lodo planta fenoles

Composición Lodo planta fenoles	Composición	PCI [kcal/kg] [32]
Fenol	40%	8.007
Compuestos sin poder calorífico	60%	0
<b>Total ponderado</b>		3.203

ix. Madera contaminada

10% petróleo, 80% madera (húmeda al 15%) y 10% compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.9: Estimación poder calorífico Madera contaminada

Composición Madera contaminada	Composición	PCI [kcal/kg] [33] [36]
Madera	80%	3.824
Petróleo	10%	10.970
Compuestos sin poder calorífico	10%	0
<b>Total ponderado</b>		4.049

x. Resina aniónica

20% resina aniónica y 80% compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.10: Estimación poder calorífico Resina aniónica

Composición Resina aniónica	Composición	PCI [kcal/kg] [37]
Resina aniónica	20%	4.780
Compuestos sin poder calorífico	80%	0
<b>Total ponderado</b>		956

xi. Tierra con hidrocarburos

5% petróleo y 95% compuestos sin poder calorífico.

Tabla B.11: Estimación poder calorífico Tierra con hidrocarburos

Composición Tierra con hidrocarburos	Composición	PCI [kcal/kg] [33]
Petróleo	5%	10.970
Compuestos sin poder calorífico	95%	0
<b>Total ponderado</b>		549

## **Anexo C. Diagrama de flujos.**

# PROYECTO PLANTA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO SÓLIDO

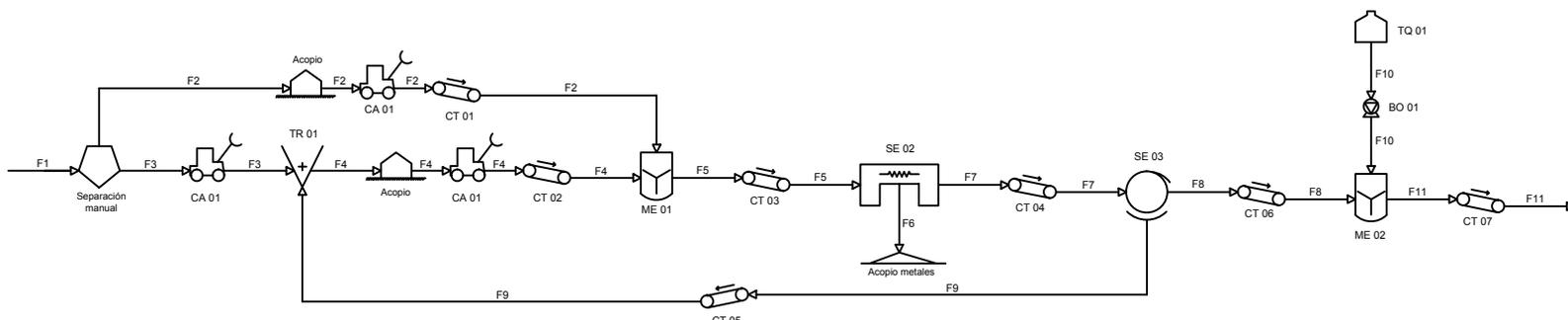
Contenido: Diagrama de flujos con listado de equipos

Escala: S/E

Autora: Valeria Proboste Sobarzo

Fecha: 28 de Enero, 2014

Hidronor Chile S.A.



Listado equipos	TAG	Descripción
Cargador frontal	CA 01	Capacidad pala: 1,90 m <sup>3</sup> Consumo combustible: 4,20 lt/h
Trituradora cortante de 4 ejes	TR 01	Capacidad: 0,8 - 1,2 ton/h Potencia: 17,91 kW Largo: 2,20 m Ancho: 1,60 m Eficiencia: 95 %
Cinta transportadora	CT 01	Capacidad: 1,30 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,39 m Largo: 3,05 m
Cinta transportadora	CT 02	Capacidad: 1,25 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,55 m Largo: 5,60 m
Mezclador de tornillo (doble eje)	ME 01	Capacidad: 10,0 - 15,0 m <sup>3</sup> /h Potencia: 20,25 kW Largo: 3,97 m Ancho: 1,20 m
Cinta transportadora	CT 03	Capacidad: 2,54 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,78 m Largo: 3,05 m
Separador magnético	SE 01	Capacidad: 5,00 ton/h Potencia: 3,75 kW Largo: 3,00 m Ancho: 0,78 m Eficiencia: 99 %
Cinta transportadora	CT 04	Capacidad: 2,42 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,78 m Largo: 3,05 m
Trommel	Se 03	Capacidad: 2,50 ton/h Potencia: 8,30 kW Largo: 1,45 m Diámetro: 0,8 m Eficiencia: 100 %
Cinta transportadora	CT 05	Capacidad: 0,06 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,12 m Largo: 18,0 m
Cinta transportadora	CT 06	Capacidad: 2,4 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,75 m Largo: 3,05 m
Tanque almacenamiento MLC	TQ 01	Capacidad: 12,56 m <sup>3</sup> Diámetro: 2,00 m Alto: 3,00 m
Bomba centrífuga	BO 01	Capacidad: 0,22 ton/h Potencia: 1,00 kW Diámetro cañería: 0,05 m Eficiencia: 60 %
Mezclador de tornillo (doble eje)	ME 02	Capacidad: 10,0 - 15,0 ton/h Potencia: 20,25 h/día Largo: 3,97 kW Ancho: 1,20 m Ancho: 1,20 m
Cinta transportadora	CT 07	Capacidad: 2,57 ton/h Potencia: 1,43 kW Ancho: 0,79 m Largo: 5,18 m

Composición / Propiedades	RSVE F1	RSVE F2	RSVE F3	RSVE F4	Mezcla RSVE F5	Metales F6	CAS F7	CAS F8	Reciclo F9	MLC F10	CAS final F11
MLC [Ton/h]										0,216	0,216
Adhesivos envasados [Ton/h]	0,135		0,135	0,142	0,142	0,007	0,135	0,128	0,007		0,128
Arenas [Ton/h]	0,270	0,270			0,270	0,014	0,257	0,257			0,257
Aserrín [Ton/h]	0,054	0,054			0,054	0,003	0,051	0,051			0,051
Plásticos [Ton/h]	0,432		0,432	0,454	0,454	0,023	0,431	0,409	0,022		0,409
Carbón [Ton/h]	0,135	0,135			0,135	0,007	0,128	0,128			0,128
Textiles [Ton/h]	0,270		0,270	0,283	0,283	0,014	0,269	0,256	0,013		0,256
Papely cartón [Ton/h]	0,216		0,216	0,227	0,227	0,011	0,215	0,205	0,011		0,205
Lodos [Ton/h]	0,432	0,432			0,432	0,022	0,410	0,410			0,410
Maderas [Ton/h]	0,135		0,135	0,142	0,142	0,007	0,135	0,128	0,007		0,128
Resinas [Ton/h]	0,081	0,081			0,081	0,004	0,077	0,077			0,077
Tierras [Ton/h]	0,324	0,324			0,324	0,016	0,308	0,308			0,308
Flujo másico total [Ton/h]	2,484	1,296	1,188	1,247	2,543	0,127	2,416	2,357	0,059	0,216	2,573
Poder calorífico promedio [kcal/kg]	3.612	1.902	5.477	5.477	3.655	-	3.655	3.609	5.477	5.966	3.807
Granulometría	variable	< 5[cm]	> 5[cm]	< 5[cm]	< 5[cm]	< 5[cm]	< 5[cm]	< 5[cm]	> 10[cm]	N/A	< 10[cm]

## Anexo D. Metodología balance de masa

Lo primordial para realizar los balances de masa para cada una de las etapas del proceso en estudio es comenzar los cálculos a partir de la ecuación general de conservación de materia:

$$Acumulación = Entrada - Salida - Consumo + Generación (*)$$

Como, el proceso no presenta ninguna reacción, los términos “Consumo” y “Generación” son 0. Por otro lado, para todos los análisis y cálculos se trabaja en estado estacionario, lo cual se traduce en que el término de “Acumulación” también es 0. Con lo que finalmente la ecuación general resulta

$$Entrada = Salida (**)$$

Además de lo anterior, para calcular los balances de masa también fue necesario obtener o suponer eficiencias para los equipos.

El detalle del cálculo de cada etapa, en el orden en las que se enumeraron las etapas en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta a continuación:

### Separación 1

Etapas de separación manual tomando en cuenta el tamaño del material.

Se distinguen los siguientes flujos presentes:

$F_1$ : Residuos Sólidos Valorizables Energéticamente (RSVE)

$F_2$ : RSVE de granulometría menor a 5[cm]

$F_3$ : RSVE de granulometría mayor a 5[cm]

Dada la ecuación general de conservación de materia simplificada (\*\*) y considerando una eficiencia en la separación de un 100%, se tiene que:

$$F_1 = F_2 + F_3$$

Dónde:

$$F_1 = 2,484 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

$$F_2 = 1,296 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

$$F_3 = 1,188 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

Para determinar qué proporción de  $F_1$  corresponde a  $F_2$  y a  $F_3$ , se tomó en cuenta la granulometría estimada en terreno (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y los flujos de entrada de cada residuo estimados en el caso base (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El detalle de la composición de cada corriente se observa en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

### Reducción de tamaño 1

Etapas de reducción de tamaño.

Se distinguen los siguientes flujos presentes:

$F_3$ : RSVE de granulometría mayor a 5[cm]

$F_4$ : RSVE de granulometría menor a 5[cm]

$F_9$ : RSVE de granulometría mayor a 10[cm]

Dada la ecuación general de conservación de materia simplificada para las condiciones del proceso en estudio (\*\*), se tiene que:

$$F_3 + F_9 = F_4$$

Dónde:

$$F_3 = 1,188 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

$$F_9 = 0,059 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

$$F_4 = 1,247 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

Para obtener el valor del reciclaje, que corresponde a la corriente  $F_9$ , fue necesario iterar respecto a lo que ocurre en la Separación 3. La iteración arrojó un resultado preciso, sin error asociado.

### Mezclado 1

Etapas para mezclar las materias primas.

Se distinguen los siguientes flujos presentes:

$F_4$ : RSVE de granulometría menor a 5[cm]

$F_2$ : RSVE de granulometría menor a 5[cm]

$F_5$ : Mezcla RSVE

Dada la ecuación general de conservación de materia simplificada (\*\*), se tiene que:

$$F_4 + F_2 = F_5$$

Dónde:

$$F_4 = 1,247 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

$$F_2 = 1,296 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

$$F_5 = 2,543 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

## Separación 2

Etapas de separación de metales de la corriente principal.

Se distinguen los siguientes flujos presentes:

$F_5$ : Mezcla RSVE

$F_6$ : Metales

$F_7$ : Mezcla RSVE libre de metales

Dada la ecuación general de conservación de materia simplificada (\*\*), y una eficiencia del equipo de un 99%, se tiene que:

$$F_5 = F_6 + F_7$$

Dónde:

$$F_5 = 2,543 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

$$F_6 = 0,127 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

$$F_7 = 2,416 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

Para obtener el valor de  $F_6$ , se consideró que todos los residuos que ingresan al proceso (adhesivos envasados, arenas, aserrín, plásticos, carbón, textiles, papel y cartón, lodos, maderas, resinas y tierras) poseen un 5% p/p de metales, sobre los valores estimados en el caso base (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la**

referencia.), lo cual, es avalado por la experiencia de operarios y lo estimado en bibliografía [23].

### Separación 3

Etapa de separación por tamaño de partículas.

Se distinguen los siguientes flujos presentes:

$F_7$ : Mezcla RSVE libre de metales

$F_8$ : Mezcla RSVE libre de metales con granulometría mayor a 10[cm]

$F_9$ : Mezcla RSVE libre de metales y con granulometría menor a 10[cm]

Dada la ecuación general de conservación de materia se tiene que:

$$F_7 = F_8 + F_9$$

Dónde:

$$F_7 = 2,416 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

$$F_8 = 2,357 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

$$F_9 = 0,059 \left[ \frac{ton}{h} \right]$$

Esta etapa se encuentra presente para asegurar que el tamaño del producto no sobrepase los límites impuestos por el cliente como aceptables, por lo que en la corriente  $F_9$  solo se recircularan aquellos que no fueron correctamente triturados en la operación de Reducción de tamaño 1, que dada la eficiencia del equipo de un 95%, corresponde a un valor cercano al 5% de la corriente  $F_3$ , el valor preciso de  $F_9$ , como ya se explicó en el Mezclado, 1 fue obtenido iterando.

### Mezclado 2

Mezcla de materiales sólidos y líquidos.

Se distinguen los siguientes flujos presentes:

$F_8$ : Mezcla RSVE libre de metales y con granulometría menor a 10[cm]

$F_{10}$ : Mezcla de líquidos combustibles

$F_{11}$ : CAS

Dada la ecuación general de conservación de materia se tiene que:

$$F_8 + F_{10} = F_{11}$$

Dónde:

$$F_8 = 2,357 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

$$F_{10} = 0,216 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

$$F_{11} = 2,573 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

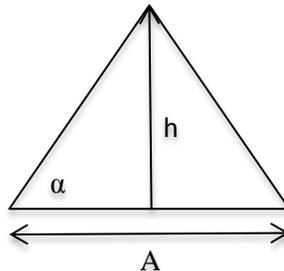
## Anexo E. Dimensionamiento teórico cintas transportadoras y bomba centrífuga

Para el proceso, se requiere la presencia de 7 cintas transportadoras, el dimensionamiento de las cuales será detallado a continuación, junto con las estimaciones teóricas de cada una de ellas:

### Cinta transportadora 1

Cinta que mueve los residuos contenidos en la corriente  $F_2$  desde el acopio de valorizables a la etapa Mezclado 1.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]
- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

A: Ancho de la cinta [m]

$h$ : Altura material [m]

$\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]

$F_{masico}$ : Flujo del material a transportar [kg/s]

$\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]

$v$ : Velocidad de transporte [m/s]

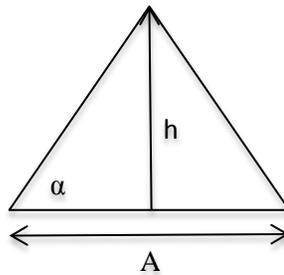
La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 1 es igual a 0,32[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,39 [m].

## Cinta transportadora 2

Cinta que mueve los residuos contenidos en la corriente  $F_4$  desde el acopio de valorizables a la etapa Mezclado 1.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]
- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

$A$ : Ancho de la cinta [m]

$h$ : Altura material [m]

$\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]

$F_{masico}$ : Flujo del material a transportar [kg/s]

$\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]

$v$ : Velocidad de transporte [m/s]

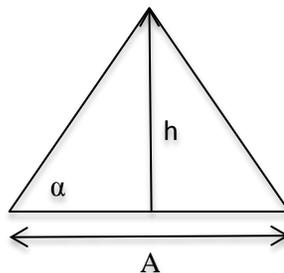
La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 2 es igual a 0,45[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,55[m].

### Cinta transportadora 3

Cinta que mueve los residuos contenidos en la corriente  $F_5$  desde la etapa Mezclado 1 a la Separación 2.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]

- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

- A*: Ancho de la cinta [m]
- h*: Altura material [m]
- $\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]
- F<sub>masico</sub>*: Flujo del material a transportar [kg/s]
- $\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]
- v*: Velocidad de transporte [m/s]

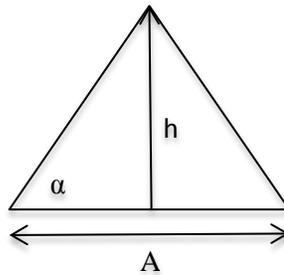
La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 3 es igual a 0,65[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,78[m].

#### Cinta transportadora 4

Cinta que mueve los residuos contenidos en la corriente  $F_5$  desde la etapa Separación 2 a la Separación 3. Es importante mencionar, que el separador de metales de la Separación 2 tiene una estructura base de cinta transportadora, por lo que el equipo y las 2 cintas transportadoras tienen que tener el mismo ancho, por lo que este se ajustará.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]
- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

- $A$ : Ancho de la cinta [m]
- $h$ : Altura material [m]
- $\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]
- $F_{masico}$ : Flujo del material a transportar [kg/s]
- $\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]
- $v$ : Velocidad de transporte [m/s]

La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

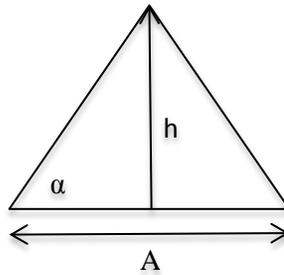
Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 4 es igual a 0,63[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,76[m].

Por lo tanto, el ancho de esta cinta se ajustará al ancho de la cinta transportadora 3.

## Cinta transportadora 5

Cinta que mueve el reciclo de la etapa Separación 2 (corriente  $F_9$ ) a la trituradora, que corresponde a la Reducción de tamaño 1.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]
- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

$A$ : Ancho de la cinta [m]

$h$ : Altura material [m]

$\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]

$F_{masico}$ : Flujo del material a transportar [kg/s]

$\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]

$v$ : Velocidad de transporte [m/s]

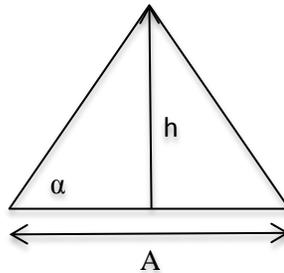
La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 5 es igual a 0,09[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,11[m]. Lo que es bastante pequeño y probablemente se tendrá que ajustar a lo existente en el mercado en las posteriores etapas de diseño.

### Cinta transportadora 6

Cinta que mueve la mezcla de RSVE libre de metales y con granulometría menor a 10[cm] desde la Separación 3 al Mezclado 2.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]
- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

$A$ : Ancho de la cinta [m]  
 $h$ : Altura material [m]  
 $\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]  
 $F_{masico}$ : Flujo del material a transportar [kg/s]  
 $\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]  
 $v$ : Velocidad de transporte [m/s]

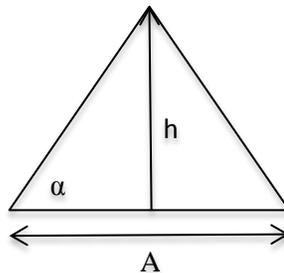
La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 6 es igual a 0,62[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,75[m].

### Cinta transportadora 7

Cinta que mueve el producto CAS desde la etapa final, Mezclado 2, a los camiones que lo trasladarán a la planta del cliente.

Para dimensionar una cinta horizontal, sin pendiente, se asume que las partículas de material siguen la siguiente distribución sobre ella:



De esta forma para determinar el ancho de la cinta se sigue la siguiente metodología:

- I. Se impone una velocidad de cinta igual a 0,05 [m/s]
- II. Se determina el ángulo de reposo del material igual a 0,36[rad] [38]
- III. Se determina el ancho de cinta por medio de la siguiente relación:

$$A \cdot \frac{h}{2} = A \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot \frac{A}{2}}{2} = \frac{F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{material} \cdot v \cdot \tan(\alpha)}}$$

Dónde:

$A$ : Ancho de la cinta [m]

$h$ : Altura material [m]

$\alpha$ : Ángulo del material en reposo [rad]

$F_{masico}$ : Flujo del material a transportar [kg/s]

$\rho_{material}$ : Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]

$v$ : Velocidad de transporte [m/s]

La densidad del material a transportar se extrae de las densidades aparentes estimadas en la caracterización de la materia prima (ver **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Con lo anterior se tiene que el ancho de la cinta transportadora 7 es igual a 0,65[m], dándole un factor de seguridad de un 20% se obtiene un ancho de 0,78[m].

### Consumos energéticos cintas transportadoras

Para calcular la potencia necesaria para el funcionamiento de estos equipos es necesario conocer el trabajo necesario para mover una masa ( $W_x$ ):

$$W_x = F_r \cdot x$$

Dónde:

$F_r$ : Fuerza de Roce

$x$ : Distancia

Y se tiene que:

$$F_r = -\mu \cdot m \cdot g$$

Dónde:

$\mu$ : Coeficiente de Roce

$m$ : Masa

$g$ : Aceleración de gravedad

Por lo tanto, si ahora se calcula el trabajo necesario para mover un flujo másico ( $F_m$ ), la ecuación es:

$$W_x = -\mu \cdot F_m \cdot g \cdot x$$

Con esta ecuación y un valor para  $\mu$  igual a 0,43, se obtienen las siguientes potencias:

**Tabla E.1: Potencias estimadas teóricamente cintas transportadoras**

<b>Equipo</b>	<b>Potencia [W]</b>
Cinta transportadora 1	4,55
Cinta transportadora 2	4,37
Cinta transportadora 3	8,93
Cinta transportadora 4	8,48
Cinta transportadora 5	1,24
Cinta transportadora 6	8,27
Cinta transportadora 7	15,05

Como los valores obtenidos son muy pequeños, se cree que falta información para obtener un valor más cercano a la realidad, pues como no fue posible cotizar estos equipos, el peso de la cinta y la resistencia de los rodillos, puede variar modificando bastante el resultado.

Por lo anterior y por recomendación de expertos, se estimó que el consumo de las 7 cintas transportadoras corresponderá a 10 KW, lo que dividiendo, da como resultado que cada cinta transportadora tendrá una potencia igual a 1,43.

### **Bomba 1**

Se requiere una bomba para transportar la Mezcla de Líquidos Combustible (MLC) desde un tanque de almacenamiento a la etapa Mezclado 2.

En virtud de las características del MLC se utilizará una bomba centrífuga.

Para realizar el dimensionamiento de la bomba en cuestión se emplea la ecuación de Bernoulli, donde se tienen 2 puntos de comparación  $i$  y  $f$  esto es:

$$\frac{P_i}{\rho \cdot g} + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + h_i + H_{ev} = \frac{P_f}{\rho \cdot g} + \frac{v_f^2}{2 \cdot g} + h_f + \sum f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \sum k_v \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Con:

$P$ : Presión [Pa]

- $v$ : Velocidad [m/s]
- $h$ : Altura [m]
- $g$ : Aceleración de gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- $\rho$ : Densidad [kg/m<sup>3</sup>]
- $f$ : Coeficiente de fricción []
- $D$ : Diámetro [m]
- $k_v$ : Coeficiente de singularidades []

La variable a determinar será  $H_{ev}$  que corresponde a la altura de elevación, en virtud de los siguientes supuestos:

- Densidad del MLC se mantiene constante
- No se consideran pérdidas por singularidades
- Se asume velocidad constante igual a 1 [m/s]
- No existe cambio de cota (altura de entrada igual a altura de salida)
- Se asumen cañerías de acero
- La eficiencia de la bomba es 60%
- Presión de entrada 1 [atm] y presión de salida 12,24 [atm]

De esta forma la altura de elevación es:

$$H_{ev} = \frac{P_f}{\rho_{MLC}} - \frac{P_i}{\rho_{MLC}} + \sum f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Y la potencia de la bomba viene dada por:

$$P_{bomba} = \frac{H_{ev} \cdot \rho_{MLC} \cdot g}{\eta}$$

Dónde el largo entre equipos se define como igual a 2[m], para estimar el valor de la altura de elevación se emplea el siguiente algoritmo:

- I. Se fija la velocidad de MLC
- II. Conocida la velocidad se estima el diámetro de cañería por medio de:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{masico}}{\rho_{MLC} \cdot \pi \cdot v}}$$

Donde la densidad del MLC se estimó como un promedio entre la densidad del aceite y de la gasolina [35].

- III. Se estima el valor del Reynolds del fluido por medio de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad del MLC, la cual se estimó como el promedio de la viscosidad del aceite y de la gasolina, ambas a 20[°C] [35].

IV. Dependiendo de la situación se estima el factor de fricción de Darcy como:

$$\text{Si } Re < 4000 \quad f = \frac{64}{Re}$$

$$\text{Si } Re > 4000 \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log\left(\frac{6,9}{Re} + \frac{\varepsilon/D^{1,11}}{3,7}\right)$$

Donde  $\varepsilon$  es la rugosidad relativa del acero

V. Se estima  $H_{ev}$

De esta forma, la altura de elevación de la bomba es 140,63 [m] y la potencia es 0,18 [HP].

Como el valor de potencia es muy pequeño, se estimó finalmente que la potencia de la bomba centrífuga sería de 1[kW].

## Anexo F. Dimensionamiento zonas de acopio y tanque de almacenamiento de MLC

### Zona de acopio de RSVE

Para dimensionar el área de la zona de valorizables es necesario determinar el volumen que ocuparía la materia prima necesaria para mantener una autonomía de 2 días de la planta, en caso que no llegue la materia prima necesaria a la planta.

El flujo de entrada al proceso, a partir del año 5 (caso máximo), es de 4,12[ton/h]. Por lo tanto, al considerar que en el año 5, se trabaja 24 horas al día (sin considerar fines de semanas y feriados), se tiene que para tener 3 días de autonomía, la zona de acopio debe soportar 197,76[ton].

Por seguridad, se considera una densidad de los residuos igual a la mitad de la densidad estimada en la sección Caracterización de la materia prima, pues se considera que los residuos ocupan más espacio del que ocuparán en el momento de ser volteados a los equipos. Dicha densidad se aproxima a 0,26[ton/m<sup>3</sup>].

Dado lo anterior, las 107,76[ton] corresponden a 760,61[m<sup>3</sup>]. Dicho volumen se distribuirá en forma de pirámide, por lo que el objetivo de cálculo es la base de la pirámide.

$$V_{pirámide} = A \cdot B \cdot h \text{ y } B_{pirámide} = A \cdot B$$

Dónde:

$V_{pirámide}$ : Volumen pirámide [m<sup>3</sup>]

$A$ : Lado 1 [m]

$B$ : Lado 2 [m]

$h$ : Altura [m]

$B_{pirámide}$ : Base pirámide [m<sup>2</sup>]

Se supondrá que la altura promedio con que se apilarán los residuos será de 1,5[m]. Por lo tanto:

$$B_{pirámide} = 507,07 \text{ [m}^2\text{]} = A \cdot B$$

Por seguridad extra, y para disminuir al mínimo el riesgo de construir un espacio que quede pequeño para el proyecto diseñado, se sumará un 5% adicional al valor anterior.

Además, se tomará el supuesto que uno de los lados debe ser 40[m] por la forma del espacio disponible en planta, por lo tanto:

$$A \cdot 40[m] = 507,07[m^2]$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$B = 13,31[m] \sim 14[m]$$

### **Zona de acopio de metales**

La metodología para estimar el área de la zona de acopio de metales que se encontrará a un costado del separador de metales (Separación 2), es similar a la utilizada para el acopio de RSVE.

En este caso se determinó como necesaria una autonomía de 1 turno, es decir 8 horas, pues es razonable pensar que al final de cada turno, transporten los metales separados al depósito de seguridad.

El flujo de entrada al proceso, a partir del año 5 (caso máximo), es de 0,25[ton/h]. Por lo tanto, al considerar las 8 horas de autonomía, la zona de acopio debe soportar 2,03[ton].

Se estima una densidad de los metales igual a 4[ton/m<sup>3</sup>], que corresponde a la densidad del hierro [35].

Dado lo anterior, las 2,03[ton] corresponden a 0,5[m<sup>3</sup>]. Dicho volumen se distribuirá en forma de pirámide, por lo que el objetivo de cálculo es la base de la pirámide.

$$V_{pirámide} = A \cdot B \cdot h \text{ y } B_{pirámide} = A \cdot B$$

Dónde:

$V_{pirámide}$ : Volumen pirámide [m<sup>3</sup>]

$A$ : Lado 1 [m]

$B$ : Lado 2 [m]

$h$ : Altura [m]

$B_{pirámide}$ : Base pirámide [m<sup>2</sup>]

Se supondrá que la altura promedio con que se apilarán los residuos será de 0,5[m]. Por lo tanto:

$$B_{pirámide} = 3,05 [m^2] = A \cdot B$$

Por seguridad extra, y para disminuir al mínimo el riesgo de construir un espacio que quede pequeño para el proyecto diseñado, se sumará un 5% adicional al valor anterior.

Además, se tomará el supuesto que los dos lados deben ser iguales, por lo tanto:

$$A = B = 1,83[m] \sim 2[m]$$

### Tanque de almacenamiento de MLC [39]

Los tanques de almacenamiento de materias primas se diseñan bajo el código API-ASME, para el diseño de tanques que trabajan a presión atmosférica y contienen (líquidos y sólidos) en su interior.

Dado que el MLC es un material líquido, la geometría del recipiente recomendada es la siguiente:

Cabeza y fondo: elipsoidal 2:1

Carcasa: cilíndrica

Las dimensiones para cada una de las partes vendrán determinadas en función de la altura de la carcasa cilíndrica  $H$ , tal como se observa a continuación:

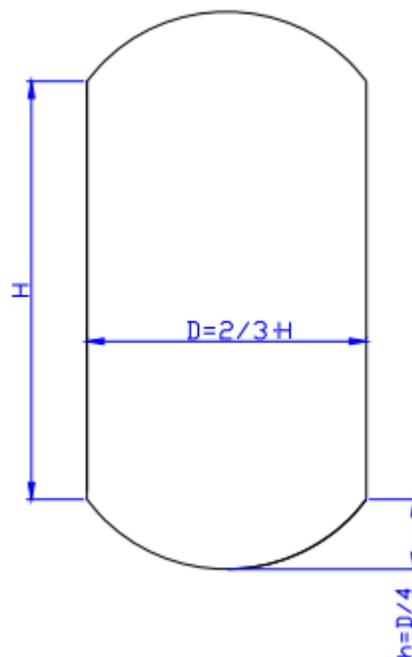


Figura F.1: Geometría tanque de almacenamiento para materiales líquidos

El volumen del recipiente está dado por:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot R^2 \cdot H$$

$$V_{cabeza} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h_{cab}}{6}$$

$$V_{tanque\ líquidos} = V_{cono} + 2 \cdot V_{cabeza}$$

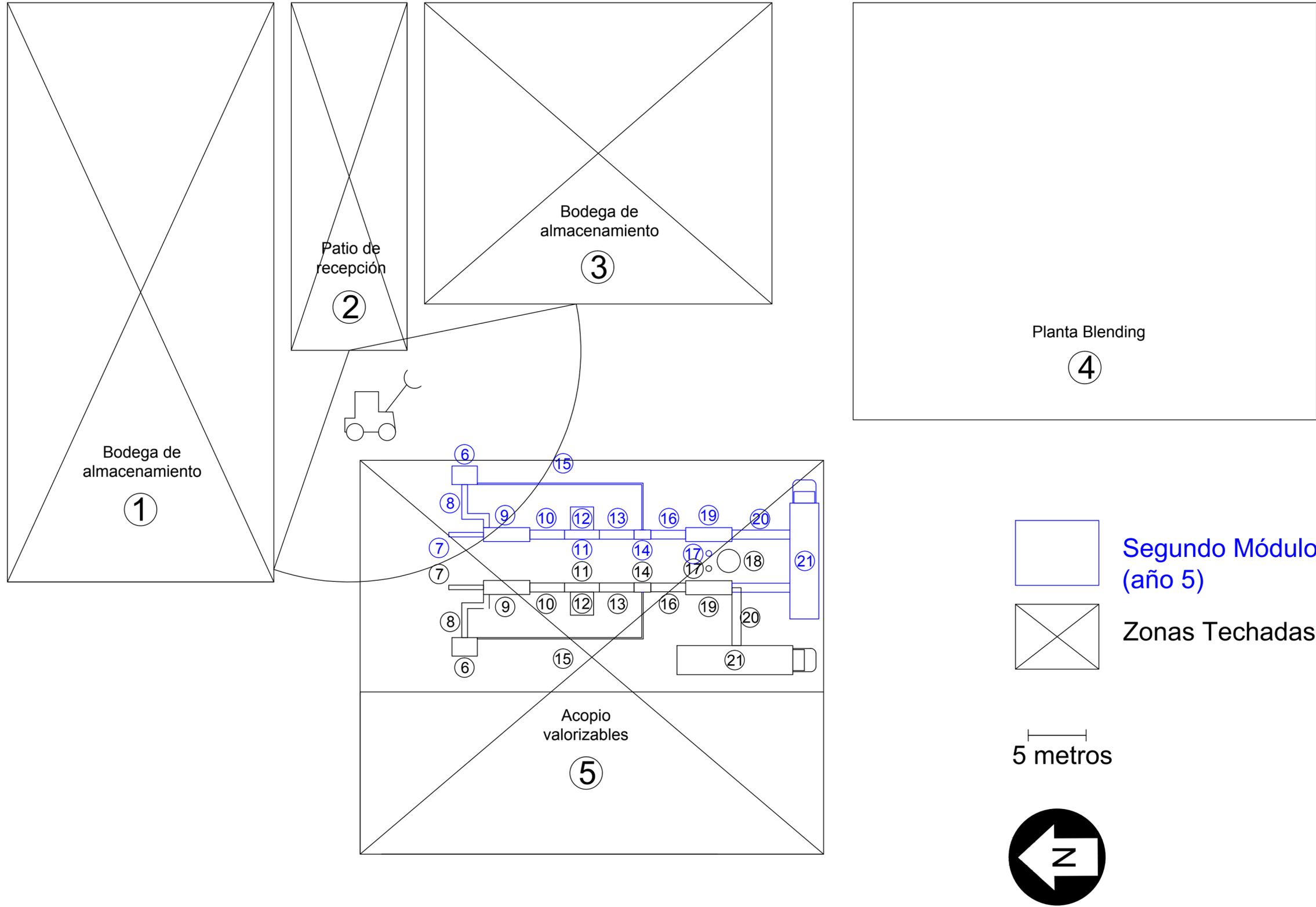
Se debe considerar también que por seguridad los recipientes solo se llenan hasta el 80% de su capacidad, lo que es una variable importante a la hora de determinar las dimensiones.

El flujo de MLC que se ingresa al mezclador sólido-líquido es igual a 0,216[ton/h], tomando en cuenta que la densidad del MLC medida en laboratorio corresponde a 0,88[ton/m<sup>3</sup>], se tiene que el volumen necesario para tener 2 días de autonomía, en el caso de máximo requerimiento (a partir del año 5) es de 11,78[m<sup>3</sup>], tomando en cuenta que solo se puede llenar el 80% de los estanques, el volumen necesario es 14,72[m<sup>3</sup>]. Con lo anterior y las ecuaciones enunciadas anteriormente, la altura H es igual a 2,95[m], lo que se aproxima a 3[m], con lo que queda que las **medidas** del estanque de almacenamiento son las detalladas en la **Tabla F.1**

**Tabla F.1: Características del tanque de almacenamiento de MLC**

<b>Variable</b>	<b>Magnitud</b>
<i>H</i>	3 [m]
<i>h<sub>cab</sub></i>	0,75 [m]
<i>D</i>	2 [m]
<i>V<sub>cilindro</sub></i>	9,42 [m <sup>3</sup> ]
<i>V<sub>cabeza</sub></i>	1,57 [m <sup>3</sup> ]
<i>V<sub>tanque líquidos</sub></i>	12,56 [m <sup>3</sup> ]

## **Anexo G.Layout**



- 1 Bodega de almacenamiento
- 2 Patio de recepción
- 3 Bodega de almacenamiento
- 4 Planta blending
- 5 Acopio Valorizables
- 6 Trituradora cortante
- 7 Cinta transportadora 1
- 8 Cinta transportadora 2
- 9 Mezclador de doble eje1
- 10 Cinta transportadora 3
- 11 Separador magnético
- 12 Acopio Metales
- 13 Cinta transportadora 4
- 14 Criba giratoria
- 15 Cinta transportadora 5
- 16 Cinta transportadora 6
- 17 Bomba centrífuga
- 18 Tanque de almacenamiento MLC
- 19 Mezclador de doble eje 2
- 20 Cinta transportadora 7
- 21 Camión para traslado CAS

PROYECTO PLANTA DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNATIVO SÓLIDO

Escala: 1/250	Contenido: Layout - Emplazamiento general
---------------	---

Autora: Valeria Proboste Sobarzo

Fecha: 28 de Enero, 2014

Hidronor Chile S.A.

Segundo Módulo (año 5)

Zonas Techadas

5 metros

