



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

**RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE VERTEDEROS MINEROS PARA
OPTIMIZAR LA RECUPERACIÓN EN PILAS PERMANENTES DE LIXIVIACIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

MATÍAS FRANCISCO KEIM ALIAGA

PROFESOR GUÍA:

MANUEL ALEJANDRO SOTO OLMEDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JORDAJ ZULETA

SEBASTIÁN GOLDSCHMIDT

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas
POR: Matías Francisco Keim Aliaga
FECHA: 25 de Oct, 2017
PROFESOR GUÍA: Manuel Alejandro Soto Olmedo

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE VERTEDEROS MINEROS PARA OPTIMIZAR LA RECUPERACIÓN EN PILAS PERMANENTES DE LIXIVIACIÓN

Los vertederos mineros son estructuras que alcanzan altos costos de construcción, sobre 12 MUSD en algunas faenas, por otra parte, estos solo generan costos tanto en operación, mantención, monitoreo, alto uso de espacio, planificación y otros costos asociados al cierre mina. Además, luego de llegar alcanzar el límite de su capacidad, se debe proceder a la construcción de un nuevo vertedero transformándose estos en un pasivo constante para la minería.

Dentro de los desechos que produce la mina hay tres grandes grupos: plásticos, neumáticos y madera. Estos últimos llegan a alcanzar un 60% del volumen dentro de los vertederos. Con el fin de hacer de la minería una industria de mayor sustentabilidad y sostenibilidad en el tiempo, creando ciclos cerrados en cada operación, es que se propone reprocesar los desperdicios de los vertederos mediante pirolización y/o gasificación, logrando así prolongar la vida útil de los vertederos al reducir el caudal depositado, además se cuantifica de forma estimativa la generación de calor y energía que podría proveer el proceso y algunas directrices para utilizar estos excedentes en los procesos mineros.

Se evaluó la factibilidad de la instalación e implementación de la planta paralizadora, para desechos de madera, plástico y neumáticos. Cuantificando el beneficio en más de 1.3 millones de dólares anuales solamente considerando la disminución de costos en relación al menor flujo de desechos depositados, esto sumado al beneficio del uso de los combustibles generados para distintos fines como la integración del potencial adicional para la red de suministro energético mina y la energía térmica para calentar el lixivante y así mejorar la recuperación en las pilas permanentes de sulfuros mediante una mayor cinética de extracción, justifican plenamente los altos costos en inversión la cual considera el control de emisiones para que esta sea una alternativa real en la deposición de desechos en el marco ambiental.

DEDICATORIA

Quiero dedicarle esta memoria, primero a mi madre, por ser una leona, la persona más fuerte que conozco, la mujer que me ha inspirado a todo y siempre ha creído en mí. Segundo a mi hermano, por ser la mejor definición de un verdadero hermano mayor y asumir las responsabilidades que me permitieron soñar. A mis tres abuelas, Isabel, Raquel, Nora y a mi tía Ana María por ser más de lo que podría pedir. A mi pareja y mejor amiga Giovanna por inspirarme a ser mucho mejor...

Al circo y su comunidad, que me enseñó a vivir con los brazos más abiertos y los pies menos en la tierra. Me dio la certeza de la perseverancia y que nada está fuera de mí alcance.

Por último, quisiera dedicarle esta memoria a mi viejo, que siempre dijo que lo único que iba a dejarme sería la educación y no pudo estar más equivocado...

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por haberme dado amor incondicional y bancarme en cada momento pese a ir la mayoría de las veces en contra de su opinión, lo han dado todo por sus hijos sin pensarlo dos veces. Espero alguna vez ser un atisbo de lo que ustedes fueron para mí.

A Carlos, mi hermano, por darme seguridad, por ser un ejemplo y cuidarme. Por ser sincero, honesto y reflejar los valores que admiro. Por hacerse cargo de la familia en los momentos más críticos, por verme siempre como un hermano menor. Por saltar y poner el pecho a las balas.

Quisiera agradecer a mi primo Ignacio por ser un referente de persona e incentivar a vivir más, a mi gran familia en Argentina, que pese a no estar cerca en distancia los tengo cerca del corazón. A mi familia en Lago Ranco, por darnos raíces y encantarme la vida. A mi pareja por ser mi compañera de verdad, por distraerme y darme foco a lo que realmente importa del camino.

A la familia que fui armando en el camino, mis grandes amigxs con los que crecí, compartí, reí y lloré, con los que pasé hambre y rabia, con los que me desvelé y dieron cara siempre, para vos Koke, Martín, Matus, Novi y Memel.

A mis grandes amigos Felipe, Cote y Coto, que me han acompañado en esta nueva etapa, gracias por el apañe.

A Manuel por entregarme la confianza y siempre creer en mí, por redirigir mi camino como líder y hacerme despertar del letargo que pueden generar los caminos fáciles. Pero principalmente por decirme y hacerme creer que “Se puede”.

A mi otro hermano Diego por tenderme la mano cuando más lo necesité y saber que puedo contar con él siempre.

Gracias a mi gran familia repartida por el mundo, gracias por acogerme en cada viaje, en cada búsqueda.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen Ejecutivo	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de contenidos	iv
Índice de tablas	vi
Índice de ilustraciones	vii
CAPÍTULO 1 Introducción	8
1.1. Motivación del trabajo	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Objetivo General	10
1.4. Objetivo Específico	10
1.5. Alcances	10
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	11
2.1. Residuos sólidos peligrosos y no peligrosos.....	12
2.2. Residuos sólidos no peligrosos	13
2.3. Residuos sólidos peligrosos	14
2.4. Tratamiento	14
2.5. Neumáticos mineros	14
2.6. Horno	15
2.7. Combustión/incineración	15
2.8. Pirolicación	17
2.9. Gasificación	19
2.10. Lixiviación de sulfuros.....	20
2.11. Cierre de faenas e instalaciones mineras.....	23
2.12. Marco legal vigente	24
CAPÍTULO 3 Metodología	25
3.1. Definición de los objetivos estratégicos en el negocio minero.....	25
3.2. Análisis de la situación actual y establecer caso base.....	26
3.3. Determinación de las variables críticas del proyecto.....	27
3.4. Obtención de datos de entrada y requerimientos del proceso.....	27
3.5. Evaluación tecnológica entre sistemas.....	28
3.6. Evaluación de sistemas, beneficios y costos.....	28
3.7. Conclusiones y recomendaciones.	28
CAPÍTULO 4 Resultados y discusiones	29
4.1. Caso base	29

4.2.	Vertedero y costos de construcción.	33
4.3.	Costo por metro cúbico de residuo.	34
4.4.	Costo estimado para cierre por hectárea intervenida.	34
4.5.	Operación de relleno sanitario.	35
4.6.	Ley de responsabilidad Extendida de Productores (REP)	35
4.7.	Ventajas y desventajas de las distintas tecnologías de tratamiento de residuos.	36
4.8.	Comparación entre tecnologías y aprovechamiento energético de residuos sólidos s mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada	39
CAPÍTULO 5 Conclusiones		45
CAPÍTULO 6 Bibliografía		48
CAPÍTULO 7 Anexos		49
7.1.	Anexo A: Contexto Empresa.....	49
7.2.	Anexo B Canchas NMFU - MEL BHP Billiton	53
7.3.	Anexo C	55
7.4.	Anexo D Estimación costos cierre vertederos	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características típicas neumático minero	15
Tabla 2 Costos partida vertedero/relleno sanitario	34
Tabla 3 Ventajas y desventajas del proceso de incineración	36
Tabla 4 Ventajas y desventajas pirólisis.....	38
Tabla 5 Ranking empresas líderes en tecnología minera 2015	52
Tabla 6 Tamaño canchas NMFU	54

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Estructura interior neumático	14
Ilustración 2 Salidas comunes de pirólisis.....	17
Ilustración 3 Proceso pirólisis general.....	18
Ilustración 4 Sistema de calentamiento de lixivante con doble caldera	21
Ilustración 5 Metodología de desarrollo	25
Ilustración 6 Comparación caso base vs implementación	26
Ilustración 7 Gráfico tipo radial	28
Ilustración 8 Diagrama de Ishikawa	29
Ilustración 9 Membrana impermeable, vertedero.....	31
Ilustración 10 Imagen satelital de MEL canchas de neumáticos (Fuente: Google Earth Pro)	32
Ilustración 11 Distancia a vertederos (Fuente: propia).....	33
Ilustración 12 Hornos incineradores (Fuente: Hornos Industriales Ltda.)	37
Ilustración 13 Gráfico radial cualitativo Incineración.....	41
Ilustración 14 Gráfico cualitativo radial Pirólisis.....	42
Ilustración 15 Gráfico cualitativo radial comparación entre tecnologías	43
Ilustración 16 Gráfico cualitativo radial Gasificación.....	43
Ilustración 17 Enfoque principal Hexagon.....	49
Ilustración 18 Sectores negocios - Hexagon (Fuente: presentación corporativa)	50
Ilustración 19 Ventas y márgenes anuales de Hexagon (Fuente: Presentación corporativa)	51
Ilustración 20 Ingreso por área de negocios (Fuente: Presentación corporativa).....	51
Ilustración 21 Zoom a cancha 1 (Fuente: Google Earth Pro).....	53
Ilustración 22 Canchas neumáticos MEL (Fuente: Google Earth Pro)	53
Ilustración 23 Canchas NMFU numeradas (Fuente: Google Earth Pro).....	54
Ilustración 24 gráfico de desglose de costos cierre (Fuente: Plan de manejo integral de residuos UTFSM)	57

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La industria minera ha cambiado rápidamente con las innovaciones tecnológicas. Se ha derivado a la especialización, evolucionando hacia el gigantismo para obtener grandes producciones. En otros casos se ha buscado la polivalencia del trabajo en equipos pequeños y medianos. Los medios informáticos han auxiliado y mejorado los sistemas de los equipos. La maquinaria va siendo cada vez más fiable, segura y cómoda para el operador, facilitándole las labores de conservación. En general se observa una preocupación creciente por la seguridad, salud y medio ambiente.

El gigantismo en la minería no solo afecta a la producción, a su vez, los insumos y desperdicios generados también escalan, siendo más percibibles los impactos generados. Creando un roce con las comunidades y en la opinión social que puede llevar a la paralización de la faena misma.

Los relaves generados de la producción terminan en tranques especialmente diseñados. Todo el resto de los Residuos No Peligrosos terminan en vertederos, que, a diferencia del pensamiento popular, no son simples depósitos de basura, si no estructuras complejas de intensivo costo de construcción, operación y mantenimiento. Esto sin considerar los costos asociados a la logística involucrada, el área que abarcan, ni los caminos y equipos requeridos. Y debido al flujo producido por las faenas, la vida útil de un vertedero es breve. Generando costos cíclicos de construcción. Por otra parte, los neumáticos terminan acumulándose en canchas como pasivos.

Así la búsqueda y transferencia de tecnologías que permitan minimizar, mitigar o reutilizar desechos o desperdicios para lograr ciclos más cerrados en cuanto a eficiencia tanto energética como ambiental son imprescindibles para un desarrollo de la industria y el correcto cierre de faenas.

Este proyecto consiste en la evaluación de tecnologías para reducir el flujo de desperdicios no peligrosos que va a parar a vertederos y de los neumáticos mineros en desuso. Generando la posibilidad de generar energía aprovechable para la misma operación minera.

Además, en la operación misma, los procesos hidrometalúrgicos, como las pilas de lixiviación (LX), seguidos por los procesos de extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW) son aplicados a óxidos y sulfuros secundarios de cobre. Sin embargo, estos óxidos y sulfuros secundarios se encuentran en la superficie de los depósitos, los cuales ya se encuentran en escasez, y sólo van quedando los sulfuros primarios. A raíz de esto, la industria deberá enfrentar la problemática de alimentación a las plantas hidrometalúrgicas junto con la constante de leyes cada vez más bajas y la alimentación creciente de sulfuros de cobre. Dentro del marco de la lixiviación de sulfuros, para permitir el uso continuo de estas plantas, es necesario desarrollar alternativas tecnológicas para el procesamiento de estos sulfuros abordando de esta forma la lenta cinética de lixiviación del principal sulfuro primario de cobre.

1.1.Motivación del trabajo

Esta memoria tiene como objeto evaluar tecnologías que permitan solucionar parcialmente una de las grandes aristas de la minería, con la cual aún se adeuda, con la sociedad, medio ambiente y consigo misma. Lograr de la minería una industria sostenible de manera loable con todos los “*stake holders*” asociados, pasando de una industria consumidora/explotadora de recursos a una empresa eficiente en uso y transformación de estos.

Lo anterior se concreta en la evaluación y factibilidad de tecnologías, las cuales permitan reducir la cantidad de desechos no peligrosos que se depositan en vertederos continuamente, tomando responsabilidad con estos y transformándolos en un activo fructuoso para los procesos mineros.

Se evaluarán las tecnologías de combustión, pirolización, torrefacción y gasificación disponibles en el mercado, su capacidad de carga y emisiones. Se valorizará la posibilidad de generar syngas y biodiésel a partir de los desechos, además de aprovechar la energía térmica generada para aumentar la temperatura del lixiviante en pilas permanentes de sulfuros con el fin de aumentar la recuperación mediante una cinética elevada.

El estudio se centra en este tipo de tecnologías, por una parte, por la gran eficiencia teórica de las mismas, ya que el poder calorífico obtenido después de haber llevado a cabo el proceso es bastante elevado, sin ser excesivo el consumo de energía para elevar la temperatura, y por otra parte, el bajo impacto ambiental que genera, ya que las emisiones son muy reducidas debido a que prácticamente son disociadas todas las moléculas en otras más simples y los elementos más contaminantes quedan fijados en un residuo vítreo

Mediante las interpretaciones técnicas de los sistemas propuestos, se realizará un análisis económico para justificar la inversión en infraestructura. Además de cuantificar los posibles beneficios económicos de disminuir los flujos de desechos y así prolongar el tiempo de vida útil de las estructuras.

1.2.Objetivos

En esta sección se detallan los objetivos del trabajo final a entregar en el curso Trabajo de Título MI6909.

1.3.Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es evaluar y determinar las tecnologías que sean capaces de reducir el flujo de desechos no peligrosos de la mina, aprovechando el proceso para generar energía y disponer de esta para su uso la operación, logrando así disminuir los costos asociados a la deposición de desechos y construcción de vertederos, como el aumento de eficiencia en diversos procesos, particularmente el aumento de la recuperación en pilas de lixiviación permanente aumentando la temperatura del lixivante, con un margen de recuperación energética.

1.4.Objetivo Específico

Los objetivos específicos del trabajo se detallan a continuación:

- Comparación cualitativa entre tecnologías de combustión, pirolización y gasificación, en cuanto a eficiencia, capacidad, complejidad del proceso.
- Impactos positivos y negativos de las tecnologías de tratamiento de residuos en impacto ambiental.
- Evaluar y desarrollar las aristas necesarias para aprovechar el potencial de aumento en recuperación en las pilas de lixiviación permanente mediante el aprovechamiento de la energía térmica necesaria.

1.5.Alcances

A continuación, se detallan los alcances para este proyecto:

- Trabajo desarrollado para la empresa Hexagon | Pixis.
- El trabajo solo considera valorización de desechos no peligrosos y neumáticos mineros en desuso.
- Para la construcción del modelo se consideran datos de varias faenas de alta producción localizadas en el norte de Chile.
- El objetivo principal de este trabajo es estudiar el potencial de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la incineración, pirolización y gasificación. Los resultados presentados son en base a estimaciones, por lo que para determinar el verdadero impacto del modelo es necesario realizar una prueba en terreno.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2.1. Industria minera en Chile

Durante el siglo XIX la minería empezó a cobrar gran dinamismo y se transformó en la principal actividad económica en Chile, así se produjo una amalgama entre la producción minera y la expansión industrial, integrándose en un solo conexo. Paralelamente a la importancia relacionada con el ámbito económico que adquirió este sector, la minería como tal se fue transformando en una de las actividades productivas más invasivas, causando un fuerte impacto ambiental en las zonas donde se desarrollaba. Durante el siglo XIX y XX, prácticamente no existió una conciencia ambiental transversal a la industria y población, lo que permitió que la explotación de los recursos vinculados a la minería no fuera evaluada de forma crítica, preponderando siempre el progreso económico por sobre las materias medioambientales.

Desde la promulgación de la ley 16.425 en 1965, donde el estado adquiere un porcentaje de las acciones de grandes compañías mineras extranjeras a través de lo que se llamó contratos ley y luego la nacionalización pactada en 1969, que aconteció con la compra de la mayoría de las compañías y su control por el Estado de Chile. Posteriormente se asoció el Estado chileno a capitales norteamericanos, lo que implicó un gran auge de producción. Sin embargo, este proceso de intervención del Estado en la explotación y producción de las actividades mineras continuó progresivamente hasta culminar en la nacionalización de la Gran Minería cuando, a través de la Ley 17.450 en 1971, el Estado se hizo cargo de las minas más importantes del país.

Un suceso clave en la generación de impactos ambientales provocados por la minería en Chile, fue la promulgación, en 1974, del Decreto Ley 600 de Estatuto de Inversión Extranjera. Dicho decreto, al fomentar la inversión de modo estructural bajando sustancialmente las tasas tributarias y generando un trato igualitario para las empresas nacionales y extranjeras. Junto con el Decreto Ley N° 1.759 generado en 1977, se instauró la incorporación de capitales extranjeros, generando un sistema compartido de explotación, esto hizo que en este periodo los niveles de inversión extranjera en la minería, alcanzaran ribetes históricos. Como repercusión se produjo una fuerte expansión de la actividad que influyó, de modo directo, en la generación de importantes impactos ambientales, que fueron paulatinamente adquiriendo notoriedad hasta hacerse insostenibles.

Recién por 1990, en el marco de una mayor sensibilidad por la controversia ambiental, se comenzó a discutir posibles medidas para disminuir o detener el impacto generado por la actividad minera. En un principio la discusión se centralizó en la contaminación de las fundiciones y en los tranques de relave. Casos emblemáticos fue la fundición Ventanas, cuyo humo se podía ver desde muchos kilómetros de distancia, y la mina El Salvador, la cual vertía sus relaves al mar. A los casos anteriores se sumaba también el uso de predios y regiones agrícolas, junto con la contaminación de los canales de regadío.

Así, se comenzó a regularizar la contaminación minera, iniciándose la búsqueda de una coexistencia de la protección ambiental con el desarrollo económico a través del impulso de una legislación apropiada. A partir del Decreto N° 185 de 1992, y en el marco de un acuerdo voluntario entre diversos sectores productivos y el Estado, se iniciaron planes de descontaminación en las 5 fundiciones de cobre estatales y se implementaron estudios de impacto ambiental en toda nueva faena minera, lo que finalmente derivó en que más del 60% de aquellos estudios correspondiera al sector minero. Al mismo tiempo, la Ley de Bases del Medio Ambiente (1994) y la promulgación de su reglamento en 1997, impusieron una mayor conciencia ambiental en las actividades mineras del país.

La industria minera ha experimentado grandes cambios gracias a las innovaciones tecnológicas que han permitido la adaptabilidad al contexto actual y ha conducido a la especialización, evolucionando hacia el gigantismo para obtener grandes producciones. En otros casos se ha buscado un trabajo multifacético en equipos pequeños y medianos. Los medios informáticos han auxiliado y mejorado los sistemas de los equipos. La maquinaria va siendo cada vez más confiable, segura y útil para el operador. En general se observa una preocupación creciente por la seguridad, salud y medio ambiente.

2.2. Residuos sólidos peligrosos y no peligrosos

Para comenzar es conveniente establecer que la legislación y reglamentación ambiental chilena estable la siguiente diferenciación entre los distintos tipos de residuos sólidos.

Los residuos o mezclas de residuos que presenten riesgos para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia presentar algunas de las siguientes características:

1. Toxicidad Aguda
2. Toxicidad Crónica
3. Toxicidad extrínseca.
4. Inflamabilidad
5. Reactividad
6. Corrosividad.

La presencia de una sola de estas características, bastará para que el residuo sea calificado como peligroso.

2.3.Residuos sólidos no peligrosos

Los residuos sólidos no peligrosos, son aquéllos que por su naturaleza y composición no tienen efectos nocivos sobre la salud de las personas ó los recursos naturales, y no deterioran la calidad del medio ambiente. Estos residuos pueden ser industriales o de origen doméstico. Son generados en las actividades productivas, considerando todas las operaciones unitarias. Ejemplos representativos son los siguientes:

- Papeles, plásticos y cartones
- Trapos y textiles
- Vidrios y maderas
- Elementos de protección personal
- Neumáticos, gomas, HDP
- Filtros de aire
- Escombros y ladrillos
- Chatarra metálica
- Tambores metálicos no contaminados
- Baldes o contenedores plásticos no contaminados

2.4. Residuos sólidos peligrosos

Se consideran residuos peligrosos a todos aquellos que presentan características como toxicidad, inflamabilidad, reactividad o corrosividad, entre otras. Los residuos peligrosos son fundamentalmente industriales, aunque excepcionalmente también se originan en el ámbito doméstico. Ejemplos representativos son los siguientes:

- Filtros de aceite
- Baterías con electrolito ácido
- Productos contaminados (huaipes, trapos, ropa, elementos de protección personal)
- Contenedores contaminados (tambores metálicos y plásticos)
- Pilas, tubos fluorescentes, tóner

2.5. Tratamiento

El tratamiento se definirá como cualquier procedimiento al que se someten los residuos sólidos no peligrosos, mediante el cual se modifican sus características físicas, químicas y/o biológicas para aprovecharlos, estabilizarlos, reducir su volumen o facilitar su manejo y disposición final. Con objeto de recuperar materiales aprovechables, conversión de productos y energía y/o control de la contaminación ambiental.

2.6. Neumáticos mineros

Los neumáticos mineros son de mucha mayor resistencia y complejidad estructural que la que se encuentra en un neumático común. Se hablará de neumáticos mineros refiriéndose a

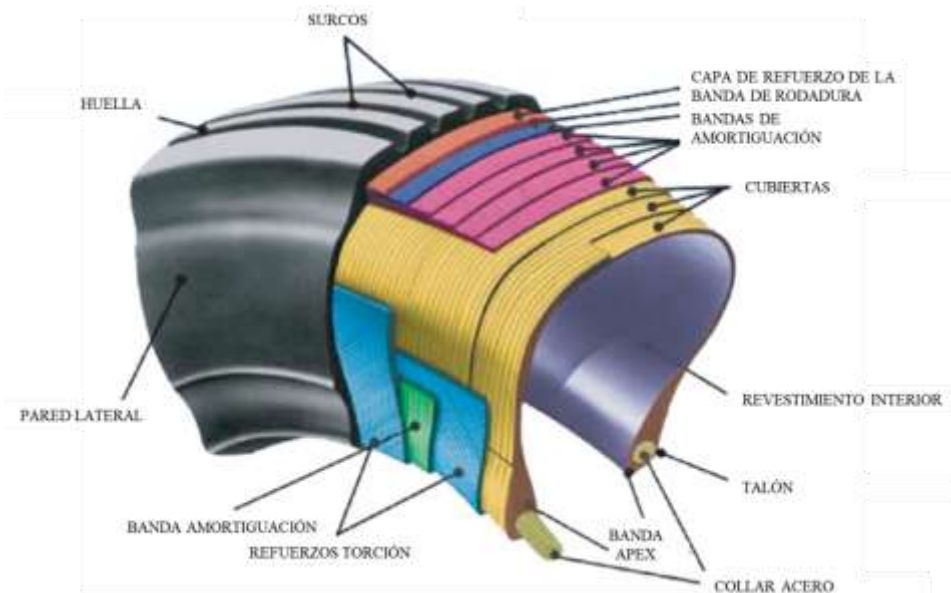


Ilustración 1 Estructura interior neumático (fuente: <http://www.michelinrvires.com/miningtires>)

los neumáticos de los camiones de extracción (CAEX), neumáticos de alta dureza que además de los textiles, cuentan con un talón de acero trenzado en la parte interior del ápex.

La actividad minera genera que la industria sea un consumidor masivo de neumáticos. Sin embargo, una vez que han cumplido su vida útil no hay destino útil ni sostenible para éstos. Especialmente para los neumáticos de los camiones mineros gigantes denominados Neumáticos Mineros Fuera de Uso (NMFU).

Tabla 1 Características típicas neumático minero

Neumático minero	R57
Diámetro [m]	4.03
Ancho [m]	1.50
Largo [m]	1.48
Peso total [Kg]	5,000
Peso acero [Kg]	890
Peso caucho [Kg]	3,850

2.7.Horno

Es la estructura, dispositivo, en el cual se realiza la reacción exotérmica del combustible, para este el caso, desechos no peligrosos provenientes de la faena minera. Se evaluarán 4 hornos distintos, horno de **combustión/incineración**, horno de **pirolización**, horno de **gasificación** y finalmente horno de **torrefacción**. La diferencia entre cada uno de los equipos corresponde a la complejidad de estos, la temperatura que alcanza la reacción y los caudales de oxígeno que requiere, así como los productos que entregan. A continuación, se describirán brevemente la diferencia entre cada proceso y los equipos.

2.8.Combustión/incineración

El proceso de incineración permite reducir los desechos sólidos hasta en un 90%, de su volumen original, genera subproductos gaseosos que, de no manejarse adecuadamente el proceso, pueden causar contaminación ambiental importante, hoy en día la tecnología alcanza avances que permiten el filtrado y regulación de emisiones lo cual ha permitido que el proceso sea visto como una alternativa atractiva en el control de desechos.

Se define incineración, como un proceso térmico, que lleva a la reducción tanto en peso como en volumen de los residuos sólidos, mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno.

El objetivo de este proceso, es reducir el volumen de los residuos transformándolo la prima, en materiales sólidos, gaseosos y líquidos, que pueden ser manejados con mayor facilidad para su disposición final. Los residuos sólidos reciben un tratamiento térmico en presencia

de aire transformándose en constituyentes gaseosos y en residuos sólidos relativamente no combustibles. Durante la combustión de los residuos en un incinerador se genera calor, lo que se conoce como “calor de combustión”, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía para el mismo proceso o para otros como el calentamiento de agua (o lixivianante) o la generación de vapor.

Las prácticas de incineración son diferenciadas comúnmente en dos sistemas, dependiendo si tienen un requerimiento de tratamiento previo de los residuos o no. El primer sistema requiere eliminar los elementos no combustibles de los residuos sólidos y además reducir el tamaño de las partículas para su incineración, el segundo no tiene estos requerimientos, por lo que la incineración se realiza directamente con los residuos sin ningún tratamiento previo. A este segundo método se le denomina incineración en masa.

Los equipos de incineración se encuentran actualmente en un estado muy avanzado en su desarrollo tecnológico. Cuentan con parrillas de incineración y calderas de recuperación térmica probadas y los sistemas de limpieza de gases están bien establecidos. Se puede encontrar en el mercado equipos de diversos tamaños para distintos flujos de alimentación y ya han aparecido plantas móviles.



Ilustración 2 Horno Incinerador

2.9. Pirolización

Una de las tecnologías alternativas para el manejo de los residuos sólidos y que ofrece ventajas, aunque aún se encuentra en proceso de perfeccionamiento tecnológico es la pirólisis. Este es un proceso fisicoquímico mediante el cual el material orgánico de los residuos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua.

La pirólisis tiene como objetivo la disposición sanitaria y ecológica de los residuos sólidos, disminuyendo su volumen al ser transformados en materiales sólidos, líquidos y gaseosos con potencial de uso como energéticos o materias primas para diversos procesos industriales.

La pirólisis se diferencia de la incineración en que el proceso de descomposición térmica de la materia orgánica se desarrolla en un ambiente con deficiencia o ausencia de aire, mientras que la incineración requiere del oxígeno para generar la combustión de los componentes. Durante este proceso, la materia orgánica se transforma en productos de alto contenido energético como el carbón, alquitrán, los gases de hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, propano, butano, pentano, amoníaco, oxígeno, monóxido y bióxido de carbono que pueden ser utilizados como combustibles, además de aceites ligeros (mezclas de benceno, tolueno, xileno y otros), sales y metales reducidos que se pueden usar como materia prima en otros procesos.

La proporción de la mezcla resultante de la pirólisis de los residuos sólidos, depende de las condiciones del proceso como es la temperatura de operación, la velocidad del calentamiento

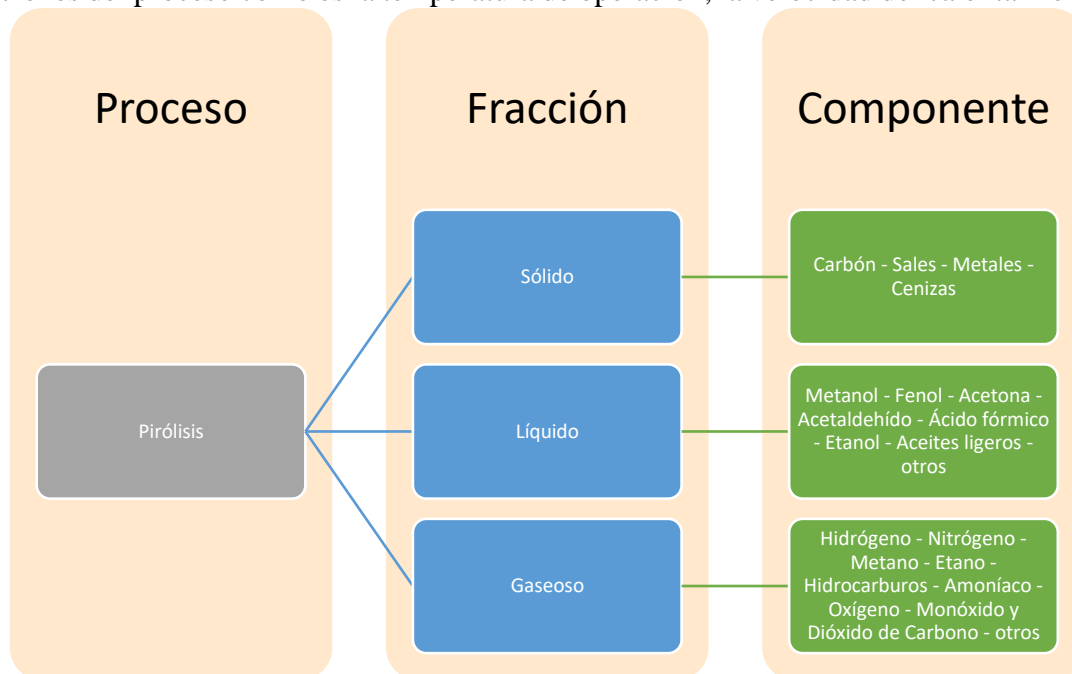


Ilustración 3 Salidas comunes de pirólisis

y la composición de los desechos de alimentación. A continuación, se pueden observar un esquema de los componentes finales según su fracción y estado.

El componente principal de las plantas de pirólisis es el reactor pirolítico que consta de una cámara calentada con gas, hermética y revestida. Esta cámara gira lentamente y tiene una pequeña inclinación en el sentido de alimentación hacia la descarga. Los residuos son alimentados a través de un sello que abre intermitentemente y son sometidos a temperaturas de 650 a 982°C en una atmósfera deficiente o libre de oxígeno. Un esquema general del proceso pirolítico de los residuos sólidos se presenta en la Figura.

Se observa en el mercado que el costo de inversión inicial de una planta de pirólisis es aproximadamente igual al de una planta de incineración y su funcionamiento mantienen el mismo orden de costos; aunque a diferencia de las plantas de incineración, los costos son recuperables en las plantas de pirólisis ya que prácticamente todos los subproductos son reutilizables y representan un ingreso potencial.

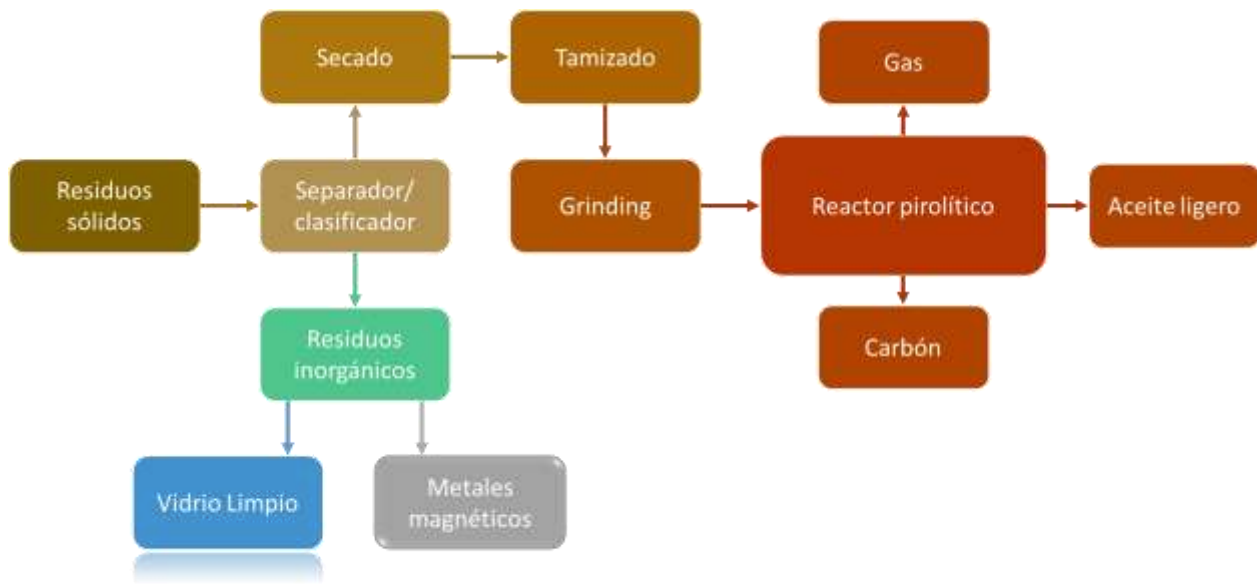


Ilustración 4 Proceso pirólisis general

2.10. Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico por el que la biomasa, o materia orgánica, se transforma en gas combustible. Cuando la biomasa, que deberá estar en estado sólido y seco, es sometida a la acción del calor en condiciones de defecto de aire, o combustión incompleta, se producen una serie de reacciones que dan lugar a un gas de gran interés energético. El gas obtenido cuando la gasificación se realiza con aire, como es nuestro caso, se denomina gas pobre y está formado básicamente por monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano. Las principales aplicaciones de la gasificación se basan en la utilización de la energía térmica que genera el propio proceso y la del gas producido:

- **Generación de calor:** En este caso, se aprovecha la energía térmica generada durante la gasificación de la biomasa (madera, cascara, sarmiento...) y la obtenida por la combustión del gas. Este sistema consta de una caldera de gasificación y un quemador. Se puede reaprovechar una caldera de gasóleo, gas o leña existente como quemador o intercambiador, reajustándola para tal uso. Sistema adecuado para procesos que requieran la calefacción de espacios habitables, la climatización de piscinas, el calentamiento de hornos o el secado de grano, minerales, etc. También podemos obtener frío, a través de un “chiller” o sistema de refrigeración por absorción.
- **Generación de electricidad y calor:** Básicamente el sistema consta de un gasificador y un grupo electrógeno. En este caso es muy importante señalar que por cada kW eléctrico generado se obtienen 2 kW térmicos que en caso de aprovecharse harían mucho más rentable la instalación. Como dato orientativo diremos que gasificando de 1 a 1,3 Kg de madera obtendremos aproximadamente 1 kW eléctrico y 2 kW térmicos. El gas puede sustituir a otros combustibles convencionales como el gasóleo, el fuel-oil o el gas natural y es mucho más económico, limpio y no presenta problemas de contaminación.

2.11. Lixiviación de sulfuros

Los procesos hidrometalúrgicos, como las pilas de lixiviación (LX), seguidos por los procesos de extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW) son aplicados a óxidos y sulfuros secundarios de cobre. Sin embargo, estos se están agotando, y sólo van quedando los sulfuros primarios. Debido a esto, pronto las faenas mineras deberán enfrentar la problemática del agotamiento de material de alimentación a las plantas de LX-SX-EW, además de leyes cada vez más bajas, escasez del recurso hídrico y que la única alimentación disponible a futuro será la calcopirita, sulfuro de cobre cuyo tradicional procesamiento es a través de una combinación de técnicas de flotación y pirometalúrgicas.

Debido a esto, para permitir el uso continuo de estas plantas, es necesario desarrollar alternativas tecnológicas para el procesamiento de estos sulfuros abordando de esta forma la lenta cinética de lixiviación del principal sulfuro primario de cobre.

Es por esto que existen varios estudios relacionados con la lixiviación de este mineral en diferentes medios, de los cuales los más comunes son amoniacales, nitratados, sulfatados, clorurados y la utilización de bacterias. Existe un acuerdo general de varios autores según el cual el efecto de la temperatura en la cinética de disolución de la calcopirita es significativo. Al aumentar la temperatura se mejora la velocidad de disolución.

2.12. Elevación térmica de fluidos a través de sistemas de combustión.

Existen varios procesos que involucran distintos tipos de tecnologías para aumentar la temperatura de fluidos a través de serpentines o calderas térmicas, dentro de estas alternativas se encuentran sistemas sencillos, los cuales permiten un bajo control, lo que se traduce en una alta variabilidad de la temperatura esperada, produciéndose picos de temperaturas altas y bajas respecto a la media calibrada. También hay sistemas de mayor complejidad que permiten una variabilidad térmica mínima, entregando una mayor confiabilidad al proceso.

A continuación, se presenta la tecnología de caldera de doble cámara la cual permite tener variaciones de un máximo de 2 grados, en torno a la temperatura teórica óptima de 70° grados. Es decir, un rango de 68 a 72°C de salida del lixiviante.

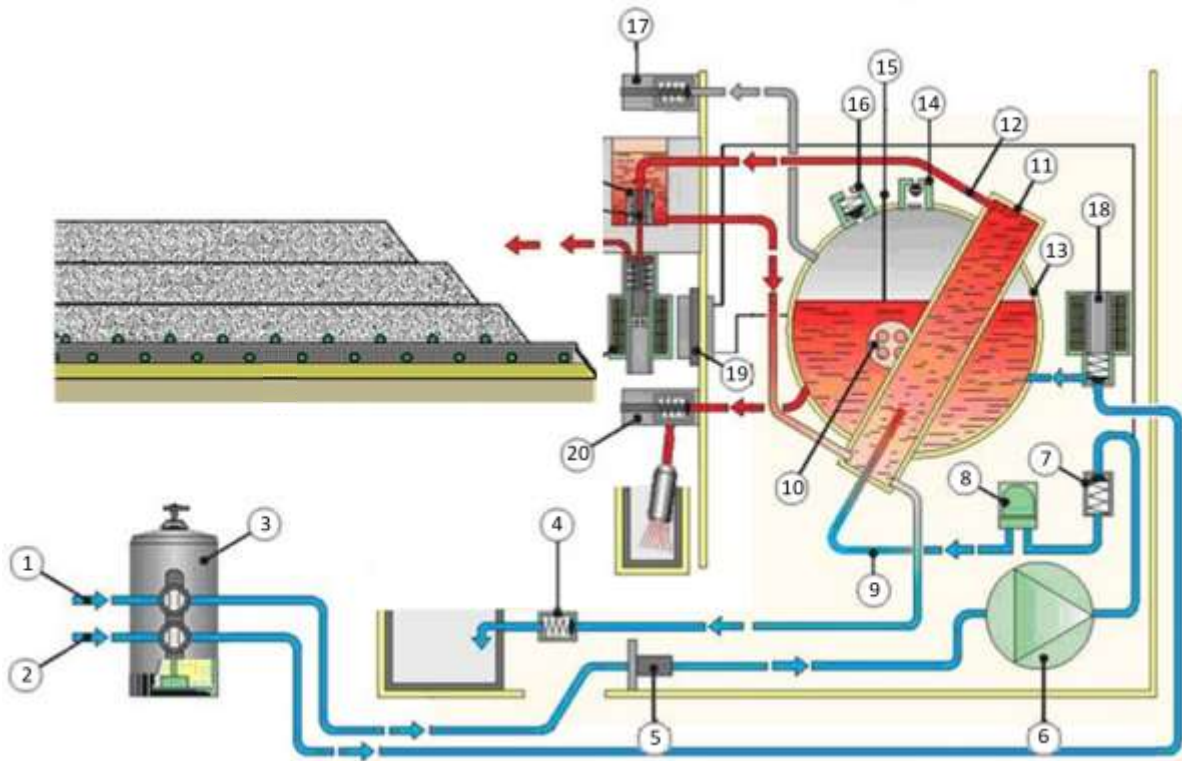


Ilustración 5 Sistema de calentamiento de lixiviante con doble caldera (Fuente: propia)

En la imagen anterior podemos notar dos circuitos interdependientes, ambos impulsados mediante la misma bomba, uno con agua y otro con el lixiviante que se regará las pilas. El primer circuito que inicia en el **punto 2** llega a la caldera pasando primero por un solenoide (**punto 18**), este permite regular junto al sensor de altura de llenado (**punto 15**) el paso de agua hasta el nivel freático correspondiente de la caldera. Luego, el agua es calentada por el elemento conductor (**punto 10**) del horno que combustiona los residuos sólidos. La caldera principal tiene los sensores y válvulas adecuadas (**punto 14, 15, 16 y 17**) para la regulación

de presión de gas, temperatura, nivel del agua y presión de vacío, con dos puntos de fuga (**puntos 17 y 20**), necesarios para liberar el vapor gaseoso generado o el nivel del agua líquida. Se puede aprovechar la presión de salida del agua líquida por el **punto** de fuga número **20** para realizar una salida de aspersion la cual propiciaría un enfriamiento acelerado al aumentar el área superficial expuesto de cada partícula, pudiendo reincorporar el agua al sistema del primer ciclo más rápido.

La cámara interior de la caldera principal, también llamada segunda caldera o caldera interior (**punto 11**), cumple como objetivo ser el intercambiador de calor entre la caldera principal, es aquí por donde circula el lixivante dentro del segundo circuito el cual comienza en el **punto 1**. Después pasa por una válvula de seguridad unidireccional, esta impide que el lixivante se devuelva (**punto 5**) y continua por una válvula reguladora de flujo (**punto 6**). Aquí el lixivante alcanza la temperatura deseada se presuriza lo que lo empuja a salir por el **punto 12**. Se mantiene un flujo cíclico por el intercambiador de calor. El lixivante caliente llega a la cámara de salida, de no estar a la suficiente temperatura el lixivante (esto ocurre en los primeros minutos de funcionamiento del horno) o de no estar en riego, el lixivante caliente no utilizado se redirecciona a la sección interior del intercambiador de calor. Así se evita la pérdida de calor cuando no se está utilizando el riego.

Este sistema permite mantener la temperatura de salida del lixivante con una variación mínima.

A continuación, se entregan las partes detalladas en el diagrama anterior.

1. Entrada circuito lixivante.
2. Entrada circuito agua.
3. Bomba propulsora bifásica.
4. Válvula de seguridad tipo 1 y fuga unidireccional.
5. Válvula de seguridad unidireccional.
6. Válvula reguladora de flujo.
7. Válvula de seguridad tipo 1.
8. Automático térmico.
9. Entrada cámara interior, cubierta térmica.
10. Cabezal de temperatura.
11. Salida cámara interior.
12. Conducto a cámara de salida.
13. Caldera principal
14. Válvula reguladora de vacío.
15. Sensor nivel freático.
16. Sensor térmico.
17. Válvula reguladora de presión de vapor.
18. Solenoide de paso.
19. Automático de presión agua.
20. Interruptor vaciado o recambio agua caldera.

2.13. Cierre de faenas e instalaciones mineras.

Elevados costos son asociados al cierre de faenas e instalaciones mineras, costos no menores son asociados al cierre de los vertederos mineros, un plan de cierre es un proyecto de ingeniería en el cual se presentan un conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la industria extractiva minera, en los lugares en que ésta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones, en conformidad a la normativa ambiental aplicable.

Según la Ley 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras que fue publicada el 11 de noviembre de 2011 y entró en vigencia a partir del 11 de noviembre de 2012. Ley que fue desarrollada bajo la motivación de:

- Ausencia de una normativa específica, que regulara los aspectos negativos de la Industria Minera Extractiva.
- Materializar el concepto de “el que contamina paga”. La empresa minera debe hacerse cargo de las externalidades, e incorporarlas como un elemento más dentro del negocio minero.
- Impedir la generación de Nuevas Faenas Mineras Abandonadas.
- Ausencia de una garantía financiera que asegurara al Estado, el cumplimiento de las medidas de cierre comprometidas por la empresa

De esta manera, los objetivos de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras quedan resumidos como:

- **Resguardar la Vida, Salud y Seguridad de las Personas y del Medio Ambiente.**
- **Mitigar los Efectos negativos de la Industria.**
- **Evitar el Abandono de faenas mineras después del cese de las Operaciones.**
- **Asegurar la Estabilidad Física y Química de los lugares en que se desarrolle la Actividad Minera.**
- Establecer Garantías para el cierre efectivo de las Faenas e Instalaciones Mineras.
- Crear un Fondo Post-Cierre para el Monitoreo de Faenas Cerradas.

Dentro del marco de la Ley 20.511 se dicta:

La Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, obliga a que todas las faenas mineras cuenten con un plan de cierre aprobado por el Servicio, previo al inicio de las operaciones mineras y que debe contener la totalidad de las instalaciones de la faena.

2.13.1. Artículo 55 Plan de Cierre

Haciendo un foco en el Artículo 55:

El Plan de Cierre deberá mantenerse por un período de al menos **20 años**, y deberá contemplar, cuando corresponda, al menos las siguientes actividades:

- a) Mantenimiento de la integridad de la cobertura final
- b) Mantenimiento y control del sistema de intercepción de escorrentías superficiales.
- c) Mantenimiento y operación del sistema de control de lixiviados.
- d) Mantenimiento y operación del sistema de manejo de biogás.
- e) Monitoreo de aguas subterráneas.

2.14. Marco legal vigente

El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental es una herramienta para poder diseñar y construir proyectos bajo normativas medio ambientales. De acuerdo al artículo 10, letra i) de la ley 19.300 (Ministerio del Medio Ambiente, 2017):

“Los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases, que deberán someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental son las siguientes (...)”

“i) Proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbon, petróleo y gas comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles, así como la extracción industrial de áridos, turba o greda;”

Dadas las características de este proyecto, bastaría con entregar una declaración de impacto ambiental, para que la operación de la planta sea autorizada, cuyo proceso completo de aprobación demoraría alrededor de tres meses. Su costo no se considera dentro de esta evaluación, dado que las conclusiones obtenidas, sin considerar este factor no cambian en el caso de que se incluyese.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las distintas etapas en las que se dividió el proyecto para el desarrollo de la memoria de título.

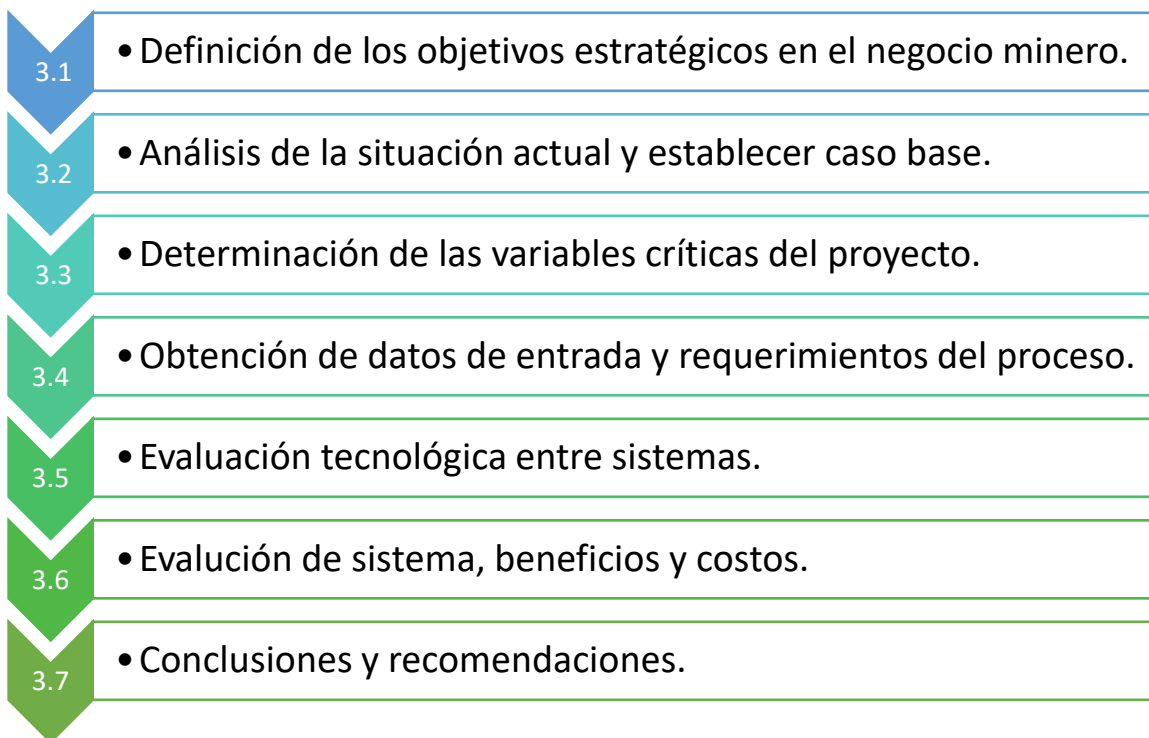


Ilustración 6 Metodología de desarrollo

3.1. Definición de los objetivos estratégicos en el negocio minero.

La minería en sí, es un negocio, aunque la explotación de recursos naturales es necesaria para el posterior desarrollo de un sinfín de productos, la extracción y procesamientos que dicta el comportamiento de la industria minera, es la valorización comercial del mineral, ya sea concentrado, polvo, cátodos o cualquier otro producto en el mercado. Por lo que las decisiones que toma el negocio minero son en pos de maximizar el beneficio económico del proceso.

Así los principales objetivos son los ligados reducir costos de operación y tratamiento, optimizar la producción y eficiencia en el tiempo. Estos lineamientos prácticamente auto regulados por el mercado, han sido los responsables del gigantismo en la minería. Igualmente, las decisiones que han llevado a la industria a una mayor concientización y preocupación por el impacto medioambiental y en las comunidades, son principalmente cánones de la misma búsqueda económica.

Los objetivos que gobiernan el desarrollo de este proyecto se alinean con las pautas del negocio minero a fin de que este proyecto sea plausible y concretable. Así quedan resumidos en los siguientes puntos:

- Reducir los costos relacionados con la deposición de desechos no peligrosos en vertederos.
- Reducir los costos relacionados con la deposición de neumáticos mineros fuera de uso.
- Utilizar como materia prima los pasivos desechados para su aprovechamiento en la operación de lixiviación en pilas permanentes de sulfuros.
- Mitigar el impacto ambiental generado por la deposición insostenible de desechos.

3.2. Análisis de la situación actual y establecer caso base.

Con el fin de establecer una línea base para la comparación entre continuar operando en las condiciones actuales en contraparte del posible escenario con el proyecto puesto en marcha.

El escenario base se establece manteniendo la deposición de los desechos no peligrosos en vertederos o rellenos sanitarios, los neumáticos siendo apilados en canchas y la lixiviación de las pilas sin alteración en el gradiente térmico del lixivante. Todo lo anterior en marco de las normativas vigentes y la ley REP.

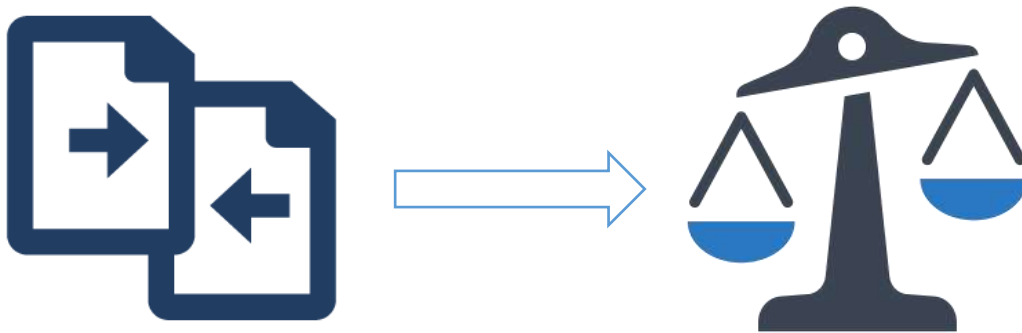


Ilustración 7 Comparación caso base vs implementación

3.3. Determinación de las variables críticas del proyecto.

Debido a la gran cantidad de variables que se pueden obtener e incluir en la evaluación dentro de la operación minera, es primordial definir cuáles serán las variables significativas que tengan un mayor impacto en el desarrollo del proyecto y con las cuales se va a trabajar. De no lograr definir las variables esenciales, la proyección y estimación de cualquier proyecto a evaluar se vuelve complejo y difuso.

Para definir lo anterior, se requiere una revisión exhaustiva de la bibliografía pertinente, y una planificación en el desarrollo que permita estimar en que áreas se refleja el impacto previsto al implementar el proyecto.

Dentro de la determinación de variables, análisis de la problemática y sus posibles soluciones se realizó un análisis de Ishikawa para una mayor focalización de la metodología.

3.4. Obtención de datos de entrada y requerimientos del proceso.

Para poder realizar una evaluación apropiada de los sistemas evaluados se requiere de los datos flujométricos de desechos no peligrosos y NMFU para dimensionar los equipos y evaluar su continuidad operacional.

Los requerimientos en cuanto a temperatura del lixiviante y los metros cúbicos a tratar para el riego de las pilas son necesarios para determinar el sistema hidráulico de aprovechamiento térmico del horno, como las dimensiones mínimas requeridas.

3.5. Evaluación tecnológica entre sistemas.

Para realizar la evaluación tecnológica se realizaron análisis FODA y de las cinco fuerzas de Porter, además se utilizaron gráficos radiales con variables cualitativas para una ilustración mejor entre tecnologías. Dentro de las variables se consideró:

- Complejidad tecnológica del sistema
- Costo equipos
- Costo operación
- Emisiones contaminantes
- Eficiencia
- Flexibilidad del sistema

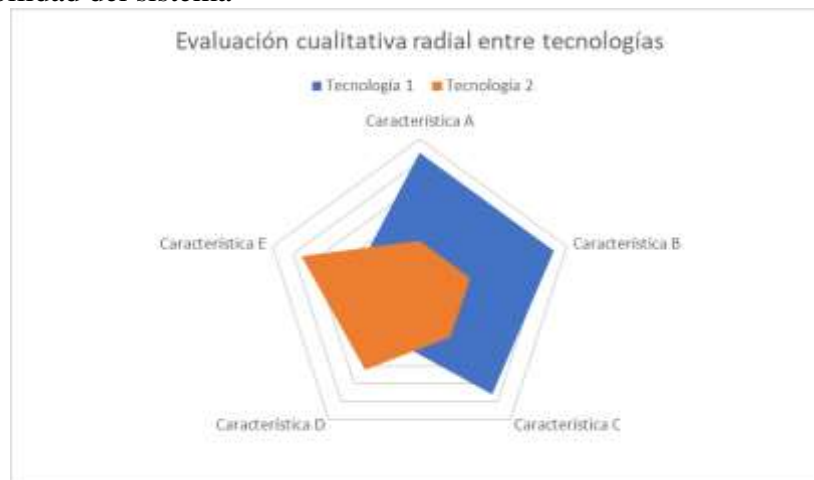


Ilustración 8 Gráfico tipo radial

3.6. Evaluación de sistemas, beneficios y costos.

La evaluación de los sistemas de reprocesamiento de desechos planteada realizará un análisis costo – beneficio de la implementación del sistema, considerando las altas inversiones requeridas y cuantificando los beneficios e ingresos del proyecto.

3.7. Conclusiones y recomendaciones.

La sección final realiza un análisis sobre los principales resultados obtenidos, como se cumplieron o no los objetivos del proyecto, así como los planteados en esta memoria. Finalmente se entregan recomendaciones sobre las siguientes etapas y posibles aristas y mejoras que quedan fuera del alcance definido en este trabajo, pero que eventualmente realizarían un aporte a la evaluación.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caso base

A fin de establecer una línea de comparación entre el estado actual sin la implementación de ninguna tecnología que afecte radicalmente el escenario operante. Se presenta un análisis económico donde se incluye una estimación de costos de construcción y operación tomando en consideración la vida útil promedio de un vertedero o relleno sanitario y así poder vislumbrar la repercusión de perpetuar las conductas no sostenibles en el tiempo.

Como primer acercamiento y para facilitar el análisis del problema se trabajó con el diagrama de Ishikawa y las llamadas 6M.

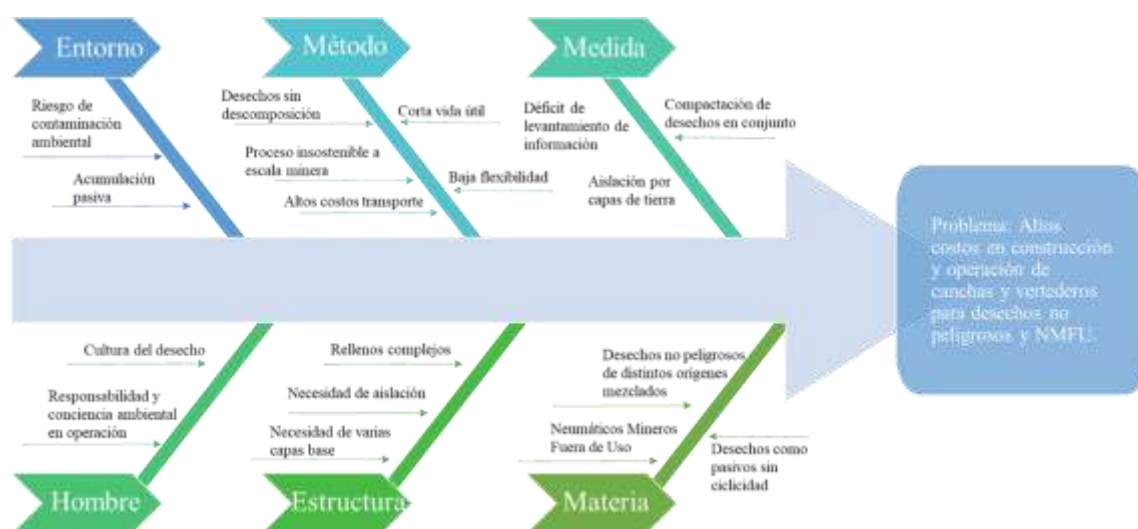


Ilustración 9 Diagrama de Ishikawa

Las 6M de Ishikawa corresponden a los ítems a analizar que generan una causalidad, cada ítem tiene una sub-causa que se puede ramificar a su vez, en el esquema anterior por simplicidad se resumen solo en un sub-nivel, en el caso de los DMNP y los NMFU.

Se levantaron los datos de uno de los vertederos y neumáticos en desuso de la División Chuquicamata de CODELCO, a fin de acercar al contexto de la industria nacional y la mega minería.

Tabla 2 DMNP Chuquicamata CODELCO

Residuo Industrial No Peligroso	CAPEX		OPEX	
	US\$	Tiempo [años]	Actividad	\$/t
Costos asociados a la construcción, operación y mantención de vertedero.	11,000,000	20	Recolección Residuos	24,000
			Retiros Correas Transportadoras	57,692
			Adm y Operación Vertedero	3,320
			Adm y Operación Patio de Chatarra	5,410

Tabla 3 NMFU Chuquicamata CODELCO

Registro de neumáticos mineros desechados en año 2016. [unidades/año]	300
Registro de neumáticos mineros desechados total acumulados. Ton, unidades.	12,500

4.1.1. Materia Prima:

Los DMNP son mezclados y depositados juntos, disminuyendo su valorización en reutilización. Estos desechos al estar sobre una membrana aislante y recubiertos por distintas capas de áridos, generan una aislación con el medio, evitando su descomposición natural, logrando una preservación de los desechos. Igualmente, los neumáticos son tratados a altas temperaturas en su concepción, generando un caucho de alta resistencia que sufre un deterioro casi nulo en condiciones climáticas normales, por lo que sus acumulaciones en canchas los vuelven otro pasivo ambiental.

4.1.2. Mano de Obra (Hombre):

En el escenario actual muchos de los DMNP cumplen con características que permiten su reciclaje, la mayoría de las faenas cuenta con puntos de reciclaje, pero no hay un comportamiento que muestre conciencia para su uso. Tampoco hay un conocimiento fuera de la operación misma sobre que sucede aguas abajo con los desperdicios generados.

4.1.3. Maquinaria (Estructura o Equipo):

En este caso la estructura, a la cual se refiere este trabajo son los vertederos o rellenos sanitarios, los cuales son estructuras intensivas en uso de equipos tanto en su construcción como en su operación. Además, su composición estructural requiere de una membrana impermeable, cubierta por una capa de árido fino y una superior de áridos de mayor granulometría. Después de la deposición de los desechos y su reacomodación realizada por un equipo tipo cargador frontal, se requiere de otro equipo para su compactación, luego de que un nivel es llenado se tapa y re compacta con una capa de árido.

La aislación de los desechos provoca que el espacio ocupado por estos después de la compactación se constante, por lo que los desechos se van acumulando. Para los NMFU no existe compactación solo su deposición y acumulación en canchas que requieren de costos equipos para su reacomodo.

Cada vez los vertederos y canchas se encuentran más alejados de las fuentes de generación por lo requieren un traslado mayor, aumentando progresivamente los costos de transporte asociados.



Ilustración 10 Membrana impermeable, vertedero (Fuente: <http://www.georigo.com/?mod=galeria>)

4.1.4. Medio Ambiente (Entorno):

Existe un riesgo de contaminación ambiental en la operación de apilamiento o de instalación de la membrana y sistema de recolección de afluentes de un vertedero, lo que provocaría una posible contaminación al entorno del vertedero.

Por otra parte, el uso intensivo de superficie por estos métodos y su corta vida útil al no procesarse ni descomponerse los desechos, determina la obligada expansión de las estructuras o la construcción de nuevas. Generando una zona de daño permanente.

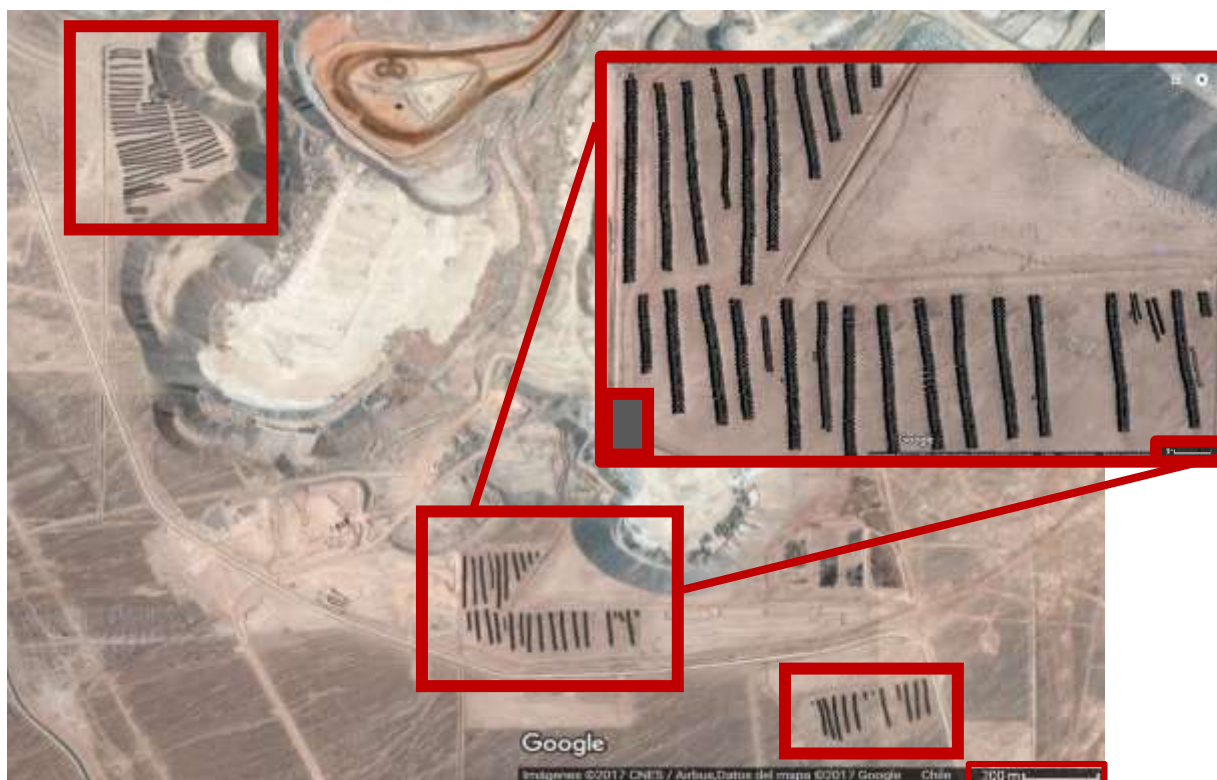


Ilustración 11 Imagen satelital de MEL canchas de neumáticos (Fuente: Google Earth Pro)

4.1.5. Medida:

La recopilación de información sobre los flujos de desperdicios no peligrosos suele ser demasiado general y poco estandarizada, no existe una separación de residuos por lo que la compactación es general, esto dificulta la factibilidad de realizar un tratamiento específico según el tipo de desecho que permita maximizar el beneficio obtenido en los procesos posteriores.

4.1.6. Métodos:

La deposición en vertederos y acumulación en canchas es una metodología poco flexible, que solo pospone la responsabilidad del productor en el manejo de residuos siendo un proceso insostenible en el tiempo. La corta vida útil de las costosas estructuras, obliga a la construcción y reubicación periódica de los vertederos junto con toda la logística que esto implica, como los accesos y caminos.

El gigantismo minero obliga a la industria a buscar soluciones sustentables tanto económica como medio ambientalmente.

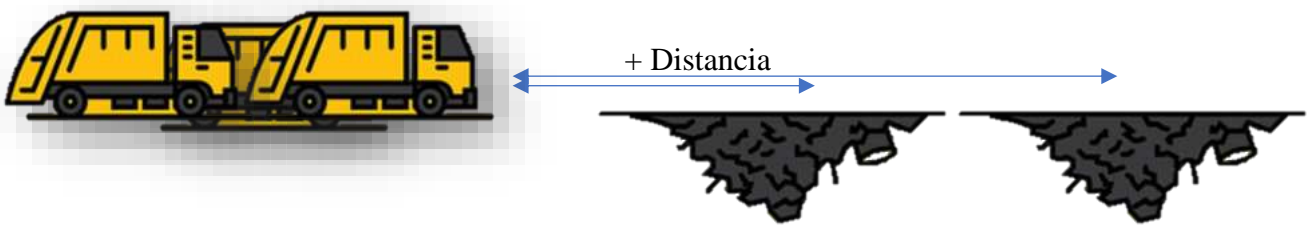


Ilustración 12 Distancia a vertederos (Fuente: propia)

4.2. Vertedero y costos de construcción.

Como ya se ha mencionado en reiteradas ocasiones, los vertederos a diferencia de la creencia popular no son “basurales”. Los vertederos son complejas y costosas estructuras que requieren de una excavación de profundidad superior a los 15 m en minería y áreas muy extensas, lo que dificulta y complejiza la logística involucrada en la construcción y operación.

Los costos de construcción entregados en la siguiente tabla están generalizados y acotados, para un mayor desglose revisar el Anexo C, correspondiente a vertederos. El costo de la obra depende de en gran medida de, la vida útil del terreno, condiciones geomecánicas y los flujos particulares de la faena.

Tabla 4 Costos partida vertedero/relleno sanitario

Ítem	Costo USD
Cobertizo estructural (membrana)	279,455.30
Estructura control de pesaje	95,492.74
Báscula	530,283.04
Estacionamiento y patio de maniobras	72,190.16
Camino perimetral	600,047.98
Cercamiento perimetral	360,837.75
Instalación eléctrica exterior	80,612.98
Barreras contención	55,101.76
Instalación sanitaria exterior	35,030.03
Instalación hidráulica exterior	41,119.26
Preparación macro celdas	10,068,056.88
Container control	24,810.31
Depósito para la captación de lixiviados	59,761.8
Red de captación lixiviados	178,258.43
Pozos	202,617.73
Laguna de evaporación	68,811.75
Total	12,752,487.44

4.3. Costo por metro cúbico de residuo.

Tomando en cuenta un aproximado de 100,000 metros cúbicos en la vida útil del vertedero podemos estimar que el costo por metro cúbico de relleno en inversión es de aproximadamente \$12.75 USD por metro cúbico.

4.4. Costo estimado para cierre por hectárea intervenida.

Se realizó la estimación de un total de **76,000 USD** por hectárea del terreno, cabe mencionar que las hectáreas se refieren a las hectáreas del terreno y no el área intervenida que muchas veces es incierta o difícil de medir. Un porcentaje frecuente del área intervenida de la superficie del terreno es de aproximadamente un 85%.

En el Anexo D se detallan la estimación de cierre de un vertedero.

4.5. Operación de relleno sanitario.

En esta etapa de operación de relleno sanitario o vertedero minero, se desarrollan dos actividades que engloban la operación; el establecimiento de controles de la operación y el establecimiento de controles ambientales.

Los controles de operación se establecen con fin de lograr que la disposición final de los residuos sólidos sea efectuada de la forma más económica y eficiente que permite esta metodología, en tanto que los controles ambientales refieren en cuanto a minimizar los efectos que puedan generarse sobre el entorno de la operación de relleno.

4.6. Ley de responsabilidad Extendida de Productores (REP)

LEY 20.920 que establece el Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje, tiene por objetivo disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje o valoración. Su fin es proteger la vida de las personas y el medio ambiente.

El artículo 3° dicta:

Artículo 3°.- Instrumentos destinados a prevenir la generación de residuos o promover su valorización.

El Ministerio, mediante decreto supremo, regulará los siguientes instrumentos destinados a prevenir la generación de residuos o promover su valorización:

- a) Ecodiseño;
- b) Certificación, rotulación y etiquetado de uno o más productos;
- c) Sistemas de depósito y reembolso;
- d) Mecanismos de separación en origen y recolección selectiva de residuos;
- e) Mecanismos para asegurar un manejo ambientalmente racional de residuos;
- f) Mecanismos para prevenir la generación de residuos, incluyendo medidas para evitar que productos aptos para el uso o consumo se conviertan en residuos.

La ley REP podrá realizar el cobro de elevadas multas alcanzando valores de \$ 8.31 MM USD lo que claramente significa una ventaja al momento de evaluar la planta.

4.7. Ventajas y desventajas de las distintas tecnologías de tratamiento de residuos.

Dentro de las tecnologías discutidas en el tratamiento de desechos no peligrosos y NMFU se resume a continuación las principales ventajas y desventajas de las distintas tecnologías.

4.7.1. Incineración

Hoy en día la incineración sigue siendo uno de los métodos más utilizados para el control de los residuos sólidos. Se presenta un cuadro comparativo entre las posibles ventajas y desventajas del proceso.

Tabla 5 Ventajas y desventajas del proceso de incineración

Ventajas	Desventajas
La reducción volumétrica de sólidos puede alcanzar hasta un 90%	La operación asociada a los incineradores está vinculada con las emisiones a la atmósfera de metales pesados, sustancias orgánicas (dioxinas y furanos), hexaclorobencenos e hidrocarburos poli-aromáticos, éstos últimos derivados de procesos de combustión incompleta, sustancias potencialmente tóxicas y bioacumulables de gran riesgo.
Existen tecnologías disponibles que permiten tener un mayor control de las emisiones liberadas.	Tecnologías de control de emisiones elevan potencialmente los costos asociados.
Tecnologías modernas permiten la recuperación de la energía calorífica generada durante la combustión de los residuos sólidos la cual se puede emplear en la generación de electricidad, calefacción entre otros usos.	Las emisiones de partículas y gases que se generan en este proceso, provocan la contaminación de áreas cercanas a la planta, y en algunos casos, en zonas más alejadas al ser acarreadas por el viento.
Si no existe terreno con el área necesaria disponible para construir un relleno sanitario o vertedero, dentro de una distancia en que resulte económico el transporte de los residuos sólidos desde el centro de producción, un incinerador puede representar el sistema total más económico para el tratamiento de estos	La mala o deficiente operación del proceso conduce a una combustión incompleta de los residuos, con lo que se generan gases tóxicos que son emitidos a la atmósfera

Un incinerador diseñado de manera adecuada es capaz de procesar mezclas variables de residuos y no depende de variaciones climáticas.	Es una tecnología que requiere de altos costos de inversión para la construcción y funcionamiento de una planta, costos prácticamente no recuperables si no se aprovecha la energía generada.
La recuperación de los materiales del residuo de la incineración y del calor del proceso de incineración puede producir ingresos significantes.	

Una de los principales atractivos de este proceso es que logra reducir en hasta un 90% del volumen de los sólidos incinerados, dando a su vez, la oportunidad de recuperar o generar energía durante el proceso.

En contraparte al ser un proceso exotérmico con consumo de oxígeno las emisiones emitidas en la operación no controlada hacen de este un proceso de alto impacto ambiental, teniendo un alza significativa en los costos de funcionamiento del manejo de emisiones en hasta un 20%. También el costo de inversión es alto y llega a ser inviable si no se considera la recuperación de materiales residuos de la incineración y la energía generada.



Ilustración 13 Hornos incineradores (Fuente: Hornos Industriales Ltda.)

4.7.2. Pirólisis

Una de las principales ventajas además de la reducción volumétrica y en tonelaje de los desperdicios sólidos, es la condición de transformar un proceso industrial lineal, en cíclico, disminuyendo los elevados costos de tratamiento de emisiones.

Tabla 6 Ventajas y desventajas pirólisis

Ventajas	Desventajas
Es una tecnología que permite transformar a muchos procesos industriales lineales en cíclicos.	La inversión requerida para la instalación de una planta pirolítica es alta.
No genera gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, los que se producen en la incineración, sino que se generan formas residuales de sustancias como nitrógeno gaseoso y azufre sólido. El cloro y el flúor se reducen a cloruros y fluoruros que se pueden precipitar con calcio.	Nivel de complejidad operacional mayor.
Se maneja todo tipo de material orgánico con alto valor calórico, inclusive mezclas de residuos domésticos e industriales peligrosos.	Poca experiencia a nivel país
Los residuos se transforman en una fuente de energía que en una pequeña proporción mantiene el sistema y el resto se puede utilizar en otras tecnologías complementarias.	
Los residuos se pueden transformar, en algunos casos, en materia prima del proceso.	
Permite tratar los lodos de las plantas de tratamiento y suelos contaminados con hidrocarburos u otros compuestos orgánicos y así ser transformados en ladrillos útiles para el hombre.	
Los plásticos, aceites, disolventes orgánicos, compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos, materiales contaminados con estos productos, se convierten en hidrocarburos ligeros limpios y carbón.	
Puede recuperarse por la utilización de los subproductos, particularmente como combustibles en la generación de vapor y/o electricidad.	

4.7.3. Gasificación

La gasificación consiste en la descomposición térmica de residuos con una cantidad de oxígeno insuficiente, lo cual provoca una combustión incompleta. Se busca obtener un gas de síntesis (que contiene CO, H₂, CH₄, CO₂, entre otros) que puede utilizarse tanto para producción de electricidad, con fines térmicos o para producir biocombustibles líquidos y químicos. El gas debe ser tratado para eliminar compuestos que puedan dañar el equipo utilizado. El subproducto sólido resultante, un tipo de alquitrán, puede aprovecharse para otros fines como construcción de carreteras.

Ventajas	Desventajas
Es una tecnología que permite la reducción de residuos mediante combustión incompleta	Generación de gases que pueden dañar el equipo de no ser tratados.
Se pueden obtener gases de síntesis, utilizados para producción de electricidad, energía térmica y gases para destilación.	Nivel de complejidad operacional alto.
Destilación de gases permite obtener biocombustibles líquidos y químicos. Estos biocombustibles alcanzan un 95% de la eficiencia del combustible normalizado.	Requiere de una alta tasa de alimentación
Capacidad de generar ciclos cerrados al reutilizar todos sus subproductos.	

4.8. Comparación entre tecnologías y aprovechamiento energético de residuos sólidos mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada

En general se manejan tres alternativas, con aprovechamiento energético: la incineración, la gasificación y la pirólisis. Estas tres tecnologías de procesamiento de residuos son tratamientos térmicos, no obstante, presentan importantes variaciones en sus condiciones de operación lo que se refleja a su vez en los productos finales.

La incineración ha sido la más utilizada internacionalmente. Los procesos de gasificación y pirólisis a gran escala con residuos sólidos aún están siendo desarrollados en los países industrializados. Aun así, este trabajo no busca implementar una planta de estas dimensiones.

El proceso de incineración o combustión se define como la descomposición térmica de biomasa, o residuos sólidos municipales en este caso, a altas temperaturas (mayores a 850°C) y en presencia de oxígeno. En la incineración se utiliza oxígeno en exceso para conseguir una combustión completa de los residuos. El fin de la incineración es la reducción de volumen de los sólidos con su consecuente aprovechamiento para la producción de electricidad, vapor o calefacción.

La pirólisis descompone térmicamente los residuos en ausencia total o casi total de oxígeno. Las condiciones de operación varían de acuerdo con los productos que se desee obtener. Entre estos se encuentran gas de síntesis, productos líquidos (aceites de pirólisis y ácidos piro-leñosos) y un sólido carbonoso que puede ser convertido en carbón vegetal o carbón activado. Ocurre a temperaturas entre 200-1100°C.

Por último, la gasificación, consiste en la descomposición térmica de residuos con una cantidad de oxígeno insuficiente, provocando una combustión incompleta. Lo que se busca con esto es la obtención de gases de síntesis los que en un proceso posterior pueden aprovecharse para la producción de energía eléctrica, térmica o para producir biocombustibles líquidos y químicos usando un proceso de destilación gaseosa. El subproducto sólido resultante, un tipo de alquitrán, puede aprovecharse para otros fines como construcción de carreteras. La planta gasificadora requiere de hidrociclones para el filtrado de gases y así evitar emisiones y daños al equipo.

A continuación, se presenta gráficos y tablas comparativas de las distintas tecnologías.

Los primeros gráficos corresponden a un análisis cualitativo radial, en el cual se evaluaron 6 distintas variables. Para que el gráfico pudiese ser más fácilmente interpretado a simple vista, las variables ingresadas reflejan aspectos positivos.

- **Accesibilidad:** Se refiere al costo de inversión necesario, mientras mayor puntuación tiene accesibilidad menor será el costo de inversión requerido.
- **Flexibilidad:** Acorde con los requerimientos de alimentación de cada tecnología, mientras mayor flexibilidad, el equipo requerirá menos preprocesamientos de alimentación.
- **Autosuficiencia energética:** Los equipos de tratamiento térmico generan reacciones exotérmicas por lo que el requisito de energía adicional es mínimo mientras no se traten productos con un alto índice de humedad.
- **Control de emisiones:** Si bien estas tecnologías buscan dar una solución ambiental plausible al vertedero/relleno sanitario, hay emisiones que deben ser controladas por subprocesos que pueden encarecer significativamente la operación. Por lo que a mayor control de emisiones, menor costo de reprocesamiento de emisiones.
- **Simplicidad operacional:** Referente al grado de especialización requerido por el operador de la planta.
- **Subproductos valorables:** Los tres procesos evaluados tienen la capacidad de generar diversos subproductos, algunos de mayor valor o rentabilidad, lo que reduciría o amortiguaría los costos operacionales y/o de inversión.

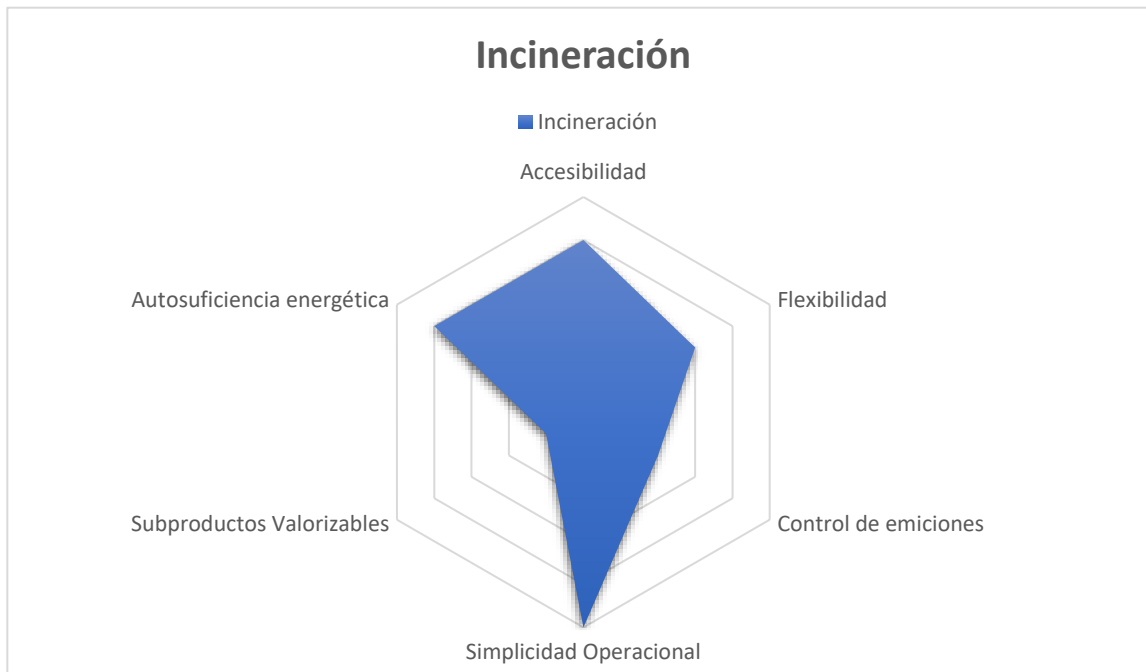


Ilustración 14 Gráfico radial cualitativo Incineración

Como podemos ver en el gráfico anterior, la incineración alcanza la máxima puntuación en simplicidad operacional, sin embargo, está bajo el promedio en subproductos valorizables y control de emisiones lo que castiga los costos operacionales y deja sin amortiguación o ingreso relevante por subproducto.

Lo anterior puede no ser significativo de aprovechar la energía térmica generada en el proceso de lixiviación de pilas, lo que genera un ingreso de un orden de magnitud que desprecia el ingreso por subproductos. Veremos que las tres tecnologías permiten el anexamiento de un sistema de aprovechamiento térmico, por lo que sigue siendo una variable de diferenciación la generación de subproductos rentables.

Otro punto a favor es que su Accesibilidad está por debajo de las otras tecnologías.



Ilustración 15 Gráfico cualitativo radial Pirólisis

La pirólisis presenta un gráfico radial más equilibrado, alcanzando una buena puntuación en la mayoría de las variables, sin embargo es menos accesible, es decir su inversión alcanza un mayor costo, además de tener una mayor complejidad operacional.

Compensa esto con una flexibilidad alta lo que permite disminuir los costos de los procesos previos a la alimentación del sistema, además de generar subproductos valorizables.

La pirólisis no genera emisiones directas al medio ambiente pero su puntaje es castigado debido a la complejidad en el manejo de sus subproductos líquidos.

A continuación, se presenta el gráfico para la gasificación, este sistema presenta la inversión más elevada, sin embargo genera subproductos de mayor valorización y un manejo más eficiente de las emisiones.

Este sistema requiere de profesionales de mayor especialización para poder operar de manera realmente eficiente. Por lo que podría considerarse una tecnología demasiado sofisticada para el objetivo buscado.

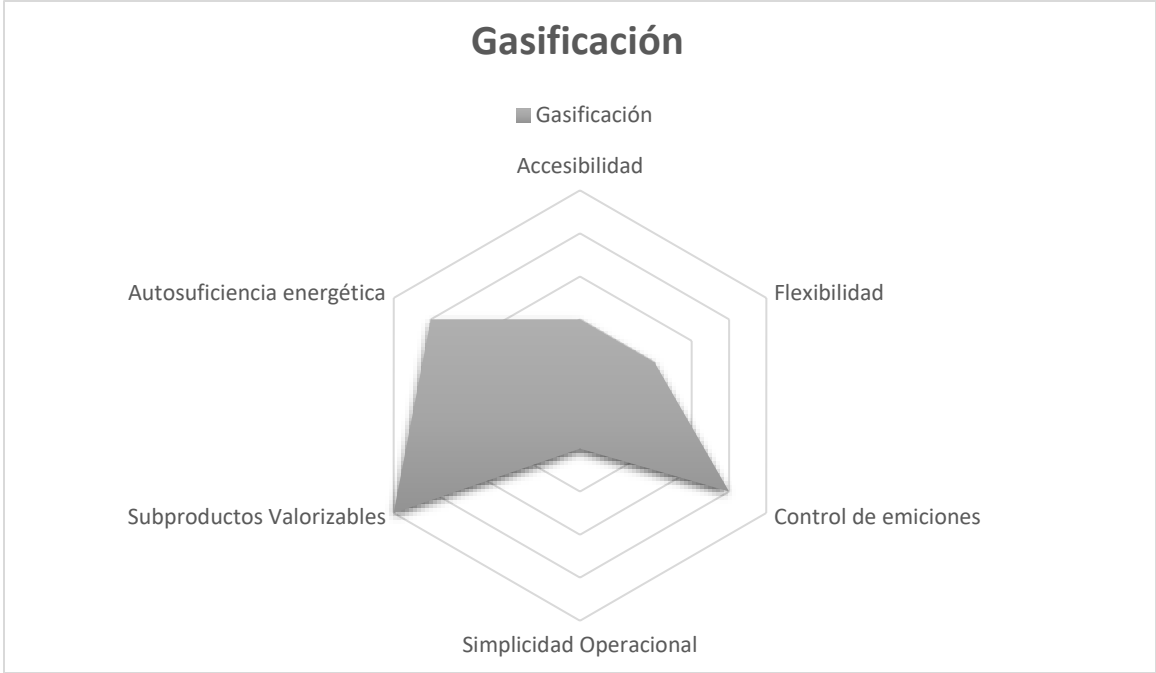


Ilustración 17 Gráfico cualitativo radial Gasificación

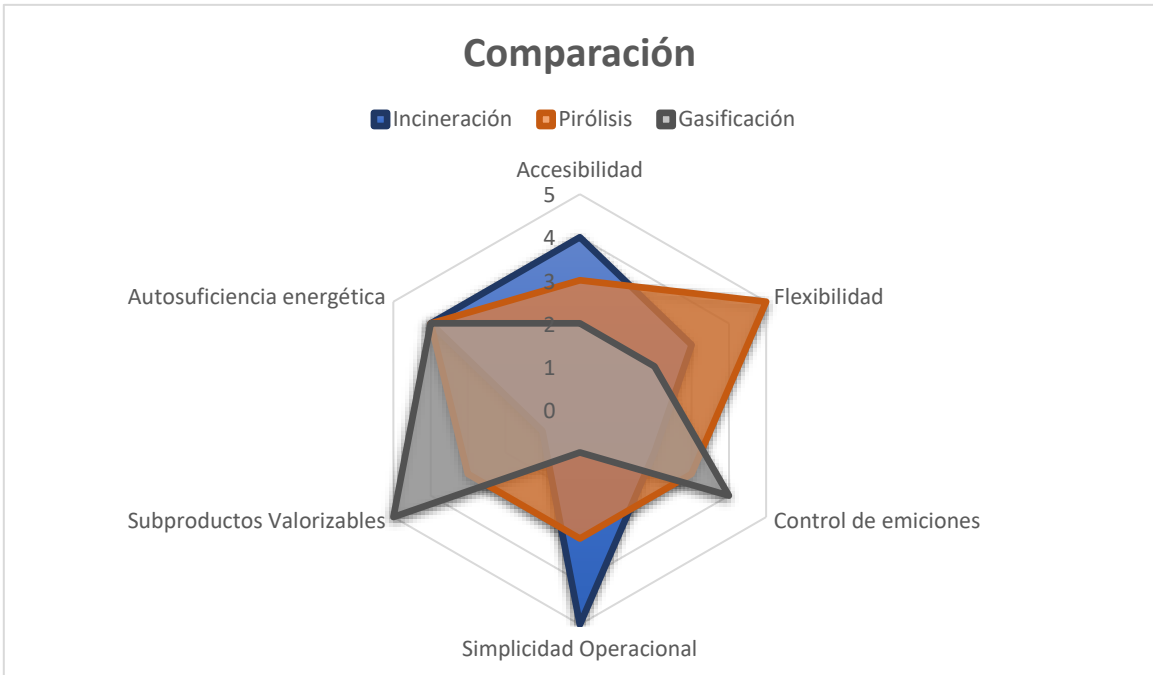


Ilustración 16 Gráfico cualitativo radial comparación entre tecnologías

En el último gráfico radial donde podemos observar los tres sistemas de tratamiento y según lo comentado con anterioridad el proceso de gasificación requiere de maduración para que sea más accesible, además el sistema es demasiado sofisticado para el propósito buscado, por

lo que puede ser la tecnología más eficiente en transformar los desechos en recursos valorables, aun así, el costo de inversión y operación además de la falta de experiencia hacen que se descarte este procedimiento.

Quedando en evaluación principalmente la tecnología más sencilla, pero con menores beneficios directos en contraparte de la tecnología de pirólisis la cual tiene un grado mayor de complejidad, pero sigue siendo viable. Finalmente se resume en la siguiente tabla las características positivas y negativas de las tecnologías mencionadas:

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Incineración	Reducción de volumen	Alta inversión inicial
	Emisiones controladas	Costos elevados para evitar contaminación por emisiones
	Aprovechamiento de energía calórica para otros procesos	Posible generación de productos nocivos para la salud
	Alternativa a rellenos sanitarios	Problemas con comunidades cercanas
	Relativamente silencioso e inodoro (si se toman las medidas preventivas)	Posibles conflictos con programas de reducción de emisiones Requieren de más energía para tratar residuos con altos porcentajes de humedad
Pirólisis	Aprovechamiento de subproductos en otros procesos	Alta inversión inicial
	Permite generar productos específicos dependientes de las condiciones de operación	Operación más compleja para evitar generar productos no deseados
	Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados, y azufrados peligrosos	Poca experiencia en plantas de gran escala
	Facilidad de manejo de productos finales (a excepción de productos líquidos)	Requiere personal especializado
Gasificación	Obtención de gas de síntesis con varios usos (producción de electricidad, uso como combustible, producción de una alta gama de productos químicos)	Complejidad operacional
	Facilidad de manejo de los productos obtenidos	Experiencias a gran escala limitadas
	Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados, y azufrados peligrosos	Utilización de recursos preferiblemente destinados a reciclaje
		Requiere de más energía para alta humedad presente

4.9. Análisis de NMFU

El principal problema que enfrenta el tratamiento pirolítico de NMFU es que para ser utilizados como alimentación en la generación de biodiesel se necesita una etapa previa de chipeo del neumático, lo cual representa diversas dificultades debido a la dureza del material y a su estructura interna, como lo es el talón de acero, que debe ser previamente retirado.

Lo anterior genera elevados costos de inversión en las etapas previas a la pirolización del caucho, se requiere de herramientas de alta gama para el “grinding” del neumático.

Otro problema que surge es que los equipos tienen que funcionar a una capacidad mínima por la baja tasa de generación de neumáticos en una faena, esto genera una alimentación continua por unos 5 años después entrando en déficit. Una solución a este problema sería contar con una planta móvil que pudiese trasladarse entre faenas, o contar con una planta capaz de tratar residuos sólidos de diversos tipos junto con NMFU.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

La gestión integral de residuos es un tema en el cual se ha venido trabajando intensamente en los últimos años. La importancia que tiene la adecuada gestión de estos, en los efectos en la salud, en el ambiente, además del impacto socioeconómico, provoca que sea uno de los temas transversales a nivel mundial.

La gran cantidad de residuos que no están siendo separados y valorizados promueve el que se deban considerar otras opciones para su tratamiento antes de ser dispuestos en los rellenos sanitarios.

Los tratamientos térmicos de avanzada deben ser utilizados como una medida de apoyo para la gestión integral de residuos y no como un fin en sí. Dentro de la valorización de residuos se debe promover la recuperación de materiales reciclables antes que el aprovechamiento energético de estos. Los componentes con mayor capacidad calórica son los materiales orgánicos como madera proveniente de los pallets y embalajes, restos de comida con bajo porcentaje de humedad, papel, cartón, plásticos, entre otros. El vidrio y los metales son materiales no deseables en este tipo de tratamientos. Esto es algo que se debe tomar muy en cuenta al llevar a cabo una decisión de la planta de tratamiento térmico.

Actualmente el porcentaje de recuperación de materiales reciclables es muy bajo, y todos estos están llegando a los rellenos sanitarios, lo cual no sólo acarrea una pérdida de oportunidad de aprovecharlos en procesos productivos, sino que también están reduciendo el espacio en dicho relleno y genera metano (gas de efecto invernadero más potente que el dióxido de carbono) durante la descomposición de los residuos.

La minería debe mejorar a cabalidad en su gestión de residuos sólidos. En diversas áreas se han logrado avances, no obstante, siguen existiendo muchos campos por optimizar. Se debe trabajar fuertemente en estandarizar la separación de los residuos en su fuente para evitar que materiales valorizables vayan a parar a los rellenos sanitarios.

Los altos costos de construcción y operación sumados a los costos de orden de cierre técnico y combinados a la corta vida útil. Genera inevitablemente problemas al momento de perpetuar esta metodología en una industria donde los costos de transporte y espacio disponible para la ubicación de vertederos no abunda. Esto causa que se valoren otras opciones de tratamiento. Es en este contexto es donde han tomado auge los tratamientos térmicos de tecnología avanzada, con todas sus implicaciones.

La instalación de una planta de tratamiento térmico del tipo pirolizador con una operación y control eficiente que pueda tratar 30 toneladas diarias de residuos, lo cual es una planta de tamaño mediano, permitirá reducir en un 10% el flujo anual de un vertedero lo que equivale a un \$1.3 MM USD por año. Si se aprovecha además de usar la energía térmica en calentar el lixivante para el riego de pilas permanentes de sulfuros a 70° con un flujo de 1200 m³/hora

Lo que se refleja en un aumento en la recuperación debido al aumento de la cinética de extracción en un mismo ciclo de tiempo de por lo menos 2 puntos. Hace que el “elevado costo de inversión” no sea un problema.

Por último, en temas de tratamientos de residuos e impacto ambiental, es vital que se propicie una discusión transparente sobre el tema, tomando en cuenta las potenciales ventajas y desventajas que estas puedan tener para la industria en todo contexto.

CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA

1. Mancheno, Myriam (2016) Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos por medio de pirólisis.
2. Aravena Palma (2016). Estudio de pirólisis catalítica de desechos provenientes del caucho. Universidad de Chile.
3. S. Rapagnà (1989) Catalytic gasification of biomass to produce hydrogen rich gas. P.U. Foscolo.
4. Youngsan Ju, Chang-Ha Lee (2017). Evaluation of the energy efficiency of the shell coal gasification process by coal type.
5. J.-F Wagner, , C Schnatmeyer . Test field study of different cover sealing systems for industrial dumps and polluted sites *Applied Clay Science, Volume 21, Issues 1–2, April 2002, Pages 99-116.*
6. Díaz González, Estefanía (2016). Diseño óptimo de vertederos industriales.
7. Peter Tom Jones (2013) The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review.
8. Joakim Krook. Landfill mining: A critical review of two decades of research.
9. Arturo Steinvorth (2014). Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada.
10. CEARS (2014). Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos Región de Valparaíso

CAPÍTULO 7 ANEXOS

7.1. Anexo A: Contexto Empresa

Hexagon es una empresa enfocada en tecnologías de medición industrial, la cual se ha expandido a soluciones geoespaciales y software que generan sinergias, para de esta forma establecerse como líder mundial en soluciones con tecnologías de información. La cual está presente en 46 países y cuenta con 16.000 empleados.

Además, es una empresa enfocada en la innovación y desarrollo, invirtiendo el 11% de sus ventas en esta área y contando con más de 3.400 empleados y 3.200 patentes.



Ilustración 18 Enfoque principal Hexagon

7.1.1. Visión

En Hexagon se aspira a desempeñar un rol de líderes en el esfuerzo para resolver los desafíos que enfrenta nuestro mundo, proporcionando tecnologías de la información innovadoras que hacen un impacto positivo y duradero.

7.1.2. Misión

Hexagon está dedicada a ofrecer información útil a través de tecnologías que permiten a los clientes cambiar de forma inteligente a través de los diversos pasajes de la industria.

7.1.3. Sectores de negocio

Hexagon se enfoca en dos grandes áreas de negocio, las soluciones geoespaciales y para empresas industriales, llegando a los distintos mercados por uno u otro aspecto. El resumen de industrias en las cuales se encuentran soluciones de esta empresa, se encuentran en la ilustración 40.

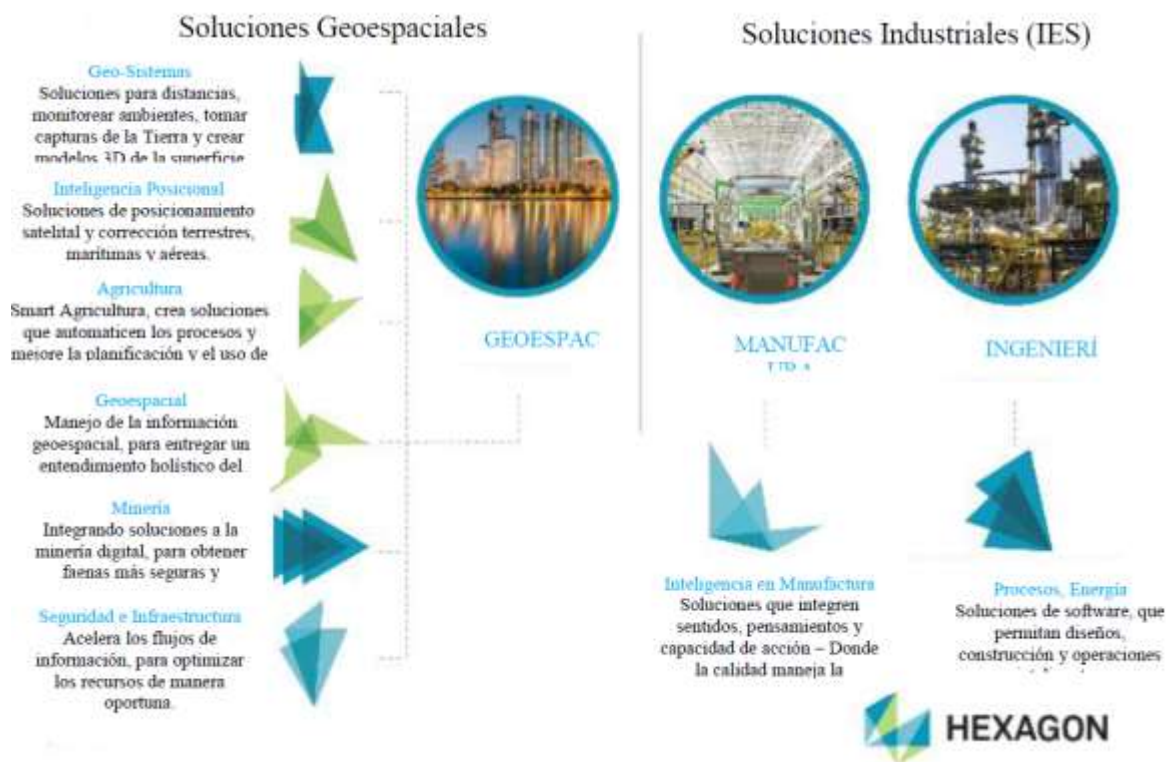


Ilustración 19 Sectores negocios - Hexagon (Fuente: presentación corporativa)

En la siguiente ilustración se encuentran los ingresos por ventas que ha tenido la empresa desde el año 2000, en el cual se comenzó con la estrategia de negocios actual, llegando a su record de ventas el año 2015 alcanzado los 3.000 millones de Euros y una utilidad de un 22,8% aproximadamente. Además, en el mismo grafico se puede ver la transición al nuevo sector de negocios de Hexagon y como fueron aportando al ingreso neto anual.

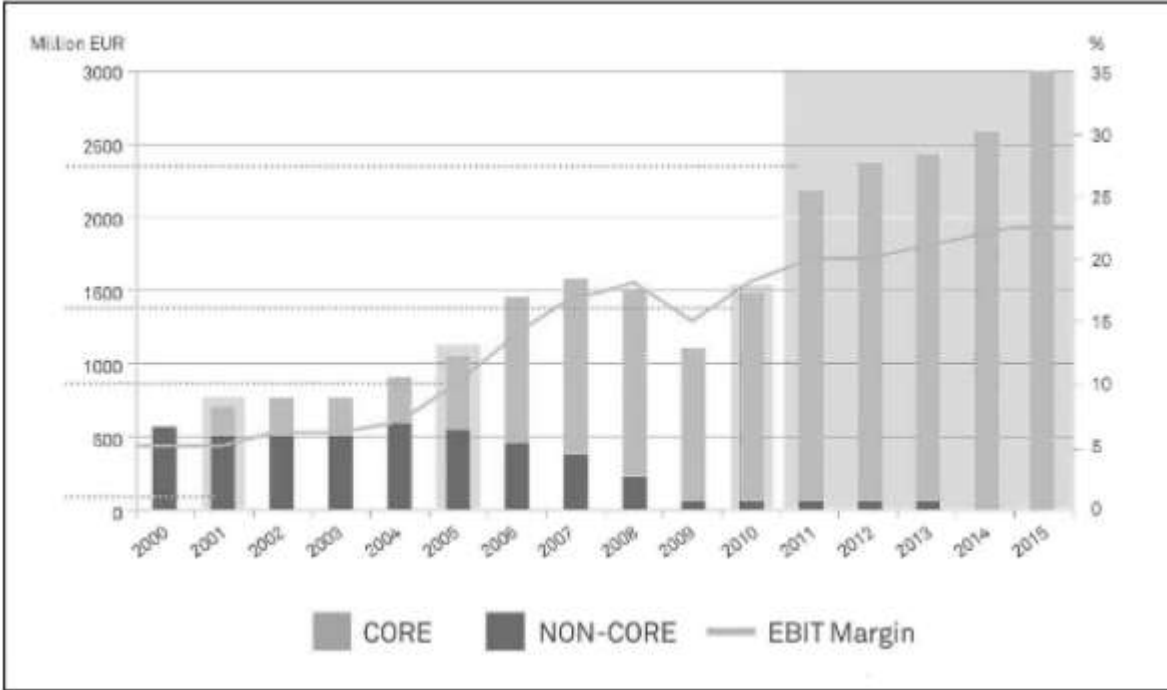


Ilustración 20 Ventas y márgenes anuales de Hexagon (Fuente: Presentación corporativa)

Ahora, también es relevante observar como contribuye cada una de las grandes áreas de negocios en la empresa, esto se puede observar en la ilustración a continuación:

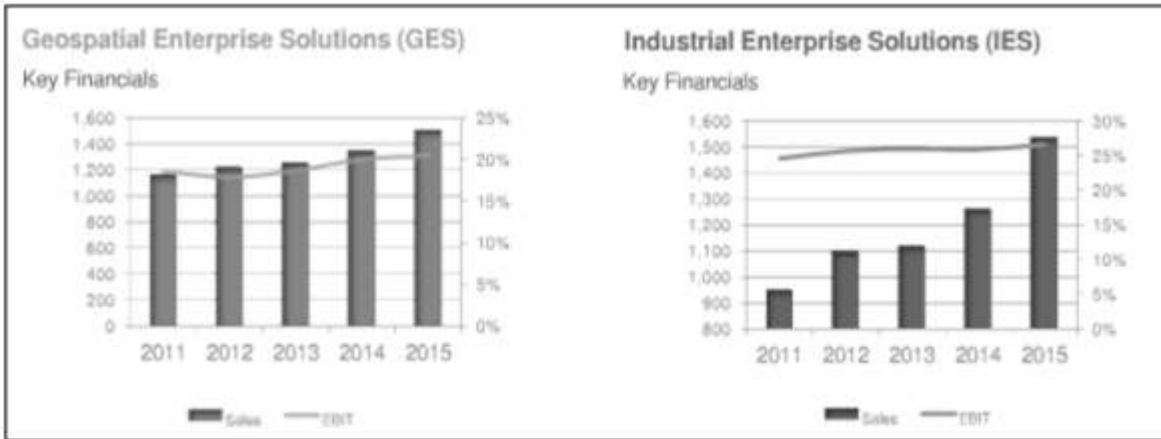


Ilustración 21 Ingreso por área de negocios (Fuente: Presentación corporativa)

En la Ilustración anterior, la situación de la izquierda se explica por un fuerte desarrollo en Europa Occidental y América del Norte, sumado a las nuevas iniciativas y productos geoespaciales de Leica. Por su parte el grafico de la derecha se debe a un desarrollo en la inteligencia en las industrias de automovilismo, aeroespacial y electrónica, principalmente.

En el ámbito minero, Hexagon se ha posicionado como una de las grandes empresas colaboradoras de tecnologías a la industria, llegando al segundo lugar del ranking realizado por Mining Journal, en donde se evaluaron más de 100 parámetros y proveedores desde la exploración hasta el procesamiento de mineral. La lista completa se puede observar en la siguiente Tabla.

Tabla 7 Ranking empresas líderes en tecnología minera 2015

Mining technology supply leaders 2015				
Major software/hardware suppliers to miners: SAP, IBM, Microsoft, Oracle, Autodesk, Pitney Bowes				
Mining/mineral processing equipment manufacturers also supplying technology: Atlas Copco, Caterpillar, Sandvik, Outotec, Joy Global, Boart Longyear, Komatsu*, Hitachi**				
Leading dedicated technology suppliers to the mining/metals industry (including exploration)				
	Company	Headquartered	Principal mining technology business/s	Public/private
1	ABB/ABB Ventyx	Switzerland	Monitoring, control and automation systems; software	Public
2	Hexagon/Hexagon Mining	Sweden	Software; monitoring and control systems	Public
3	Glencore Technology	Australia	Develops, markets and supports technologies for mineral processing/metals smelting and refining	Public
4	Dassault Systemes	France	Software	Private
5	Siemens	Germany	Industrial process control technologies	Public
6	Rajant Corporation	USA	Communications technology/software	Private
7	Trimble Navigation	USA	Surveying/communication technologies; software	Public
8	Honeywell	USA	Process control/automation technologies	Public
9	Schneider Electric	France	Plant monitoring/automation technologies	Public
10	Bentley Systems	USA	Software	Private
11	Becker Mining Systems	Germany	Communications technology/software	Private
12	Modular Mining Systems	USA	Software/monitoring, control and automation systems	Public (part of Komatsu)
13	Endress+Hauser	Germany	Instrumentation/monitoring and control technologies	Private
14	Mapttek	Australia	Software; surveying technology	Private
15	Mine Site Technologies	Australia	Communications technology/software	Private
16	Krohne Group	Germany	Industrial process control technologies	Private (KROHNE Messtechnik is public-listed entity)
17	Thermo Fisher Scientific	USA	Elemental analysis technologies	Public
18	Immersive Technologies	Australia	Training simulation technologies	Private
19	GroundProbe	Australia	Surveying/communication technologies; software	Private
20	Rockwell Automation	USA	Plant monitoring/automation technologies	Public
21	Remote Control Technologies	Australia	Remote control, machine guidance, machine monitoring technologies	Private
22	Downer Group	Australia	Software (Otraco, Snowden)	Public
23	Wenco	Canada	Software/monitoring, control and automation systems	Public (part of Hitachi)
24	Tiefenbach Control Systems	Germany	Automation/control technologies	Private
25	TOMRA Sorting Solutions	Norway	Mineral sorting technologies	Public
26	Micromine	Australia	Software	Private
27	Davey Bickford	France	Mine blast initiation technologies	Private
28	Cavotec	Switzerland	Remote control, machine guidance, machine monitoring technologies	Private
29	ARANZ Geo	New Zealand	Software	Private
30	acQuire	Australia	Software	Private

*Komatsu includes Modular Mining Systems sales. **Hitachi includes Wenco Mining Systems sales

7.2. Anexo B Canchas NMFU - MEL BHP Billiton



Ilustración 23 Canchas neumáticos MEL (Fuente: Google Earth Pro)



Ilustración 22 Zoom a cancha 1 (Fuente: Google Earth Pro)



Ilustración 24 Canchas NMFU numeradas (Fuente: Google Earth Pro)

Tabla 8 Tamaño canchas NMFU

Cancha	Perímetro [m]	Área [m x m]
1	1,485	119,910
2	1,781	113,366
3	1,090	60,079
4	1,352	92,890
Total	5,708	386,245

7.3. Anexo C

7.4. Anexo D Estimación costos cierre vertederos

Este anexo corresponde a un estudio realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María en el marco del Plan de Manejo Integral de Residuos.

A continuación, se realiza una reseña de las obras principales requeridas para el cierre de un vertedero, dentro de las que se consideran algunas variaciones que pudiesen originarse según el caso. Considerando variaciones por condiciones locales específicas de acceso y/o del terreno y una estimación desglosada de los costos involucrados.

Se reafirma que, para obtener un costo más preciso sobre el cierre de un vertedero, se requiere de un estudio de ingeniería particular.

En las estimaciones tampoco se han considerado eventuales inversiones existentes y que ya se podrían haber realizado anteriormente (por ej. cobertura, cerco, monitoreos), y por ende la estimación busca tomar un carácter conservador.

Las estimaciones entregadas pretenden entregar una referencia sobre los costos de inversión que serán necesarios realizar.

7.4.1. Operación de cierre de vertedero

Se indica las obras para el cierre de un vertedero en orden cronológico de las etapas:

- Trabajos Previos:
 - Levantamiento Topográfico Previo;
 - Instalación de Faenas;
 - Limpieza del Entorno.

- Cierre Perimetral
 - Adquisición e Instalación de Cierre Perimetral Proyectado;
 - Adquisición e Instalación Portón de Acceso

- Movimiento Masivo de Residuos y Suelos
 - Movimiento Masivo de Residuos;
 - Adquisición, Disposición y Colocación de Suelo Arcilloso para Cobertura Final,
Esta partida se refiere a la provisión y disposición del material de cobertura final sobre los residuos ya perfilados, alcanzando niveles de permeabilidad especificados en el proyecto;
 - Adquisición, Disposición y Colocación Cobertura Vegetal.

- Obras Generales
 - Construcción de Cámara de Descarga;
Esta partida se refiere a la construcción de dos cámaras de descarga de aguas lluvias que permitirán el monitoreo de estas aguas en eventos de precipitación;
 - Construcción de Pozos de Monitoreo de Aguas superficiales;
 - Construcción de Chimeneas de captación y de ventilación de Biogás;
 - Fabricación de Pozos de Succión para líquidos;
 - Fabricación de Pozos de Inyección;
 - Mejoramiento de Caminos de Acceso Principal e Interiores;
 - Habilitación de una Franja Cortafuegos alrededor del vertedero;

- Piscinas de Lixiviados
 - Construcción de Piscina de Lixiviados, lo que incluye:
 - Excavación Masiva para genera el volumen de las piscinas;
 - Nivelación y Compactación;
 - Adquisición e Instalación de Geomembrana de PEAD para Impermeabilización Basal,
 - Adquisición e Instalación de Pieza Especial de PEAD
 - Drenes de Captación de Lixiviados, lo que incluye:
 - Excavación en Zanja,
 - Adquisición e Instalación de Geomembrana de PEAD,
 - Adquisición e Instalación de Geotextil Agujado para protección y separación,
 - Adquisición e Instalación de Tubería de PEAD perforada para Drenaje,
 - Adquisición y Colocación de Grava Seleccionada para Drenaje,
 - Adquisición e Instalación de Tubería de PEAD Lisa para Conducción.

- Excavación en Zanja perimetral
 - Adquisición e Instalación de Geomembrana de PEAD,
 - Adquisición e Instalación de Geotextil Agujado para Protección y Separación,
 - Adquisición e Instalación de Tubería de PEAD perforada para Drenaje,
 - Adquisición y Colocación de Grava Seleccionada para Drenaje,
 - Adquisición e Instalación de Tubería de PEAD Lisa para Conducción.

- Canales de Aguas Lluvias, lo que incluye:
 - Mejoramiento de Canales de Manejo de Aguas Lluvias,
 - Excavación y Revestimiento de canales de manejo de Aguas Lluvia perimetral.

- Otros
 - Control de Material Particulado.
 - Control de Vectores.

- Entrega de las Obras
 - Limpieza y Desmovilización.
 - Recepción final de las Obras

7.4.2. Desglose de los costos de cierre

En el gráfico siguiente se presenta una distribución típica de los costos de un cierre de un vertedero representativo (aprox. 31 hectáreas de superficie) sin considerar costos como gastos generales (aprox. un 20%), utilidades (aprox. un 12%) e IVA (un 19%):

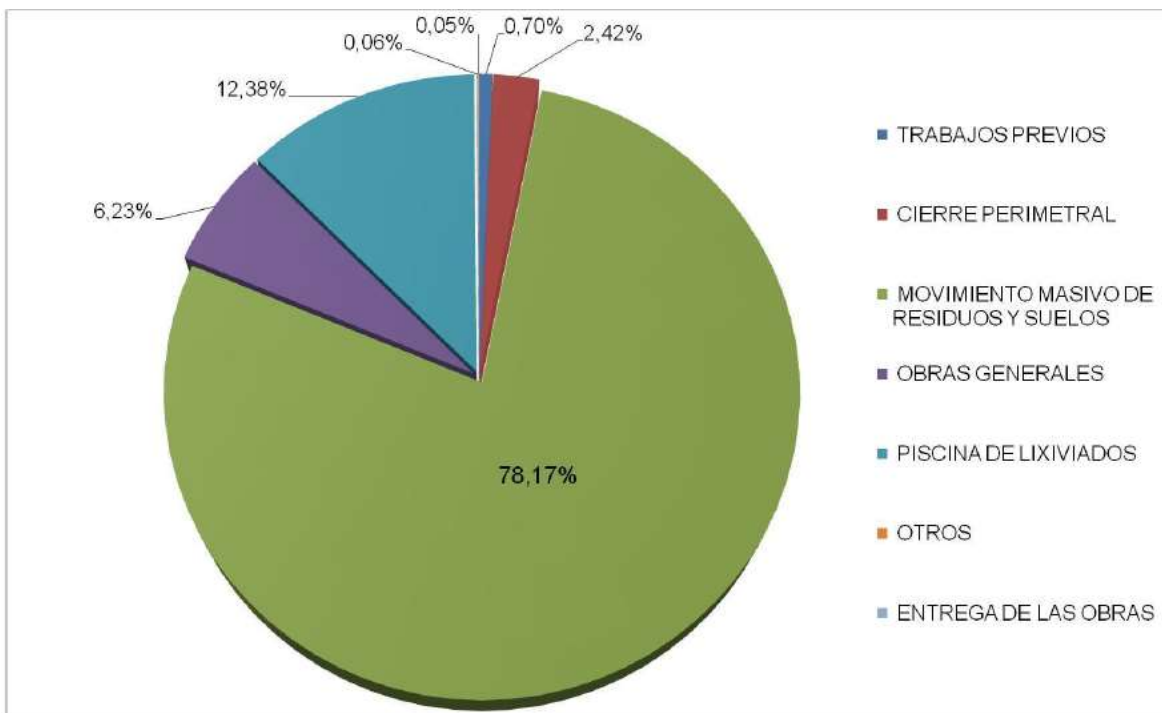


Ilustración 25 gráfico de desglose de costos cierre (Fuente: Plan de manejo integral de residuos UTFSM)

Adicionalmente se pueden originar gastos administrativos como permisos sectoriales, Inspección técnica y movilización y alimentación de ITO tanto como apoyo profesional en preparación y evaluación de bases de licitación de al menos 20,000 USD.

Las estimaciones no consideran el seguimiento y control del proyecto de cierre durante 20 años, según lo establecido en artículo 55 del Dto 189/09 Minsal, que deberá ser cargo del titular del proyecto.