



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

ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE PLANTA TÉRMICA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS
SÓLIDOS MUNICIPALES PARA SANTIAGO DE CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ARMANDO TOMÁS CID COFFRÉ

PROFESOR GUÍA:
LUIS VARGAS DÍAZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CAROL SALDIAS ROJAS
ARTURO OTTO VILLA

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Eléctrico
POR: Armando Tomás Cid Coffré
FECHA: 23/10/2016
PROFESOR GUÍA: Luis Vargas Díaz

ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE PLANTA TÉRMICA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES PARA SANTIAGO DE CHILE

La generación de residuos ha estado ligada desde siempre a las actividades productivas humanas. El aumento en la calidad de vida, crecimiento de la población y estilo de vida, influyen directamente en la cantidad de basura producida. Sin embargo, la ciudadanía exige que las actividades productivas se desarrollen de forma sustentable tal que cumplan con las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras. Es por ello que la percepción de los residuos ha cambiado desde la visión convencional de materia inutilizable a material valorizable e insumo para diversos usos que permite la liberación de otros recursos escasos.

Este trabajo examina la situación del mercado de residuos en países desarrollados para concluir que Chile enfrenta un desafío importante en el manejo de residuos toda vez que el costo de disposición final es sustancialmente menor que el promedio de los países desarrollados, al mismo tiempo que la tasa de generación de residuos sólidos municipales (RSM) es creciente. En particular, la región Metropolitana presenta la mayor generación de RSM del país con 7.690 [ton/día]. Al considerar que a mediano plazo se espera el cierre de dos rellenos sanitarios en la región, se vislumbra la necesidad de implementar nuevas formas de tratamiento y valorización de los residuos.

En este sentido, la valorización térmica de residuos sólidos municipales con recuperación de energía se presenta como una opción de tratamiento interesante debido a sus ventajas frente a la disposición final. Estas tecnologías forman parte de las estrategias de manejo de residuos en los países desarrollados para disminuir el volumen de desechos eliminados y frenar el crecimiento de sitios de disposición final. Además, estas se alinean con una visión sustentable de tratamiento de residuos ya que generan energía renovable compensando las emisiones desde combustibles fósiles a la vez que aminoran la generación de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios.

Una amplia revisión bibliográfica permite definir supuestos sobre los factores relevantes a considerar en el diseño y evaluación de plantas de valorización térmica. Se definen dos casos de estudio; el Caso 1 corresponde a una planta de gasificación por antorcha de plasma DC con arco no transferido de capacidad 200 [ton/día] y potencia firme 5,3 [MW] ubicada junto a la actual central Renca. El Caso 2 estudia una planta de incineración de lecho fluidizado con capacidad de 1100 [ton/día] y potencia firme 31,9 [MW] construida junto al relleno sanitario Santa Marta.

En el capítulo cuatro se realiza una evaluación económica de los casos antes definidos, con una tasa de descuento de flujos privada de 10% anual y periodo de evaluación de 20 años. Se obtiene que la planta del Caso 1 posee un VAN privado negativo igual a -\$23.064.243 [USD] mientras que el Caso 2 es rentable con un VAN de \$90.878.309[USD]. Posteriormente, la evaluación social determina que tanto el Caso 1 como el Caso 2 son socialmente rentables para luego comentar sobre los beneficios y costos sociales de ambas tecnologías.

Abstract

The generation of waste has been always linked to human productive activities. The quality of life, population growth and lifestyles directly affect the amount of garbage produced. Nevertheless, people demand production activities to be sustainable in order to satisfy needs of the present without compromising future generations opportunities. This is why the perception of waste has changed from traditional point of view of useless garbage to valuable material that can be use as input for several activities relieving other scarce resources.

This work explores the situation of waste markets in developed countries so as to draw conclusions that Chile is facing a challenge. There are substantially lower gate fees at the same time that municipal solid waste generation rate is increasing. The Metropolitan region has the greater generation of waste with 7.690 [ton/day]. It should be noted that two landfills will be closed in the medium term. Accordingly, there will be a need for new ways of waste treatment and valorization.

In this sense, thermal valorization of waste with energy recovery offers an interesting treatment option due to its advantages when compared to final disposition as well as the capability of recover energy and valuable materials. These technologies are part of the waste management strategies in developed countries in order to reduce waste volume and stop landfill's growth. In addition, they are aligned with the view of sustainable waste treatment since they generate renewable energy by offsetting the need for energy from fossil sources and reduce methane generation from landfills.

An extensive bibliography review leads to assumptions about relevant factors to be considered in the plant design and evaluation process. Based on these assumptions, two study cases are defined: the first case analyzes a thermal plasma gasification plant with non-transferred plasma system. Its treatment capacity is 200 [ton/day], the installed power is 5,3 [MW] and it is located next to Renca thermal plant. The second case is a fluidized bed incinerator with a treatment capacity of 1100 [ton/day] and installed power 31,9 [MW] constructed near to Santa Marta landfill.

The last chapter contains the economic evaluation using a private discount rate of 10% and 20 years evaluation period. It is found that the Case 1 has a negative net present value equal to -\$23.064.243 [USD] while the Case 2 is highly profitable with a net present value of \$90.878.309[USD]. Finally, the social evaluation determines that both cases are socially profitable and then comments about social benefits and social cost are made.

Agradecimientos

Agradezco al profesor Luis Vargas por confiar en mí y por su inmejorable disposición durante el desarrollo de esta memoria.

A Carol Saldías por su permanente guía y consejos que me permitieron entender la importancia de este tema y sus impactos en la sociedad.

Al profesor Arturo Otto, gracias por compartir su valiosísima experiencia en desarrollo de proyectos eléctricos.

A los profesores Nelson Morales y Juan Carlos Elicer por permitirme utilizar sus apuntes de clases esenciales para ciertos cálculos y suposiciones.

Gracias a Paula Estévez y su equipo del Ministerio de Energía por recibirnos y hacernos parte de la problemática respecto al manejo de residuos en el país.

Al Sensei de la selección de Judo de la Universidad de Chile, Carlos González, por su apoyo y enseñanzas que me han ayudado en muchas facetas de mi vida. A todo el equipo de Judo por permitirme ser su capitán; ha sido un honor y un privilegio entrenar con ustedes.

Mis compañeros de plan común y de eléctrica, por las mil batallas que pasamos juntos.

Por último, a mi familia, fuerza fundamental de todos mis emprendimientos y logros.

Tabla de contenido

Índice de tablas	vi
Índice de ilustraciones	viii
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Contexto	3
2.2. Valorización térmica de RSM en el mundo	4
2.2.1. Valorización térmica de RSM en Estados Unidos	7
2.2.2. Valorización térmica de RSM en Europa	9
2.2.3. Valorización térmica de RSM en Corea del Sur	12
2.3. Gestión de residuos en Chile	13
2.3.1. Cuantificación y caracterización de residuos en Chile	13
2.3.2. Disposición final en Chile	19
2.3.3. Responsabilidad extendida del productor	22
2.4. Emisiones en rellenos sanitarios	23
2.5. Valorización de residuos	24
2.6. Tecnologías térmicas de valorización de RSM	25
2.6.1. Incineración	27
2.6.2. Gasificación	31
2.7. Consideraciones de sistemas térmicos	36
2.7.1. Primera ley de la termodinámica	36
2.7.2. Combustión	37
2.7.3. Transferencia de calor	38
2.7.4. Ciclo de Rankine	40
2.7.5. Corrosión	41
2.7.6. Pretratamiento de los residuos	41
2.8. Aspectos regulatorios y medioambientales	42
2.8.1. Emisiones atmosféricas	43
2.8.2. Ruido	50
2.8.3. Normativa medioambiental	51
2.8.4. Normativa adicional	51
3. Análisis técnico	53

3.1.	Descripción general y supuestos.....	53
3.1.1.	Poder calorífico.....	53
3.1.2.	Tasas de cambio.....	53
3.2.	Tecnología óptima para Santiago	54
3.3.	Ubicación	55
3.4.	Consideraciones de diseño.....	58
3.4.1.	Antorcha de plasma DC de arco no transferido.....	58
3.4.2.	Caldera.....	59
3.4.3.	Turbina de vapor.....	59
3.4.4.	Tratamiento del agua	60
3.4.5.	Compresor de aire y unidad ASU.....	60
3.4.6.	Dimensionamiento.....	61
3.5.	Generación de energía eléctrica.....	61
3.5.1.	Turbogenerador	62
3.5.2.	Subestación.....	64
3.6.	Malla de tierra.....	68
3.7.	Emisiones atmosféricas.....	72
3.7.1.	Fase de construcción.....	72
3.7.2.	Fase de operación	76
3.7.3.	Venta de bonos de carbono.....	78
3.8.	Recuperación de materiales	79
3.9.	Cronograma general.....	80
4.	Evaluación del proyecto.....	81
4.1.	Evaluación privada	81
4.1.1.	Estimación de costos	81
4.1.2.	Estimación de ingresos	83
4.1.3.	Flujo de caja	84
4.1.4.	Análisis de sensibilidad	84
4.2.	Evaluación social	87
4.2.1.	Costos sociales.....	87
4.2.2.	Beneficios sociales	90
4.2.3.	Indicadores de inversión de la evaluación social.....	96
4.2.4.	Comentarios sobre la evaluación social	97
5.	Conclusión.....	99
6.	Glosario	102
7.	Bibliografía.....	103

Índice de tablas

Tabla 1: Poder calorífico combustibles. Fuente: Adaptado de [4].	6
Tabla 2: Poder calorífico de las fracciones de los residuos sólidos. Fuente: Adaptado de [4].	6
Tabla 3: Emisiones tecnologías de generación. Fuente: Adaptado de [33].	7
Tabla 4: Comparación principales contaminantes atmosféricos en EE.UU. Fuente: Adaptado de [].	8
Tabla 5: Estimación de costo de disposición final en países europeos. Fuente: www.eea.europa.eu.	10
Tabla 6: Valores límite de emisión para incineración en la Unión Europea. Fuente: [26].	12
Tabla 7: Caracterización de RSM en Chile 2009. Fuente [17].	16
Tabla 8: Comunas con mayor generación de RSM en la Región Metropolitana.	18
Tabla 9: Generación de RSM en el radio urbano de Santiago.	18
Tabla 10: Caracterización de RSM, relleno sanitario Loma los colorados 2009. Fuente [23].	19
Tabla 11: Componentes del biogás de rellenos sanitarios. Fuente: Adaptado de [].	20
Tabla 12: Gasto municipal en recolección y transpondré de RSM 2015.	22
Tabla 13: Datos sobre recolección, transporte y disposición Providencia.	22
Tabla 14: Potencial de generación eléctrica tecnologías de valorización de RSM. Fuente [28].	27
Tabla 15: Estimación de emisiones de plantas de incineración de RSM. Fuente [28].	28
Tabla 16: Estimación de emisiones para gasificación de residuos. Fuente: [28].	33
Tabla 17: Estimación de emisiones para plantas de pirólisis de residuos. Fuente [28].	34
Tabla 18: Valores límites de emisión para la incineración en Chile. Fuente [43].	44
Tabla 19: Contenido de oxígeno de referencia en los gases de emisión. Fuente: [43].	44
Tabla 20: Equivalencia en CO ₂ e de GEI. Fuente: ProChile [].	49
Tabla 21: Descripción de Zonas territoriales según Decreto 39.	50
Tabla 22: Niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos según decreto 38.	50
Tabla 23: Poder calorífico RSM Región Metropolitana.	53
Tabla 24: Tasas de cambio de unidades monetarias.	53
Tabla 25: Características principales para los casos de estudio.	55
Tabla 26: Comuna, vía de acceso y velocidad el viento en ubicaciones propuestas.	58
Tabla 27: Insumos y características reactor integrado de 100 [Ton/día].	58
Tabla 28: Estimación de insumos para Caso 2. Fuente: DIA Planta de biomasa Horcones.	59
Tabla 29: Características técnicas turbina de vapor. Fuente: [].	60
Tabla 30 Dimensión de edificios Caso 2.	61
Tabla 31: Costos por adquisición de terreno.	61
Tabla 32: Eficiencia eléctrica Caso 1 y Caso 2.	62
Tabla 33: Potencia necesaria	62
Tabla 34: Características técnicas generador sincrónico.	63
Tabla 35: Datos de potencia eléctrica para ambos casos.	64
Tabla 36: Corrientes nominales y de cortocircuito trifásico Caso 1 y Caso 2.	65
Tabla 37: Descripción nomenclatura del plano unilineal.	66
Tabla 38: Características técnicas transformador elevador en ambos casos.	67
Tabla 39: Valor de equipos y sistemas primarios subestación Caso 1.	67
Tabla 40: Valor de equipos y sistemas primarios subestación Caso 2.	68
Tabla 41: Valores de parámetros para voltaje de paso inducido.	71
Tabla 42: Valor de parámetros para voltaje de contacto inducido.	71
Tabla 43: Actividades emisoras de MP10, fase de construcción	72

Tabla 44: Factor de emisión para camión recolector tipo.	75
Tabla 45: Parámetros para cálculo de emisiones por combustión de motores, fase de construcción.	75
Tabla 46: Emisión mensual por motores de combustión, fase de construcción.	75
Tabla 47: Emisión total por motores de combustión, fase de construcción.	76
Tabla 48: Emisión total PM10, fase de construcción.	76
Tabla 49: Peso molecular y factores de emisión para gasificación con antorcha de plasma.	77
Tabla 50: Concentraciones estimadas de gases de emisión Caso 1. Fuente: [32].	77
Tabla 51: Emisiones planta de incineración de lecho fluidizado. Fuente: DIA Horcones 2007.	78
Tabla 52: Parámetros de emisión de gases Caso 2.	78
Tabla 53: Ingresos anuales por venta de bonos de carbono.	79
Tabla 54: Recuperación de materiales.	80
Tabla 55: Cronograma general del proyecto Caso 2.	80
Tabla 56: Estimación de inversión Caso 1.	81
Tabla 57: Estimación de inversión Caso 2.	82
Tabla 58: Costos de inversión por MW y por tonelada anual.	82
Tabla 59: Estimación de costos, primer año.	83
Tabla 60: Estimación de ingresos.	84
Tabla 61: Indicadores de inversión de los proyectos puros.	84
Tabla 62: Escenarios análisis de sensibilidad.	85
Tabla 63: Análisis de sensibilidad, variación del precio de disposición final.	85
Tabla 64: Análisis de sensibilidad, variación del valor de la energía.	85
Tabla 65: Análisis de sensibilidad, variación del costo de inversión.	86
Tabla 66: Análisis de sensibilidad variación de la tasa de descuento.	86
Tabla 67: Factores de corrección precio social de la mano de obra. Fuente: [62].	88
Tabla 68: Costo social per cápita de contaminantes atmosféricos.	88
Tabla 69: Costo social por emisiones atmosféricas Caso 1.	89
Tabla 70: Costo social por emisiones atmosféricas Caso 2.	90
Tabla 71: Resumen de costo social para ambos casos.	90
Tabla 72: Parámetros para modelo de emisión de GEI en rellenos sanitarios.	90
Tabla 73: Emisiones totales de GEI en relleno sanitario Caso 1.	91
Tabla 74: Emisiones totales de GEI en relleno sanitario Caso 2.	92
Tabla 75: Beneficio social por reducción de emisiones en relleno sanitario.	92
Tabla 76: Factor de emisión para camión recolector en evaluación social. Fuente [60].	93
Tabla 77: Parámetros para cálculo de emisiones por transporte en evaluación social.	93
Tabla 78: Emisión anual por transporte en evaluación social.	94
Tabla 79: Beneficio social por desplazamiento de generación convencional.	95
Tabla 80: Resumen beneficios sociales.	95
Tabla 81: Indicadores de inversión evaluación social.	96
Tabla 82: Indicadores de inversión evaluación social Caso 1 con deuda.	96

Índice de ilustraciones

Figura 1: Jerarquía del manejo de residuos.	3
Figura 2: Energía producida por plantas de incineración en Europa, 1999. Fuente: Adaptado de [].	5
Figura 3: Gramos de Dioxinas TEQ en el tiempo, EE.UU. Fuente: [9].	8
Figura 4: Número de plantas de incineración de RSM en países europeos, 2011. Fuente: Adaptado de [8].	10
Figura 5: Capacidad-hora promedio plantas de incineración de RSM en países europeos, 2011. Fuente: Adaptado de [8].	11
Figura 6: Generación Total de Residuos a nivel nacional. Fuente [17].	14
Figura 7: Generación de RSI por sector, año 2009. Fuente [17].	14
Figura 8: Generación de RSM por sector, año 2009. Fuente [17].	15
Figura 9: Generación de RSM a nivel nacional. Fuente: [17].	15
Figura 10: Genración de RSM per cápita. Fuente: OCDE [18].	16
Figura 11: Mapa de generación de RSM en [ton/año], Región Metropolitana. Fuente: Adaptado de [17].	17
Figura 12: Frente de trabajo relleno sanitario. Fuente [17].	20
Figura 13: Ubicación generadores a base de biomasa Región Metropolitana. Fuente: Adaptado de [52].	24
Figura 14: Esquema de planta de incineración con tecnología de parrilla. Fuente: Adaptado de [39].	26
Figura 15: Tipos de parrilla. a) Rodillos móviles b) Avance progresivo c) Avance inverso. Fuente: Adaptado de [].	28
Figura 16: LFB Rectangular para incineración de RSM. Fuente: Adaptado de [].	30
Figura 17: LFC para incineración de RSM. Fuente: [3131].	30
Figura 18: Horno rotatorio y cámara de postcombustión. Fuente: Adaptado de [3].	31
Figura 19: Antorcha de plasma.	34
Figura 20: Antorcha DC de arco no transferido. Fuente: Adaptado de [33].	35
Figura 21: Ciclo del fluido de trabajo en una PVT.	40
Figura 22: Esquema de sistema de pretratamiento de residuos. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 23: Lavador de gases. Fuente: Adaptado de [39].	48
Figura 24: Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Santiago. Fuente [].	56
Figura 25: Ubicaciones propuestas para proyecto de valorización térmica de RSM. Fuente: Adaptado de [].	57
Figura 26: Turbogeneradores escogidos. Izquierda: Caso 1. Derecha: Caso 2. Fuente: www.disai.net/.	63
Figura 27: Diagrama unilineal Caso 1.	65
Figura 28: Plano unilineal Caso 2.	66
Figura 29: Izquierda: Voltaje de paso. Derecha: Voltaje de contacto. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 30: Emisiones de GEI en relleno sanitario Caso 1.	91
Figura 31: Emisiones de GEI en relleno sanitario Caso 2.	92

1. Introducción

1.1. Motivación

El tratamiento inadecuado de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), produce múltiples consecuencias en la calidad del aire, suelo y agua que derivan en problemas para la salud humana y el equilibrio del medio ambiente. Chile, como país miembro de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) se ha comprometido a avanzar en diversas materias de crecimiento y desarrollo, en donde el cuidado y preservación del medio ambiente debe ser considerado como elemento primordial para un desarrollo sustentable.

En este sentido, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) reconoce que a pesar de los avances en el tratamiento de los residuos, se requiere mejorar las regulaciones sanitarias y ambientales, abordar los vacíos legales y mayor fiscalización. Se expresa que la gestión de residuos ha sido abordada mayoritariamente de forma reactiva sin mayor atención a alternativas de valorización [1].

Adicionalmente la generación de residuos ha presentado un aumento sostenido al igual que el consumo de energía eléctrica, ambos signos propios de una economía en vías de desarrollo. Sin embargo, el alto porcentaje de residuos depositado en rellenos sanitarios y vertederos da cuenta de un sistema ineficiente y poco amigable con el medio ambiente, ya que se desperdician materiales con potencial de reciclaje o valorización energética.

El Ministerio de Energía ha expresado su interés en evaluar tratamientos de residuos con recuperación de energía que den solución a las problemáticas actuales. También algunas municipalidades de la Región Metropolitana están dispuestas a considerar proyectos de este tipo como parte de su estrategia energética local.

Es así, que la motivación de esta memoria es revisar las distintas tecnologías de tratamiento térmico de RSM con recuperación de energía eléctrica a fin de proponer aquella que, dentro del contexto regional, sea óptima y factible para Santiago de Chile. Proyectos de esta índole permiten disminuir la demanda por sitios de disposición final a la vez que reducen las emisiones atmosféricas relacionadas con la biodegradación en los rellenos sanitarios y aquellas por uso de maquinaria para transporte y disposición final de los residuos.

Durante la realización de este trabajo, el autor tuvo la oportunidad de visitar los rellenos sanitarios de mayor tamaño en la Región Metropolitana; Loma los Colorados y Santa Marta, como también la estación de transferencia Puerta Sur en la comuna de San Bernardo donde adecuan los residuos previo a su envío al relleno Santa Marta. Se espera que este trabajo sea un aporte para aquellas iniciativas que buscan mejorar el sistema de tratamiento de residuos en el país y resolver sus ineficiencias.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar un estudio de pre-factibilidad técnica y económica para una instalación de valorización térmica de residuos sólidos municipales con recuperación de energía eléctrica para Santiago.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Describir el funcionamiento del mercado de residuos.
- b) Identificar las tecnologías térmicas de valorización de RSM con recuperación de energía eléctrica, sus principales características y factores relevantes.
- c) Comparar y analizar el mercado de residuos chileno con los mercados en países desarrollados.
- d) Proponer y estudiar dos casos de plantas de valorización térmica que cumplan con las condiciones locales para determinar su rentabilidad económica y beneficio social.
- e) Establecer mediante análisis de sensibilidad la relevancia de cada parámetro en la evaluación de los proyectos.

1.3. Alcances

Este trabajo analiza las tecnologías térmicas de valorización de RSM con recuperación de energía eléctrica mediante un ciclo de vapor. No cubre instalaciones térmicas para desechos peligrosos como hornos de cemento así como tampoco instalaciones de coprocesamiento, cogeneración, o tratamientos bioquímicos del tipo digestión anaeróbica o digestión por microondas. Adicionalmente, no se consideran plantas donde las tecnologías estudiadas sean combinadas. La evaluación del proyecto se realiza a nivel de ingeniería conceptual.

2. Antecedentes

2.1. Contexto

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*EPA* por sus siglas en inglés) y también otras organizaciones medioambientales, han definido la Jerarquía de Manejo de Residuos. Esta jerarquía establece un orden de prioridades en el flujo de residuos a fin mejorar la gestión de los mismos. Se compone de cinco secciones organizadas como una pirámide invertida con las siguientes etapas: Reducir, Reusar, Reciclar, Valorización y Disposición final. En la parte superior se ubican las acciones primarias mientras que las secciones inferiores deben aplicarse posteriormente a las secciones superiores. La Figura 1 muestra el orden las categorías ya mencionadas.

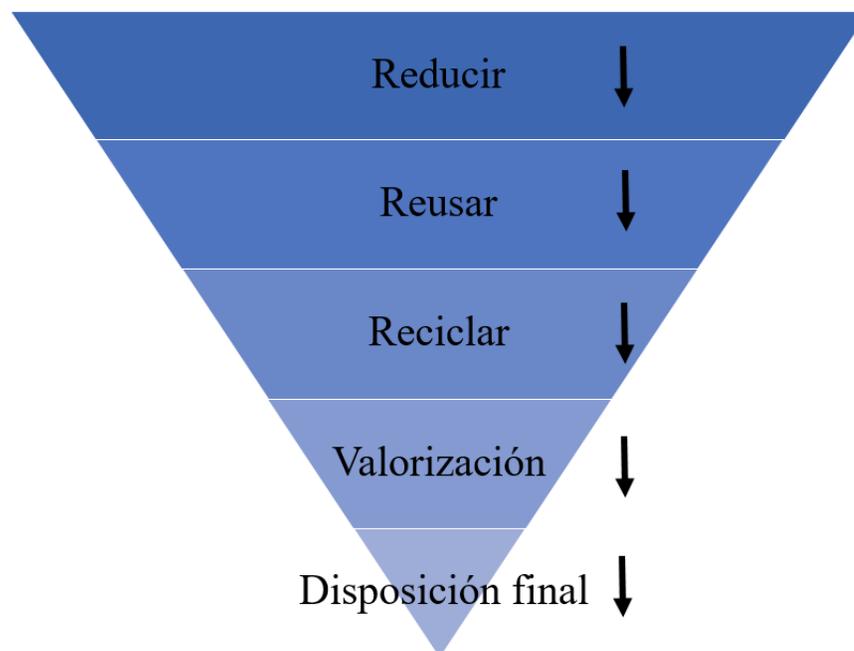


Figura 1: Jerarquía del manejo de residuos.

Las tecnologías que se evalúan en las secciones posteriores, son parte de la penúltima sección de la jerarquía de manejo de residuos correspondiente a Valorización. En particular, las tecnologías a estudiar son técnicas de Valorización Energética del tipo térmica con conversión a energía eléctrica para ser inyectada a la red.

El gobierno de Chile a través de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) integró la jerarquía de manejo de residuos en la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos [2] publicada el año 2005. El año 2010, la ley 20.417 crea el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). Estos organismos reemplazaron las funciones que hasta ese entonces recaían sobre la CONAMA. A continuación se resumen las funciones principales de cada organismo:

- a) MMA: Proponer políticas, programas y normas en materia ambiental.
- b) SEA: Administrar permisos y autorizaciones.
- c) SMA: Fiscalización.

El año 2010 también fue publicado el Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile, según el cual los residuos pueden ser clasificados en cinco categorías interrelacionadas entre sí [17]:

- a) Residuo inerte: Aquel que no genera, ni puede generar ninguna reacción física, química o biológica.
- b) Residuo peligroso: Aquel que presenta riesgo para la salud humana y/o medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar alguna característica de peligrosidad.
- c) Residuo no peligroso: Aquel que no presenta característica alguna de peligrosidad y genera o puede generar alguna reacción física, química o biológica.
- d) Residuo sólido domiciliario (RSD): Aquel generado en hogares.
- e) Residuo sólido municipal (RSM): Aquel generado en los hogares y sus asimilables, como residuos generados en vías públicas, el comercio, oficinas, edificios e instituciones tales como escuelas entre otros. Estos residuos son considerados residuos no peligrosos

La ley 20.257 publicada el año 2008 introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) y define los medios de generación ERNC incluyendo aquellos cuya fuente de energía primaria es la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios. Adicionalmente la comisión nacional de energía (CNE) podrá calificar como ERNC a aquellas centrales que utilizando energías renovables, contribuyan a diversificar las fuentes de abastecimiento de energía en los sistemas eléctricos y causen un bajo impacto ambiental. En consecuencia, el tratamiento de la fracción biodegradable de los RSM con recuperación de energía eléctrica califica como una fuente ERNC mientras que la clasificación de una planta que trate todas las fracciones de los RSM queda supeditada a la decisión de la CNE.

2.2. Valorización térmica de RSM en el mundo

Los distintos tipos de tratamientos térmicos de RSM nacieron como alternativa a la disposición final, principalmente para evitar enfermedades producto de la acumulación de los residuos. Por lo tanto, el objetivo de las primeras plantas fue reducir el volumen de residuos a la vez de transformarlos en inertes y libres de infecciones. Con el tiempo, se desarrollaron sistemas más complejos para el aprovechamiento de la energía térmica proveniente de la combustión, recuperación de ciertos materiales valiosos y posteriormente conversión a energía química y eléctrica. Es usual que las plantas de valorización térmica (PVT de aquí en adelante) generen tanto energía térmica en forma de vapor como energía eléctrica. Esta configuración se conoce como cogeneración. La Figura 2 da cuenta de la proporción entre generación de electricidad (blanco) y calor (azul) para países europeos en el año 1999.

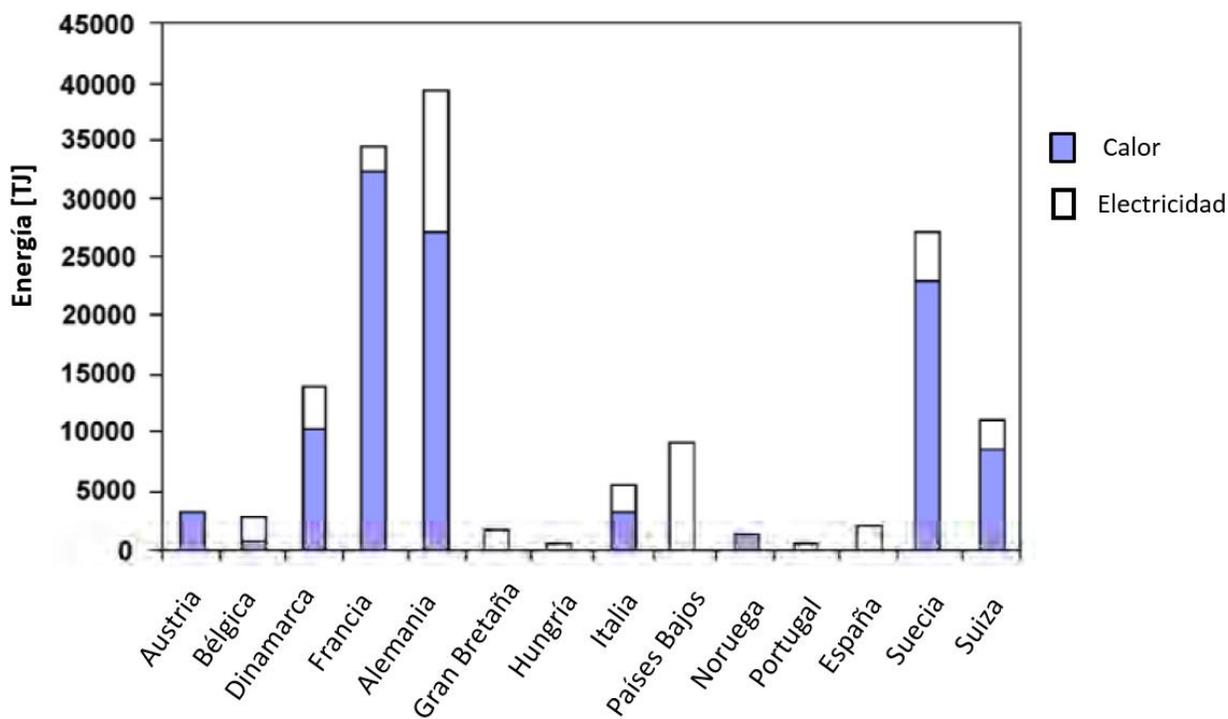


Figura 2: Energía producida por plantas de incineración en Europa, 1999. Fuente: Adaptado de [3].

Más de 2200 plantas de incineración de residuos con recuperación de energía se encuentran en operación en el mundo y se estima que dentro de los próximos 10 años alrededor de 550 nuevas plantas sean construidas [4]. Esto se alinea con a la tendencia que se observa en los países miembros de la OCDE donde ha aumentado el porcentaje de residuos destinados a reciclaje e incineración al mismo tiempo que se ha reducido el uso de rellenos sanitarios [5].

El porcentaje de RSM reciclados en países OCDE escaló desde 11% en 1995 a 24% en el 2009, mientras que el uso de rellenos sanitarios cayó desde 68% a 38% en el mismo periodo de tiempo. En la mayoría de los países miembros existe un impuesto sobre los residuos que se depositan en rellenos sanitarios que puede alcanzar hasta el doble del valor real de disposición. Esto ha fomentado iniciativas de reciclaje y valorización.

Teniendo en cuenta el elevado costo de disposición final en los países OCDE, las PVT de RSM perciben la mayor parte de sus ingresos por la recepción de residuos. La venta de energía y materiales reciclados representa entonces un ingreso complementario [3].

Dentro de la OCDE, la generación de energía eléctrica a partir de residuos municipales representa un porcentaje igual a 1,3% de la energía eléctrica renovable total generada. El porcentaje más elevado se encuentra en los Países Bajos, donde la generación eléctrica a base de residuos municipales alcanza 14,4%. Sin embargo, el mayor generador de electricidad desde residuos

municipales es Estados Unidos con 26,1% de la generación total de los países OCDE, seguido por Alemania (18,4%) y Japón (10,2%) [6].

Se debe considerar que la eficiencia eléctrica, entendida como la capacidad de generación eléctrica por tonelada de combustible, será siempre menor en una PVT de RSM con respecto a una planta de generación convencional ya que el poder calorífico de los RSM es inferior al poder calorífico de los combustibles convencionales y su composición es de naturaleza heterogénea. La Tabla 1 muestra el poder calorífico de distintos combustibles.

Tabla 1: Poder calorífico combustibles. Fuente: Adaptado de [4].

Combustible	Poder calorífico [MWh/ton]
GNL	10-13,9
Petróleo	12,8
Carbón	8,1-9,1
Madera	4,2
RSM Austria	2,2-3,3
RSM China	1-1,4

En la Tabla 1 se observa el bajo poder calorífico de los RSM en comparación con los combustibles tradicionales. Notar que el valor también cambia significativamente entre los RSM de Austria y los RSM de China, por lo que el poder calorífico de los residuos depende en gran medida de las condiciones locales. Los principales factores que determinan el poder calorífico de los RSM son su composición y humedad. Un estudio del banco mundial [4] establece que la cantidad y composición de los residuos sólidos depende a su vez del nivel de desarrollo y el estado de la economía local.

La Tabla 2 muestra el poder calorífico inferior (LHV) de las distintas fracciones que componen los residuos sólidos. El poder calorífico inferior o LHV por sus siglas en inglés representa la máxima energía extraíble en un proceso real. Es por ello que para sistemas térmicos es usual trabajar con este valor. Información adicional sobre los procesos de combustión es expuesta en el numeral 2.7.2.

Tabla 2: Poder calorífico de las fracciones de los residuos sólidos. Fuente: Adaptado de [4].

Fracción	LHV [MWh/Ton]
Comida y Orgánico	0,53
Plástico	5,6
Textil	3,27
Papel y cartón	1,79
Cuero y caucho	3,96
Madera	2,59

De la Tabla 2 se desprende que la fracción con mayor aporte energético es el plástico mientras que la materia orgánica posee un bajo poder calorífico en general por su alta humedad. Por otro lado, los metales, vidrios y materiales inertes no aportan con poder calorífico al proceso de incineración.

Una de las fortalezas de las PVT con generación eléctrica, es que al ser consideradas como energía renovable, estas son neutrales en emisiones de CO₂. Por lo tanto, la generación de energía en PVT desplaza emisiones contaminantes de plantas a base de combustibles convencionales. En los países OCDE la intensidad de emisión de carbono promedio en plantas de generación eléctrica fue 420 [gCO₂/kWh] en el año 2013, con una reducción anual de 2% debido al incremento en las fuentes renovables [7]. A pesar del ingreso de fuentes renovables, la generación eléctrica continúa siendo el sector de mayor emisión de CO₂, en particular la generación a base de combustibles fósiles y sus derivados con una participación de 59% en los miembros OCDE.

2.2.1. Valorización térmica de RSM en Estados Unidos

La primera planta de incineración de RSM en Estados Unidos fue construida el año 1885 en Nueva York. Al año 2011 el número de instalaciones de valorización de RSM vía incineración con capacidad sobre 15 [ton/día] era 86 [8]. La capacidad promedio de las plantas de incineración de RSM en el país era 1000 [ton/día] [12] y el año 2013 el porcentaje de residuos incinerados alcanzó el 12%.

El aumento en los precios del petróleo, entre otros factores, llevó a la construcción de cientos de plantas en los años setenta sin control de contaminación alguno. Su alto nivel de emisiones atmosféricas les otorgó una mala reputación entre la comunidad, lo que derivó en el cese de construcción de nuevas plantas entre los años 1996 y 2007 [9].

Como respuesta a la percepción negativa ante estos proyectos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) implementó regulaciones altamente restrictivas conocidas por el acrónimo MACT o *Maximun Available Control Technology*. Las emisiones disminuyeron a tal punto que en el 2003 la EPA calificó a las tecnologías de recuperación de energía a partir de la basura o WTE en inglés, como una de las fuentes energéticas con menor impacto.

La Tabla 3 compara los niveles de emisión promedio para cuatro tecnologías de generación eléctrica con distinto combustible según un estudio realizado el año 2010 en la Universidad de Columbia, Estados Unidos [33].

Tabla 3: Emisiones tecnologías de generación. Fuente: Adaptado de [33].

Tecnología	CO₂ [kg/MWh]	SO₂ [kg/MWh]	NO_x [kg/MWh]
Carbón	1,020	5,897	2,722
Petróleo	0,758	5,443	1,814
GNL	0,515	0,045	0,771
Incineración	0,380	0,771	2,449

La Figura 3 muestra la drástica reducción de emisiones de dioxinas proveniente de incineradores.

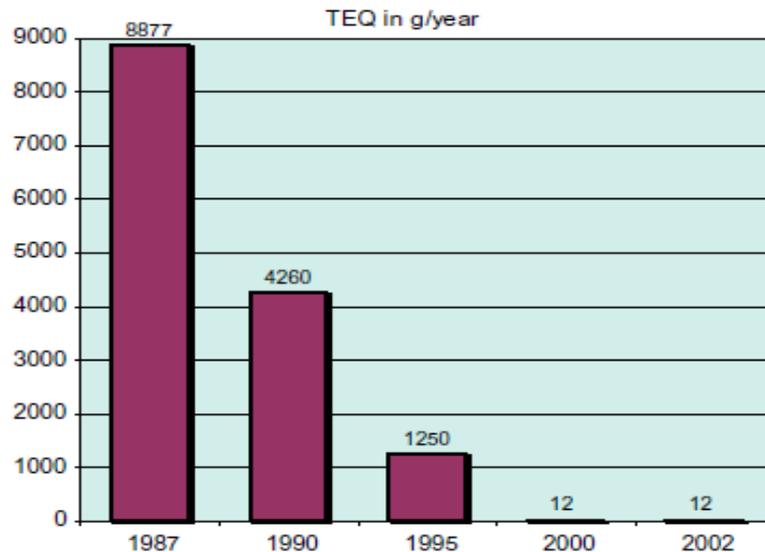


Figura 3: Gramos de Dioxinas TEQ en el tiempo, EE.UU. Fuente: [9].

Las PVT con recuperación de energía se ubican principalmente en la parte este del país, en estados con salida al mar. La mayoría de las plantas cuentan con programas de recuperación de metales ferrosos que son capturados antes y luego de la combustión con tasas de recuperación de hasta 90%. Otro dato a considerar, es que las comunidades que poseen plantas *WTE* muestran una tasa de reciclaje en promedio 17,8% mayor a la media nacional [9].

Un estudio realizado el 2009 compara las emisiones y eficiencia eléctrica de centrales eléctricas de incineración con centrales de generación eléctrica a partir del biogás de rellenos sanitarios (GRS). Dicho estudio determina que la generación por GRS presenta mayores emisiones de CO₂ equivalente por unidad de energía generada. Se determina que el nivel de emisiones atmosféricas medido en toneladas equivalentes de CO₂ se sitúa entre 0,4 y 1,5 [tonCO₂/MWh] para incineración mientras que para plantas GRS alcanza 2,3 [tonCO₂/MWh] [10]. Por otro lado, la eficiencia eléctrica se considera igual a 600 [kWh/ton] para la incineración y 65[kWh/ton] en plantas a base de GRS.

Un Segundo estudio elaborado por el laboratorio nacional de energías renovables de Estados Unidos (NREL por sus siglas en inglés) compara además las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos producidos en ambos casos los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Comparación principales contaminantes atmosféricos en EE.UU. Fuente: Adaptado de [11].

	GRS	Incineración	Unidad
Generación	66,5	570	[kWh/ton]
CO₂ biológico	2,4	1,24	[g/Wh]
CO₂ fósil	0,10	0,57	[g/Wh]
Metano	0,13	0,0000134	[g/Wh]
SO₂	0,00055	0,000696	[g/Wh]
NO_x	0,0022	0,00156	[g/Wh]
CO	0,0038	0,000966	[g/Wh]
MP	0,00039	0,000215	[g/Wh]
HCL	0,000034	0,00031	[g/Wh]
CO₂ equivalente	2,8	0,57	[g/Wh]

La generación de energía a partir de GRS presenta en general mayores emisiones por unidad de energía que la incineración. Al considerar que el metano posee un potencial de calentamiento global igual a 21, el CO₂ equivalente emitido por tecnologías de incineración es sustancialmente menor que en plantas a base de GRS. El precio por disposición final de RSM en Estos Unidos se encuentra en torno a 65 [USD/ton] [33].

2.2.2. Valorización térmica de RSM en Europa

Los países de la unión europea reciclan en promedio 44% de sus RSM, mientras que el 27% es tratado en instalaciones de recuperación energética y el 28% depositado en rellenos sanitarios. Además, la Unión Europea apunta hacia la utilización del calor y electricidad generados en plantas de valorización térmica de RSM como sustituto a las plantas térmicas convencionales [12].

El año 2000, la Directiva 2000/76/CE normalizó los parámetros para medir las emisiones de las plantas de incineración en Europa e impuso valores límites para todo los países miembros. Posteriormente, la directiva 2008/98/CE admitió la incineración de RSM como instalaciones de valorización energética solo en cuanto posean una eficiencia energética igual o superior a 0,6 según la fórmula R1 (ecuación (1)) en plantas previas al 2009 y 0,65 para aquellas posteriores al 2009.

$$\eta = \frac{Ep - (Ef + Ei)}{0,97 * (Ew - Ef)} \quad (1)$$

Donde:

Ep [GJ/año]. Energía anual producida como calor o electricidad [Gj/año]. La electricidad tiene un factor de 2,6 y el calor 1,1.

Ef [GJ/año]. Aporte anual de energía al sistema a partir de los combustibles que contribuyen a la producción de vapor.

Ew [GJ/año]. Energía anual contenida en los residuos tratados, calculada utilizando el poder calorífico de los residuos.

Ei [GJ/año]. Energía anual importada excluyendo *Ef* y *Ew*.

El año 2011, el número de instalaciones de valorización de RSM vía incineración que procesan sobre 15 [ton/día] era 472 instalaciones [8]. En Europa se encuentra también la PVT de residuos más grande del mundo; *Afval Energie Bedrijf* (AEB) ubicada en Ámsterdam, Holanda. En ella se tratan 3.900 toneladas de residuos municipales e industriales diariamente, sirviendo cerca de 1,8 millones de habitantes. Llama la atención su alta eficiencia eléctrica informada por la empresa igual a 30% [13]. Esta planta de cogeneración posee una capacidad instalada de 74 [MW] y también aporta vapor al sistema de calefacción urbano.

En Europa se ha fomentado la valorización de residuos a través de impuestos que aplican sobre los residuos que tienen como destino la disposición final en rellenos sanitarios o similares. La Tabla 5 muestra los precios de disposición final e impuestos en dólares estadounidenses por tonelada. Cabe señalar que Chile no cuenta con impuestos de este tipo.

Tabla 5: Estimación de costo de disposición final en países europeos. Fuente: www. eea.europa.eu.

País	Costo de disposición [USD/ton]	Impuestos [USD/ton]	Costo total [USD/ton]
Austria	77	25	102
Bélgica	43	102	145
Dinamarca	48	64	113
Alemania	150	0	150
Italia	97	32	129
Luxemburgo	156	0	156
Suecia	118	43	161
Reino Unido	27	64	91
Promedio	90	41	131

A continuación, La Figura 4 presenta el número de PVT en países europeos. Luego, la Figura 5 grafica la capacidad horaria promedio de las plantas de incineración de RSM en los países europeos que cuentan con la información disponible.

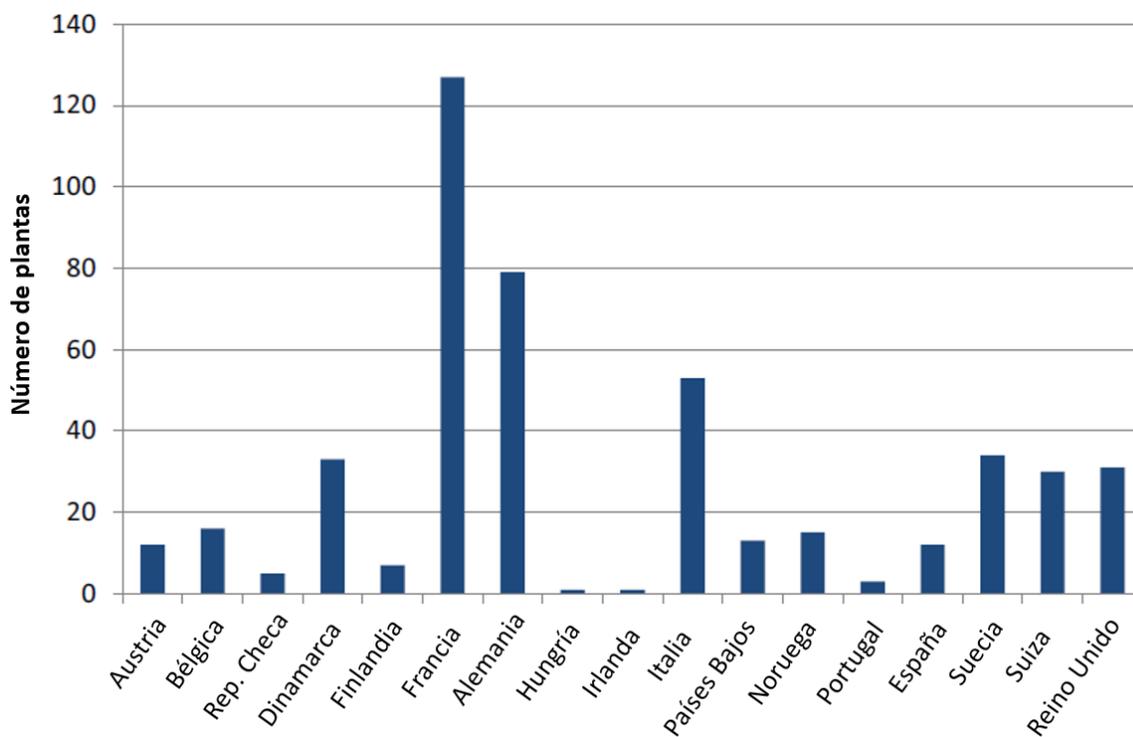


Figura 4: Número de plantas de incineración de RSM en países europeos, 2011. Fuente: Adaptado de [8].

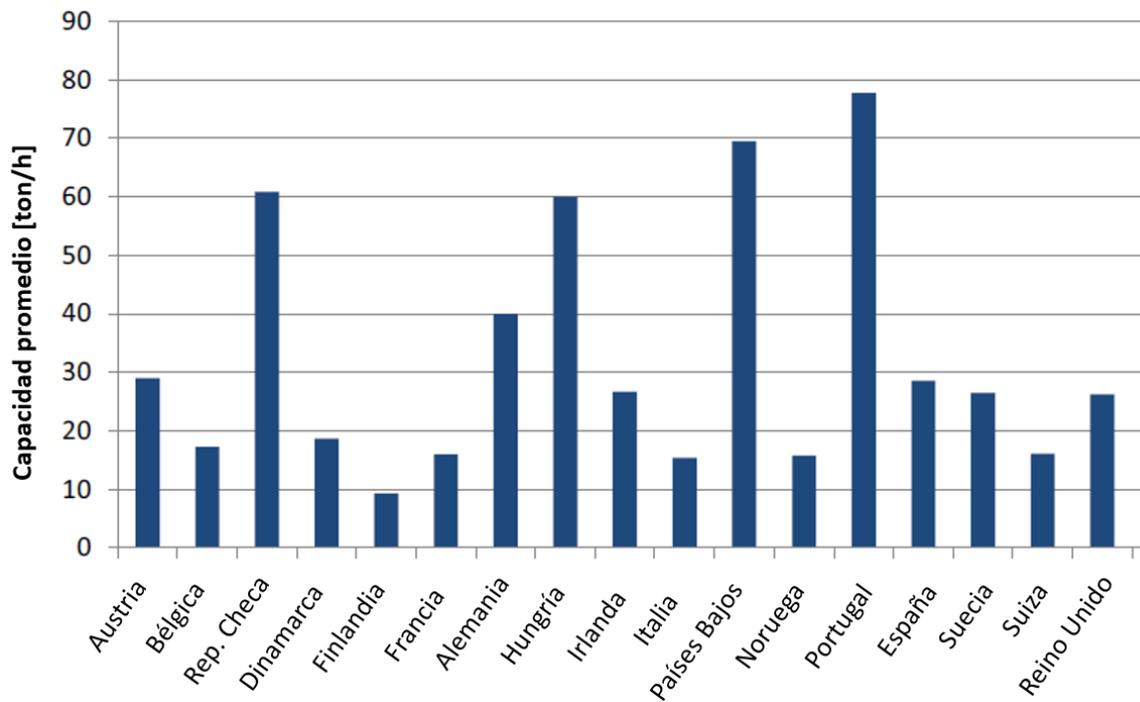


Figura 5: Capacidad-hora promedio plantas de incineración de RSM en países europeos, 2011. Fuente: Adaptado de [8].

El punto más cuestionado de las PVT de RSM son las emisiones atmosféricas. A fin de comparar con la norma chilena, la Tabla 6 expone los límites de emisión aplicables a centrales térmicas de valorización energética de RSM en la Unión Europea.

Tabla 6: Valores límite de emisión para incineración en la Unión Europea. Fuente: [26].

Contaminante	[mg/Nm³]
Material Particulado (MP)	10
Dióxido de azufre (SO ₂)	50
Óxidos de Nitrógeno (NO _x) ¹	200
Carbono Orgánico Total (COT)	10
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico (HCl)	10
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico (HF)	1
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal (Cd)	0,05
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal (Hg)	0,05
Antimonio y sus compuestos, expresados en antimonio (Sb)	0,05
Arsénico y sus compuestos, expresados en arsénico (As)	0,05
Plomo y sus compuestos, expresados en plomo (Pb)	0,05
Cromo y sus compuestos, expresados en cromo (Cr)	0,05
Cobalto y sus compuestos, expresados en cobalto (Co)	0,05
Cobre y sus compuestos, expresados en cobre	0,05
Manganeso y sus compuestos, expresados en manganeso (Mn)	0,05
Niquel y sus compuestos, expresados en niquel (Ni)	0,05
Vanadio y sus compuestos, expresados en vanadio (V)	0,05
Dioxinas y furanos	0,1 ng/Nm ³

2.2.3. Valorización térmica de RSM en Corea del Sur

Corea del Sur es un país con escaso territorio, por lo que en las últimas décadas y de la mano con su desarrollo económico, ha hecho avances importantes en materia medioambiental. Las estadísticas muestran una reducción drástica en la disposición final de residuos desde 72% en el año 1995 a tan solo 19% en el año 2009. Como resultado Corea del Sur cuenta con más de 35 plantas de incineración con recuperación de energía, que poseen una capacidad promedio de 235 [ton/día].

Un ejemplo de su estrategia se observa en la capital del país, Seúl, donde cinco plantas de incineración se sitúan en la zona urbana y reciben casi la totalidad de los residuos por los 10,5 millones de habitantes. Algunas de estas plantas están situadas en antiguos rellenos sanitarios que aún producen GEI. En tal caso, las instalaciones contemplan sistemas de captura del biogás, el que es utilizado como combustible en el proceso de incineración. En consecuencia, se califica a Corea del Sur como uno de los países líderes en desarrollo de políticas sustentables de tratamiento de residuos [14].

¹ Instalaciones existentes con capacidad nominal superior a 6 [ton/hora] o instalaciones nuevas.

2.3. Gestión de residuos en Chile

La gestión de los residuos se refiere al conjunto de operaciones relacionadas con la recolección, transporte y disposición final de los mismos. El código sanitario chileno establece que las municipalidades tienen obligación de llevar a cabo o gestionar estas acciones con todos los residuos producidos en su comuna. Por otro lado, el decreto N°3063 sobre rentas municipales se refiere al cobro municipal por extracción de residuos y establece una exención a usuarios con viviendas de valor igual o menor a 225 UTM.

Las labores de extracción son efectuadas por personal municipal o bien en conjunto con empresas contratistas. Los contratos entre municipalidad y contratistas duran entre 5 y 8 años. Son adjudicados por licitación pública a través del sitio web www.mercadopublico.cl. El precio final de recolección, transporte y disposición final depende en gran medida de la cantidad de residuos generados por efecto de economía de escala. Por lo tanto, existen diferencias sustanciales entre los precios de recolección de distintos municipios [23].

En la Política de Gestión de Residuos Sólidos se establece que las municipalidades se han visto superadas en el cumplimiento de sus funciones como consecuencia de vacíos legales, deficiencias institucionales y económicas del sistema. La autoridad reconoce la complejidad sobre la gestión de residuos sólidos debido a que sus dimensiones cruzan todos los ámbitos del desarrollo. De la misma forma, los municipios de la Región Metropolitana han declarado [15] que se requieren soluciones innovadoras para el tratamiento de la basura. Incendios en rellenos sanitarios y casos de corrupción a nivel municipal son algunos de los problemas que han sido expuestos ante la opinión pública [16].

2.3.1. Cuantificación y caracterización de residuos en Chile

La cuantificación resulta importante para determinar la masa de residuos a tratar mientras que la caracterización impone condiciones sobre el tipo de tratamiento y la energía que se puede obtener de ellos. El poder calorífico del material queda determinado en gran parte por su contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno. El azufre determina la formación de óxidos de azufre (SO_2 , SO_3) en el gas de combustión y aporta en menor medida al poder calorífico. Por su parte, el contenido de nitrógeno afecta en la generación de óxidos de nitrógeno (NO_x) de la misma forma que el cloro y flúor conllevan a la formación de ácido fluorhídrico (HF) y ácido clorhídrico (HCL) respectivamente en los procesos de combustión.

En el informe del estado del medio ambiente, el MMA establece que la información sobre cuantificación y caracterización de residuos, sus fuentes y manejo es escasa y dispersa.

La generación total de residuos en el territorio nacional se obtiene desde el primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile, realizado el año 2010 [17]. La Figura 6 grafica la generación total de residuos sólidos en el país entre los años 2000 y 2009 donde se observa un crecimiento variable de la generación en el tiempo.

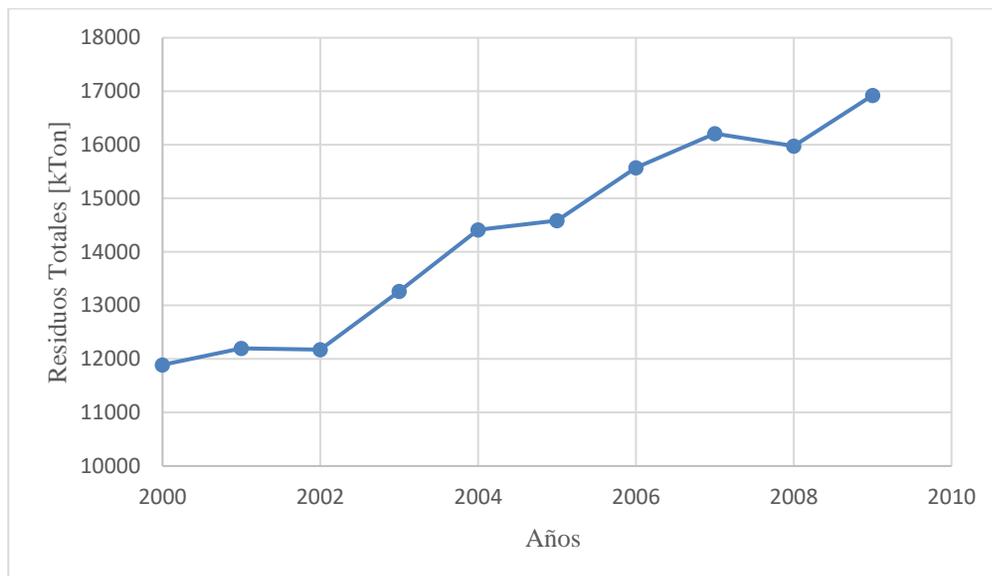


Figura 6: Generación Total de Residuos a nivel nacional. Fuente [17].

La generación total estimada de residuos sólidos a nivel nacional el año 2009 fue de 16,9 [Mton] de las cuales 10,9 [Mton] (61,5%) correspondieron a RSI y 6,5 [Mton] (38,5%) a RSM. En general los RSM presentan un poder calorífico mayor que los RSI por su elevada composición orgánica. Los sectores que generan RSI son la construcción (56%), industria manufacturera (18%), agrícola y forestal (15%), minería (6%), producción de energía (5%) y purificación y distribución de agua (1%). Estos porcentajes son graficados en la Figura 7.

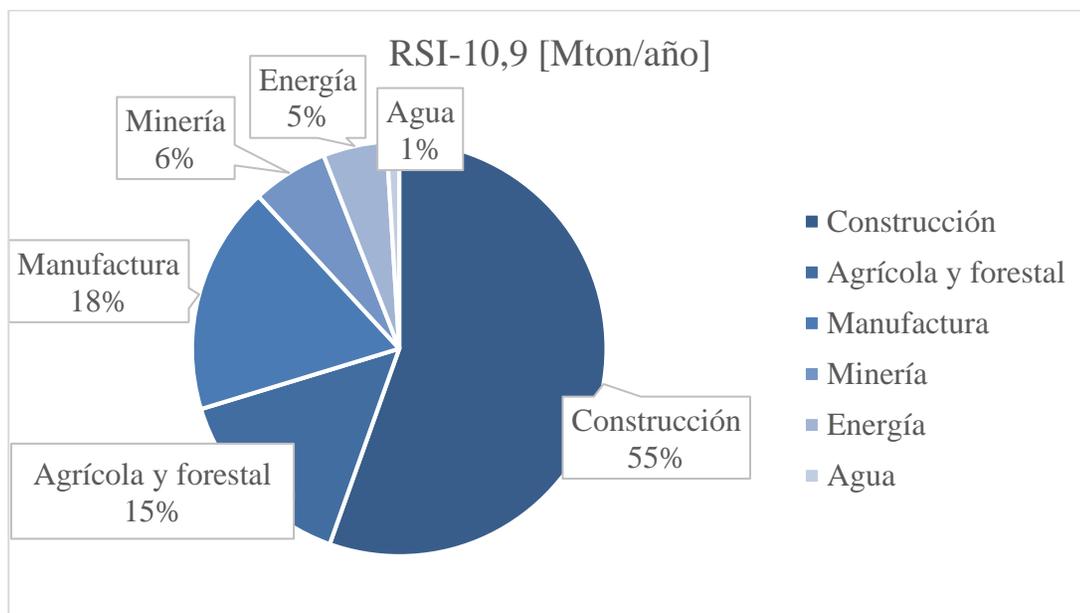


Figura 7: Generación de RSI por sector, año 2009. Fuente [17].

Asimismo, la generación de RSM se atribuye a los sectores domiciliario (76%), comercial (18%) y servicios municipales (6%). La generación de RSM por sectores se muestra en el gráfico circular de la Figura 8.

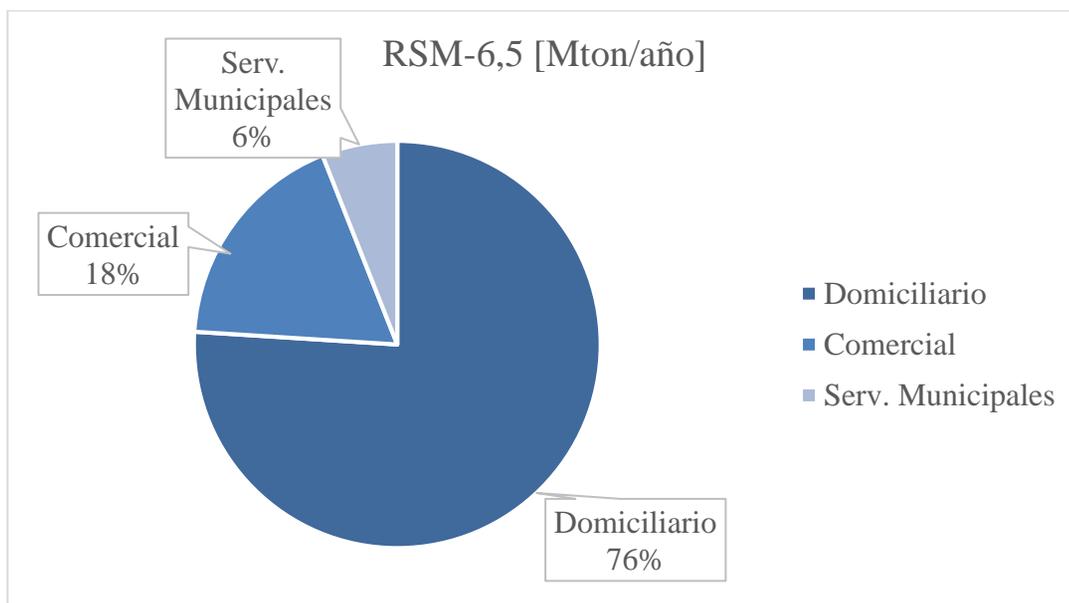


Figura 8: Generación de RSM por sector, año 2009. Fuente [17].

La Figura 9 indica la generación de RSM en el tiempo, donde a diferencia de la generación total de residuos sólidos de la Figura 6, se observa una tendencia de incremento sostenido. De mantenerse esta tendencia, según la ecuación de tendencia lineal expresada en la Figura 9, se calcula un crecimiento anual de 3% y una generación total nacional de 7,8 [Mton] para el año 2017.

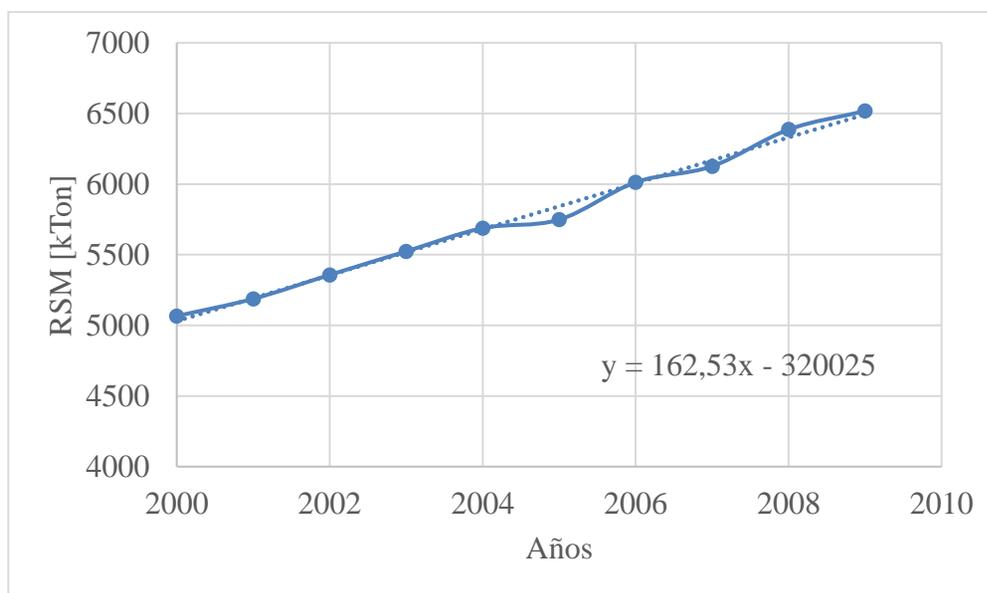


Figura 9: Generación de RSM a nivel nacional. Fuente: [17].

Un indicador de relevancia para la OCDE es la generación de RSM por habitante. Datos de la OCDE [18] del año 2009 indican que Chile presentó una generación de RSM per cápita igual a 0,94 [kg/persona*día] con una tasa de crecimiento anual promedio de 2.4%. Dicho incremento en la generación de RSM se explica debido al crecimiento de la población y el aumento en el nivel de vida [17]. La tendencia puede observarse en la Figura 10.

Por otro lado, la tendencia de los países OCDE es a disminuir la generación de RSM per cápita. La diferencia entre el valor OCDE y el valor en Chile el año 2011 fue de 0,47 [kg/persona*día].

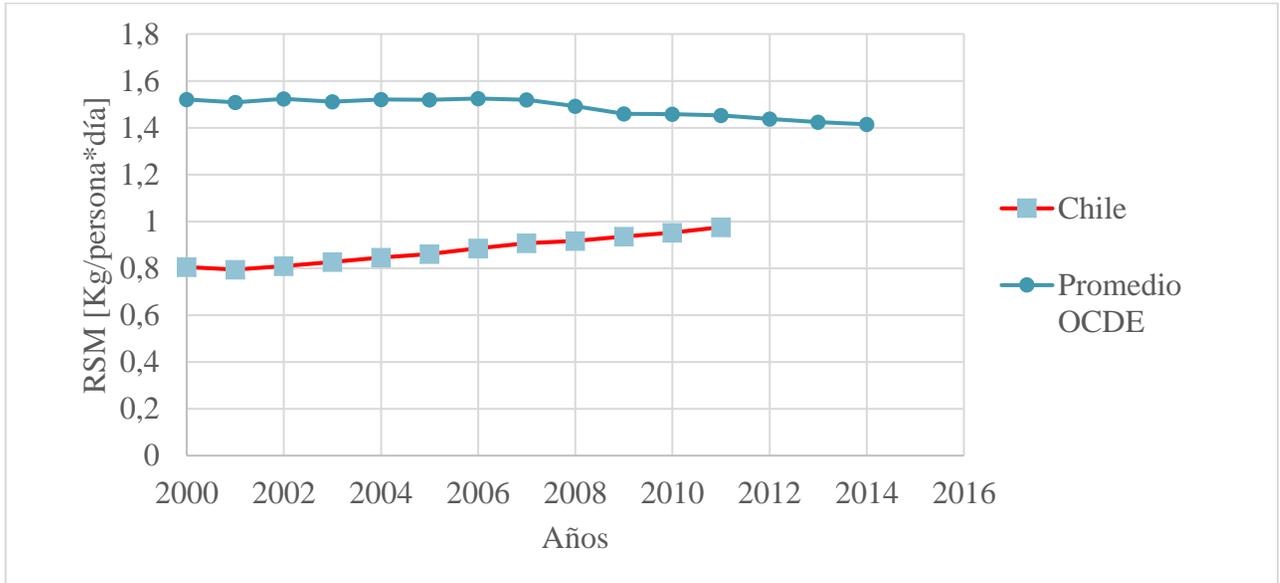


Figura 10: Generación de RSM per cápita. Fuente: OCDE [18].

A continuación, la Tabla 7 presenta la caracterización de los RSM generados en todo el territorio nacional a partir de los datos recopilados en el Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile el año 2009.

Tabla 7: Caracterización de RSM en Chile 2009. Fuente [17].

Fracción	Porcentaje	Toneladas anuales
Materia orgánica	53,3 %	3.464.500
Papel y cartón	12,4 %	806.000
Plásticos	9,4 %	611.000
Vidrios	6,6 %	429.000
Metales	2,3 %	149.500
Textiles	2 %	130.000
Otros	14 %	910.000

De la Tabla 7 se desprende que los residuos sólidos municipales poseen en promedio un alto componente orgánico lo cual es positivo para tratamientos de conversión energética. No obstante, esta caracterización es demasiado general para ser usada como referencia en los cálculos de una PVT en Santiago ya que las fracciones pueden variar significativamente en distintas regiones.

2.3.1.1. Cuantificación y caracterización de RSM en la Región Metropolitana

La Región Metropolitana presenta la mayor generación de RSM del país con 7.690 [Ton/día], seguida por la Región del Bio-Bio con 1.770 [Ton/día]. La Figura 11 muestra las principales comunas generadoras de RSM en la región Metropolitana e identifica sus rangos de generación de RSM con los colores que en ella se indican.

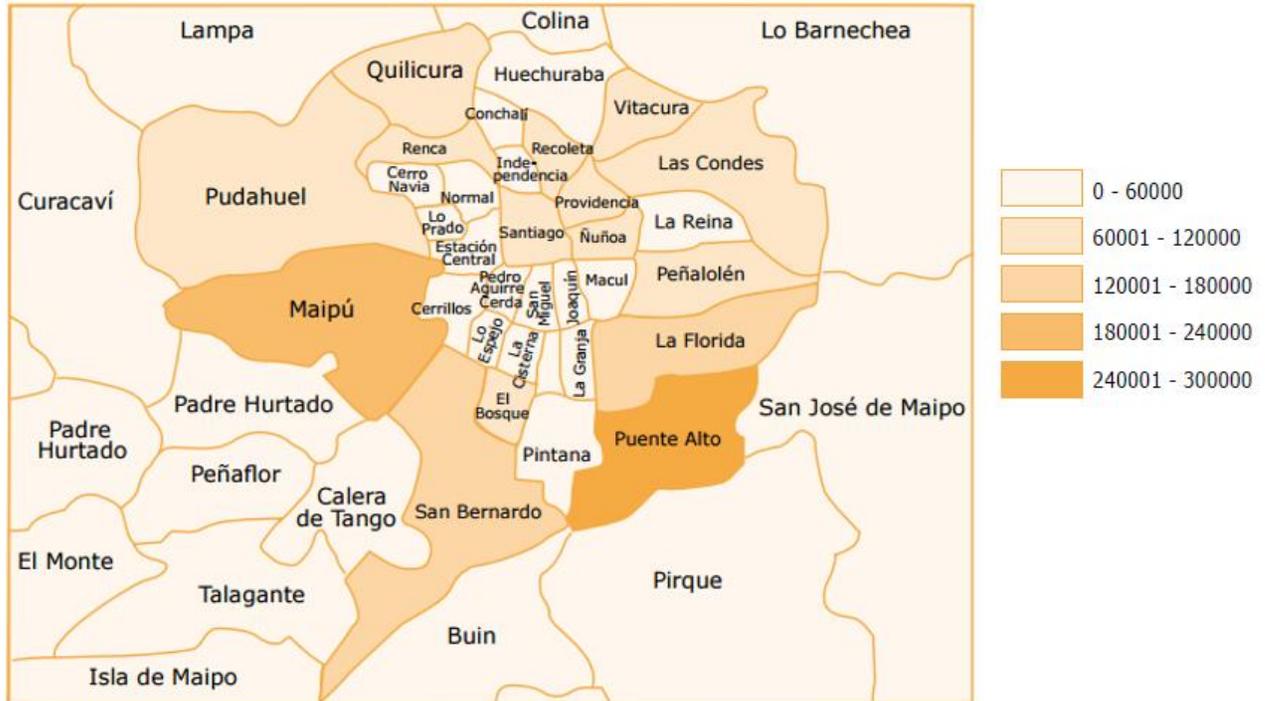


Figura 11: Mapa de generación de RSM en [ton/año], Región Metropolitana. Fuente: Adaptado de [17].

Dentro de la región, la comuna de Puente Alto lidera la generación de RSM con 781 [Ton/día], a la vez que es la más poblada. Por otra parte, Vitacura posee la mayor generación de RSM per cápita igual a 2,09 [kg/persona*día]. En base a la información del Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile 2010 y datos demográficos de la Subsecretaría de Desarrollo Regional, se confecciona la Tabla 8 donde se incluyen las 7 comunas de la región Metropolitana con mayor generación de RSM, las cuales suman el 40% de la generación de RSM total regional. Se observa que la generación per cápita en estas comunas es igual o superior al promedio regional (1,1) y es superior al promedio nacional informado por la OCDE (0,94).

Tabla 8: Comunas con mayor generación de RSM en la Región Metropolitana.

Comuna	[Ton/año]	[Ton/día]	Porcentaje	Porcentaje acumulado	[Ton/hab* día]
Puente Alto	284.934	781	10,2 %	10,2 %	1,1
Maipú	230.719	632	8,2 %	18,4 %	1,2
La Florida	160.123	439	5,7 %	24,1 %	1,1
San Bernardo	140.570	385	5,0 %	29,1 %	1,3
Las Condes	110.609	303	3,9 %	33,0 %	1,2
Pudahuel	105.671	290	3,8 %	36,8 %	1,5
Peñalolén	97.398	267	3,5 %	40,3 %	1,2
Quilicura	81.211	223	2,9 %	43,2 %	1,2
Total RM	2.807.247	7691	-	-	1,1

La Tabla 9 presenta las 34 comunas consideradas como circunscritas al radio urbano. Se presentan ordenadas por su correspondiente nivel de generación de RSM. La suma total para el radio urbano corresponde a 6.885 [ton/día].

Tabla 9: Generación de RSM en el radio urbano de Santiago.

	Comuna	[Ton/día]		Comuna	[Ton/día]		Comuna	[Ton/día]
1	Puente Alto	781	13	Renca	175	25	La Reina	117
2	Maipú	632	14	Vitacura	169	26	Lo Espejo	115
3	La Florida	439	15	Ñuñoa	168	27	San Miguel	109
4	San Bernardo	385	16	Est. Central	155	28	La Cisterna	106
5	Las Condes	303	17	Cerro Navia	153	29	Lo Prado	105
6	Pudahuel	290	18	La Pintana	149	30	Huechuraba	104
7	Peñalolén	267	19	Lo Barnechea	143	31	Cerrillos	102
8	Quilicura	222	20	La Granja	142	32	San Ramón	98
9	Santiago	194	21	Quinta Normal	140	33	Independencia	94
10	El Bosque	193	22	Macul	131	34	San Joaquín	92
11	Providencia	184	23	Conchalí	127			
12	Recoleta	176	24	P. Aguirre C.	125		Total Santiago	6.885

La caracterización de RSM para Santiago se obtiene desde un estudio realizado el año 2009, donde se analizan los residuos recibidos en el relleno sanitario Loma los Colorados ubicado en Til Til. Estos porcentajes son utilizados posteriormente para el diseño de la PVT.

Tabla 10: Caracterización de RSM, relleno sanitario Loma los colorados 2009. Fuente [23].

Fracción	[kTon]	Porcentaje
Materia orgánica	827	50,1 %
Plásticos	176	10,6 %
Papel y cartón	287	17,4 %
Vidrios	64	3,9 %
Metales	18	1,1 %
Telas	60	3,6 %
Otros	219	13,3 %

2.3.2. Disposición final en Chile

La disposición final se ha realizado históricamente en rellenos sanitarios y vertederos. Según estimaciones del MMA en el país existen 38 rellenos sanitarios y 112 vertederos. Estos últimos, han recibido gran oposición desde de los municipios y la comunidad por no presentar todas las condiciones necesarias para un manejo seguro de los residuos. Por otro lado, los basurales no cuentan con regulación alguna, por lo que se califican como ilegales.

Los rellenos sanitarios son la forma más aceptada de disposición final. En ellos se eliminan basuras tales como RSI, RSM, lodos y materiales asimilables mediante su depósito definitivo en el terreno. A diferencia de los vertederos, los suelos de un relleno sanitario son impermeabilizados para evitar drenaje de lixiviados hacia las capas freáticas. Además, las basuras son compactadas en capas que son cubiertas diariamente. El proceso puede o no incluir reciclaje, sin embargo se ha informado por parte de personal de KDM que la estación de reciclaje en el relleno sanitario Loma los Colorados no resulta rentable desde el punto de vista privado. Los rellenos sanitarios deben cumplir con el Decreto 189, publicado el 5 de enero de 2008, donde se establece el reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en mismos.

Entre otras obligaciones, la norma impone que todo relleno sanitario con una altura mayor a seis metros debe contemplar un sistema de manejo de biogás diseñado en base a una proyección de la cantidad de biogás que se generara en el mismo y que garantice condiciones de seguridad mínimas. Se indica además que en caso de finalizar sus operaciones, el plan de cierre deberá mantener la operación del sistema de control de lixiviados, manejo de biogás, mantención de la cobertura final y monitoreo por un periodo de al menos 20 años. Dentro de los GEI emanados desde un relleno sanitario, el metano es el más relevante por su alto potencial de calentamiento global y elevado poder calorífico que permite su valorización energética en motores de combustión. En la Tabla 11 se observa que el metano representa la mayor proporción volumétrica en el biogás de rellenos sanitarios.

Tabla 11: Componentes del biogás de rellenos sanitarios. Fuente: Adaptado de [19].

Componente	Contenido
CH ₄	50-70 % Vol.
CO ₂	25-50 % Vol.
H ₂ S	0-5000 [ppm]
NH ₃	0-500 [ppm]
H ₂ O (Vapor)	1-5 % Vol.
Partículas de polvo	>5 [µm]
N ₂	0-5 % Vol.

La tasa de desviación se define como la fracción de residuos generados que son desviados para su reutilización, reciclaje o valorización con el fin de evitar su disposición final. Es interesante notar que Chile tiene una tasa de desviación menor al 20% [2], valor que resulta minúsculo al compararse con la tasa de desviación en Canadá igual a 70%. En la Figura 12 se observa el frente de trabajo de un relleno sanitario.



Figura 12: Frente de trabajo relleno sanitario. Fuente [17].

Con respecto al destino de los RSM que son eliminados en el país, el último informe del estado del medio ambiente [1], publicado el año 2011, indica que el 69% de ellos se depositaron en rellenos sanitarios, 22% en vertederos y 9% en basurales. Se destaca que Chile y Turquía son los países OCDE con los mayores porcentajes de disposición final de RSM y por consiguiente poseen los menores valores de valorización energética [20].

2.3.2.1. Disposición final en la Región Metropolitana

En la región Metropolitana operan cuatro rellenos sanitarios que reciben RSM entre otros residuos. Para los tres primeros de la lista siguiente se muestran datos de recepción de residuos expuestos en un estudio realizado el año 2009 por Marko Amovic & Fredrik Johansson [23]. En el cuarto relleno sanitario de la lista se usa la capacidad media entregada en su estudio de impacto ambiental [21].

- a) Relleno sanitario Loma los Colorados.
Propietario: Sociedad KDM S.A.
Ubicación: Til Til.
Recepción: 4339 [Ton/día] [22].
Inicio de operaciones: 1996.
Fin de vida útil: 2041.
Ubicación estación de transferencia: Quilicura.
Distancia entre relleno y estación de transferencia: 63 [kM].

- b) Relleno sanitario Santa Marta.
Propietario: Consorcio Santa Marta.
Ubicación: Talagante.
Recepción: 3267 [Ton/día] [22].
Inicio de operaciones: 1992.
Fin de vida útil: 2022.
Ubicación estación de transferencia: San Bernardo.
Distancia entre relleno y estación de transferencia: 30 [kM].

- c) Relleno sanitario Santiago Poniente.
Propietario: Proactiva Servicios Urbanos S.A.
Ubicación: Maipú.
Recepción: 574 [Ton/día] [22].
Fin de vida útil: 2025.
Inicio de operaciones: 1992.

- d) Relleno sanitario Cerros la Leona.
Propietario: Gestión Ecológica de Residuos (GERSA) S.A.
Ubicación: Til Til.
Recepción: 670 [Ton/día].
Inicio de operaciones: 2013.
Ubicación estación de transferencia: Quilicura.
Distancia entre relleno y estación de transferencia: 39,1 [kM].

Según lo anterior, el relleno con mayor recepción de residuos es Loma los Colorados con 4339 toneladas diarias. En el sitio web de la empresa se informa que la estación de transferencia recibe alrededor de 850 camiones recolectores diariamente, cuya carga es enviada por tren al relleno sanitario.

Con respecto al costo de disposición final, Marko Amovic & Fredrik Johansson, 2009 [23] lo estima en 9 euros por tonelada. Este trabajo considera un valor igual a 15 [USD/ton] basado en los contratos municipales disponibles. Este valor resulta bajo comparado con los costos de disposición final europeos (ver Tabla 5), más aún si se consideran los impuestos por uso de rellenos sanitarios aplicados en estos países. Dado que Chile posee compromisos en materia de normativa y manejo de residuos ante la OCDE, se asume que el valor de disposición final tendrá un alza sostenida de 9,4% anual por 20 años hasta alcanzar el valor promedio de disposición final de los países europeos de la Tabla 5 igual a 90 [USD/ton] el año 2036.

2.3.2.2. Gasto municipal en recolección, transporte y disposición final en la RM

Se solicitó información a través de los portales web www.portaltransparencia.cl y www.mercadopublico.cl respecto al costo de recolección, transporte y disposición final de RSM en las comunas con mayor generación. Los costos anuales de recolección y transporte de RSM informados por seis comunas se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Gasto municipal en recolección y transpóndre de RSM 2015.

Comuna	Gasto anual [CLP]
Puente Alto	\$ 2.011.643.897
Maipú	\$ 6.376.280.237
La Florida	\$ 5.417.620.942
San Bernardo	\$ 4.732.916.717
Las Condes	\$ 4.488.540.000
Providencia	\$ 4.240.000.000

Llama la atención que la comuna de Puente Alto presenta el menor gasto en recolección y transporte del grupo expuesto en la Tabla 12 a la vez que es la comuna con mayor generación de RSM en la Región Metropolitana. La Tabla 13 detalla los datos del contrato entre la Municipalidad de Las Condes y la empresa contratista Proactiva S.A.

Tabla 13: Datos sobre recolección, transporte y disposición Providencia.

Comuna	Concesionario	Inicio contrato	Duración	Pago mensual
Las Condes	Proactiva S.A.	2014	8 años	8141 [UTM]

2.3.3. Responsabilidad extendida del productor

La responsabilidad extendida del productor o REP es un concepto acuñado recientemente a partir de la promulgación de la Ley 20920 que establece el marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Dicha ley tiene por objetivo disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y valorización según la jerarquía de manejo de residuos expuesta en el numeral 2.1.

En concreto, por decreto supremo se establecerán metas de reducción para grandes generadores de productos prioritarios y la obligación de contratar un gestor autorizado para tratarlos. También se permite la importación de residuos peligrosos para su valorización considerando las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales como criterio. Los productos prioritarios definidos por la REP son los siguientes:

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

En este sentido, las PVT que se analizan en este trabajo, son relevantes para alcanzar los objetivos de la REP toda vez que representan una opción eficiente de valorización energética de los residuos.

2.4. Emisiones en rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios se ubican en la última sección de la jerarquía de tratamiento de residuos expuesta en la sección 2, principalmente debido al daño que genera sobre el suelo y aguas subterráneas. Además, la emisión de gases de efecto invernadero, metano y dióxido de carbono en su mayoría, contribuyen de sobremanera al calentamiento global. Prueba de ello es que en Estados Unidos, los rellenos sanitarios son la mayor fuente de metano proveniente de actividades humanas [24]. No obstante, son una opción ampliamente utilizada en el mundo y también en Chile para la disposición final de residuos. Los diseños actuales cuentan con tratamientos de lixiviados y captación de gases que alcanzan hasta un 75% de captación [9].

El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero (GEI) antropogénico que afecta el balance térmico terrestre. Por ello, ha sido usado como referencia para establecer el potencial de calentamiento global o GWP por sus siglas en inglés (*Global Warming Potential*). Es así que las emisiones son reportadas en términos de Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂e).

Para modelar la generación de GEI en un relleno sanitario, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, *EPA (Environmental Protection Agency)* utiliza la ecuación (2) que recibe el nombre de exponencial negativa. El uso de la función exponencial con argumento negativo implica que existe un alto valor inicial que decae con el paso del tiempo.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (2)$$

Donde:

- Q_{CH_4} = cantidad anual de metano generado [m³/año].
- n = (año de cálculo)-(año en que la basura fue depositada).
- k = índice de generación de metano [año⁻¹].
- L_0 = Capacidad potencial de generación de metano [m³/ton].
- M_i = Masa de basura depositada en el año i .
- t_{ij} = Año i y decimal j .

El valor del índice de generación de metano k hace referencia a la tasa de generación de metano, su valor queda determinado como función de cuatro factores.

- a) Contenido de humedad en la basura.
- b) Disponibilidad de nutrientes para microorganismos.
- c) PH de la basura.
- d) Temperatura de la basura.

En una zona árida el valor de k puede ser $0,02$ [año^{-1}] mientras que en una zona húmeda es cercano a $0,7$ [año^{-1}]. En cuanto a la capacidad potencial de generación de metano L_0 , su valor depende exclusivamente del tipo de basura y su composición. Es así que un mayor contenido de papel por ejemplo, elevará el valor de L_0 . Valores típicos se encuentran entre 60 [m^3/ton] a 170 [m^3/ton].

2.5. Valorización de residuos

Chile cuenta con 27 plantas de generación eléctrica a partir de biomasa. En su mayoría corresponden a hornos alimentados con residuos forestales y agrícolas. Es por ello que su ubicación se concentra en la región del Bio Bio ya que allí existe alta actividad forestal.

En la Región Metropolitana operan tres plantas de generación a partir de residuos las que se nombran a continuación:

- Loma los Colorados I y II: Capacidad instalada de 2 [MW] y $18,2$ [MW] respectivamente. Utiliza como combustible el biogás generado en el relleno sanitario producto de la descomposición orgánica.
- Trebal Mapocho: Capacidad instalada de $8,2$ [MW]. Utiliza como combustible el biogás proveniente del tratamiento de aguas servidas.
- Santa Marta: Capacidad instalada de $13,8$ [MW]. Utiliza como combustible el biogás generado en el relleno sanitario producto de la descomposición orgánica.

La ubicación geográfica de las plantas de biomasa en la Región Metropolitana se muestra en la Figura 13.



Figura 13: Ubicación generadores a base de biomasa Región Metropolitana. Fuente: Adaptado de [52].

En relación a las dificultades para realizar proyectos de valorización en Chile, la División de Recursos Naturales, Residuos y Evaluación de Riesgo del Ministerio del Medio Ambiente [25], expuso el año 2013 las siguientes conclusiones sobre el proceso de valorización de residuos en el país:

- a) Los residuos municipales no tienen escala para desarrollar iniciativas de valorización, básicamente porque la separación en origen de los residuos domiciliarios requiere años de preparación.
- b) Los proyectos de valorización no pueden competir con las tarifas aplicadas por los vertederos del país.
- c) El sector industrial está dispuesto a hacer una valorización/eliminación adecuada de los residuos, pero no hay alternativas.
- d) Hay un gran potencial para hacer un trabajo coordinado entre municipios e industrias para desarrollar programas de valorización de residuos orgánicos.

En la misma presentación se identificaron las siguientes barreras:

- a) La valorización necesita costos que puedan competir con los de eliminación.
- b) Creciente oposición de la comunidad hacia los proyectos de residuos.
- c) La reglamentación no fomenta la valorización.
- d) Los proyectos municipales utilizan un modelo de mínimo costo.
- e) Las empresas no tienen incentivo para valorizar los residuos generados, les resulta más barato disposición final en vertederos o relleno sanitarios.

2.6. Tecnologías térmicas de valorización de RSM

Las tecnologías térmicas de valorización de RSM son aquellas que permiten extraer energía desde los desechos a través de procesos de conversión térmica. La norma chilena de emisión [43] define *Instalación de Incineración* como toda construcción donde se realiza un tratamiento de destrucción térmica de sustancias o materiales distintos a los combustibles tradicionales. Incluye la incineración de gases generados en procesos de pirólisis o gasificación.

De la misma forma, la norma europea [26] introduce las Instalaciones de Incineración como cualquier unidad técnica o equipo, fijo o móvil, dedicado al tratamiento térmico de residuos con o sin recuperación del calor producido por la combustión, incluida la incineración por oxidación de residuos, así como la pirólisis, la gasificación por plasma u otros en la medida en que las sustancias resultantes del tratamiento sean finalmente combustionadas.

En base a lo anterior, dos tecnologías de conversión serán a analizadas en este trabajo:

- a) Incineración.
- b) Gasificación (incluida la pirólisis).

La incineración se entiende como la combustión directa de residuos. Es la técnica más usada y probada para el tratamiento térmico de residuos y sus productos gaseosos son primordialmente CO₂,

H₂O, O₂, N₂. La gasificación en cambio, es una serie de procesos de descomposición térmica que permiten la obtención de gas sintético, el cual puede ser combustionado o bien refinado para la síntesis de biocombustible.

Una instalación de valorización térmica de RSM, tendrá independientemente de su tecnología de conversión, cuatro secciones generales:

- a) Recepción, acopio y alimentación.
- b) Combustión y recuperación de energía.
- c) Tratamiento de gases.
- d) Tratamiento de desechos y reciclaje.

Con el fin de exponer el funcionamiento de una PVT, a continuación la Figura 14 ilustra los componentes principales y su disposición en una planta de incineración con tecnología de parrilla.

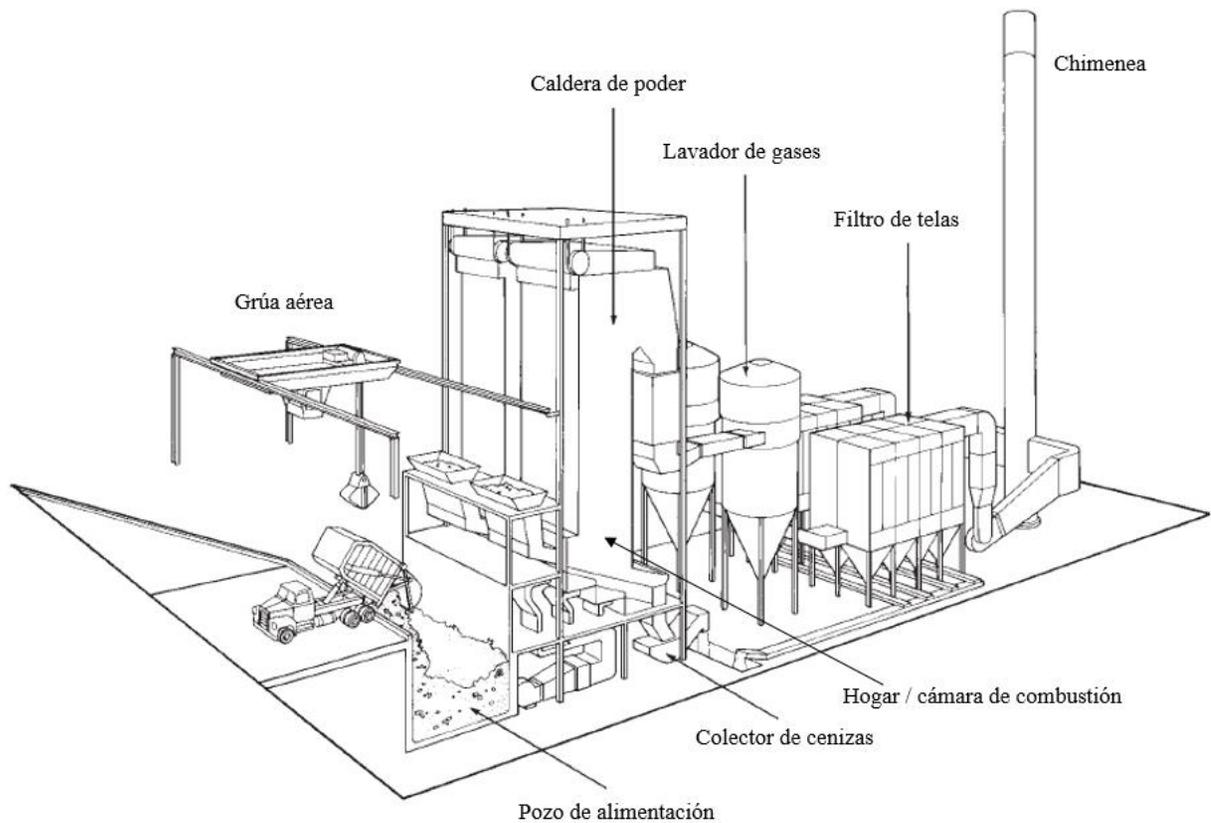


Figura 14: Esquema de planta de incineración con tecnología de parrilla. Fuente: Adaptado de [39].

En la Figura 14 se observa que sobre el pozo de alimentación se ubican las grúas aéreas con las cuales se alimenta la caldera de poder. De esta forma, se puede regular la cantidad de residuos que ingresan a la cámara de combustión. Luego de la combustión, los gases atraviesan los tubos intercambiadores de calor de la caldera y son depurados en los lavadores de gases. Posteriormente, la temperatura baja lo suficiente para pasar por los filtros de telas y capturar partículas de menor tamaño. Los gases de combustión son finalmente expulsados por la chimenea. Dadas las restricciones actuales respecto a emisiones atmosféricas, es usual adicionar precipitadores electrostáticos previo a los lavadores de gases.

Las PVT de RSM de cogeneración son notablemente más eficientes que aquellas que generan electricidad o vapor exclusivamente. Sin embargo, para el uso del vapor se requiere una industria que lo integre en su proceso o bien una red de calefacción residencial como existe países europeos que han usado esta alternativa tradicionalmente.

Dos estudios sobre factibilidad de PVT de RSM para Santiago se encuentran en la bibliografía abierta; Paula Estevez (2003) [27] establece que la tecnología más apropiada para Santiago es la incineración de parrilla con pretratamiento manual. Justifica que no existe un sistema regulado para la separación de basura en el origen y además los incineradores de parrilla son una tecnología probada, simple y económica. El segundo estudio realizado el año 2009 por Marko Amovic y Fredrik Johansson para KDM [23] evalúa un incinerador de parrilla con cogeneración por no requerir pretratamiento de los residuos, en ambos casos los proyectos resultan rentables desde el punto de vista privado.

Un estudio sobre el aprovechamiento energético de los residuos en Chile encargado por el Ministerio de Energía el año 2013 [28] estima el potencial de generación eléctrica promedio para las tres tecnologías principales. La eficiencia eléctrica de cada tecnología se expone en la Tabla 14.

Tabla 14: Potencial de generación eléctrica tecnologías de valorización de RSM. Fuente [28]

Tecnología	Eficiencia eléctrica
Incineración	20%
Gasificación	24,9%
Pirólisis	11,8%

2.6.1. Incineración

2.6.1.1. Incinerador de parrilla

Los incineradores de parrilla son la forma más utilizada para incineración de RSM. En Europa cerca del 90% de los incineradores corresponden a este tipo [3]. La parrilla se ubica en el fondo de la cámara de combustión y es parte fundamental del proceso ya que transporta el material y sobre ella los residuos alcanzan su punto de ignición. Por lo tanto, el diseño de la parrilla determina la eficiencia de combustión y la composición del gas de combustión. La parrilla se alimenta desde la parte superior por una grúa aérea, luego debe permitir la agitación y rotación del material mientras se desplaza para generar la evaporación de la humedad y finalmente una combustión completa. La sección no combustible de la basura es expulsada por la parte inferior de la parrilla en forma de cenizas y escoria [29].

Existen diversos tipos de parrillas y cada fabricante posee ciertas características propias. Sin embargo, a partir de la forma en que el material es transportado se pueden identificar tres clasificaciones (Figura 15). Su característica común es la inclinación que permite el flujo de los residuos por gravedad hacia el captador de cenizas o cenicero.

- a) Rodillos móviles: Los residuos pasan una serie de rodillos que voltean el material por su acción rotatoria.

- b) Avance progresivo: La parrilla se compone de gradas móviles que desplazan el material, de modo que en el paso de una grada a otra cambie la posición del material.
- c) Avance inverso: Configuración similar a la de avance progresivo, sin embargo las gradas empujan el material en dirección contraria al flujo para generar su rotación.

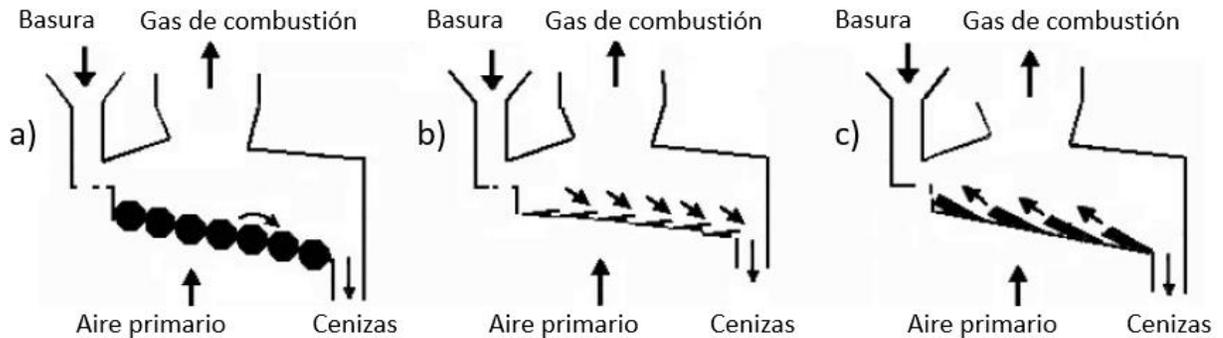


Figura 15: Tipos de parrilla. a) Rodillos móviles b) Avance progresivo c) Avance inverso. Fuente: Adaptado de [30].

Rediseños y combinaciones de estas configuraciones son aplicadas variando el ángulo de inclinación, velocidades y movimientos de agitación. Se destaca por su amplio uso en incineración de RSM la configuración *reciprocating grate* donde las gradas avanzan hacia adelante y hacia atrás de manera alterna sobre una parrilla estacionaria.

La Tabla 15 presenta una estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de una planta incineración de parrilla.

Tabla 15: Estimación de emisiones de plantas de incineración de RSM. Fuente [28]

Contaminante	[mg/Nm ³]
Material Particulado (MP)	<1
Dióxido de azufre (SO ₂)	<5
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	<80
Carbono Orgánico Total (COT)	<2
Monóxido de Carbono (CO)	<10
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal (Cd)	<0,001
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal (Hg)	0,001
Metales pesados, suma total	<0.05
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico (HCl)	<1
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico (HF)	<0,1
Dioxinas y furanos TEQ	<0,05 ng/Nm ³
Emisión de gases por tonelada de residuo	3950-4800 [mg/Nm³]

2.6.1.2. Lecho Fluidizado

La configuración de Lecho Fluidizado se aplica para residuos que poseen un pretratamiento de clasificación y trituración o residuos homogéneos como carbón, lignito, lodos, residuos peligrosos y biomasa forestal. Dentro de las técnicas de incineración, la configuración de lecho fluidizado entrega la mayor eficiencia y menores emisiones principalmente de SO_2 y NO_x . [39]. Sin embargo los problemas de corrosión en la caldera y la cámara de combustión por efecto del cloruro de hidrógeno (HCL) resultan más relevantes.

La cámara de combustión o reactor tiene forma vertical. En su parte inferior posee un lecho de material inerte, normalmente arena, piedra caliza o sílice, al que se le aplica una corriente de aire precalentado ascendente por efecto del cual las partículas se mantienen en suspensión. De esta forma el material se mantiene en constante agitación y permite una distribución uniforme de temperatura y oxígeno. Los residuos se introducen en el reactor de forma continua desde la parte superior o por los costados. Además, es necesario contar con un sistema de reposición de arena para suplir aquella que se pierde junto con las cenizas.

La velocidad de fluidización mínima es aquella velocidad del aire que permite la formación del lecho. El módulo de la velocidad y la presión determinan los tres tipos de lecho fluidizado que se explican a continuación:

- a) Lecho Fluidizado Burbujeante (LFB): Aproximadamente dos veces la velocidad de fluidización mínima. La tecnología de LFB puede encontrarse en su forma convencional o con circulación interna. En el último caso se tiene un tiempo de residencia mayor. La Figura 16 muestra un reactor tipo LFB para tratamiento de RSM. La presión al interior del reactor es cercana a la presión atmosférica.
- b) Lecho Fluidizado Circulante (LFC): En esta configuración se tiene una velocidad de fluidización hasta veinte veces la velocidad mínima. Uno o más ciclones reciben los gases y materiales postcombustión donde los se capturan residuos no combustionados y partículas de mayor tamaño para ser reingresadas a la cámara de combustión. Esta tecnología permite incinerar partículas de mayor tamaño que la de LFB. Una ilustración del sistema LFC para incineración de RSM se muestra en la Figura 17. También opera a presión atmosférica.
- c) Lecho Fluidizado a Presión (LFP): La presión al interior de la cámara de combustión es superior a la atmosférica.

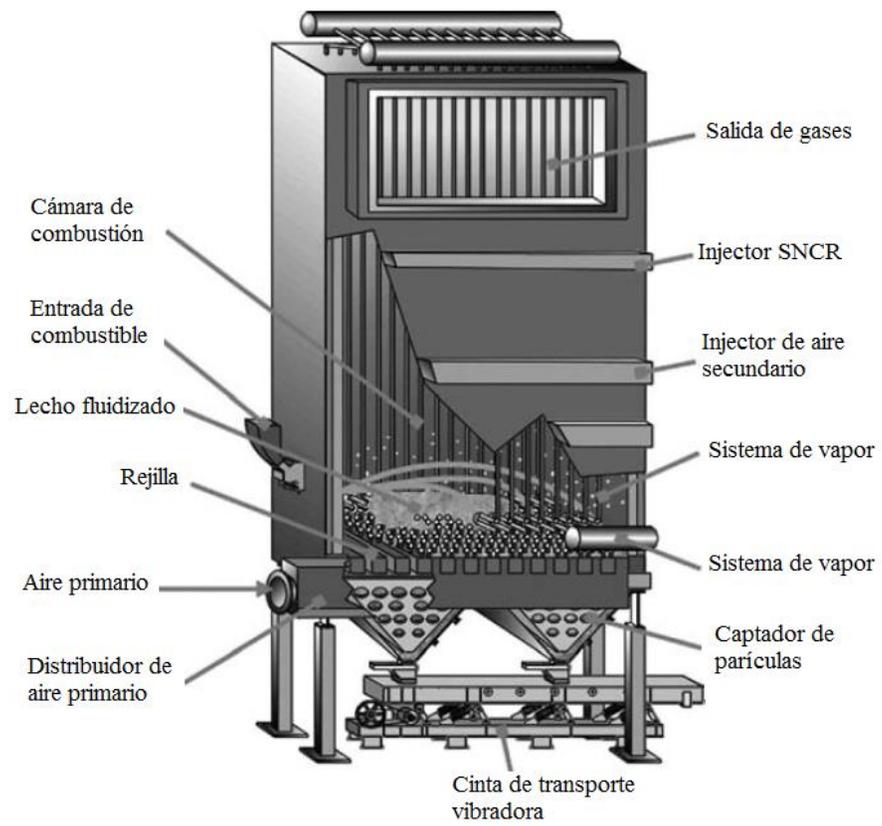


Figura 16: LFB Rectangular para incineración de RSM. Fuente: Adaptado de [31].



Figura 17: LFC para incineración de RSM. Fuente: [3131].

2.6.1.3. Horno Rotatorio

Los hornos rotatorios son una tecnología calificada como robusta debido a que en ellos se pueden tratar una gama amplia de residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Sin embargo, su uso se concentra en los residuos peligrosos y de hospitales, siendo limitado para tratamiento de RSM.

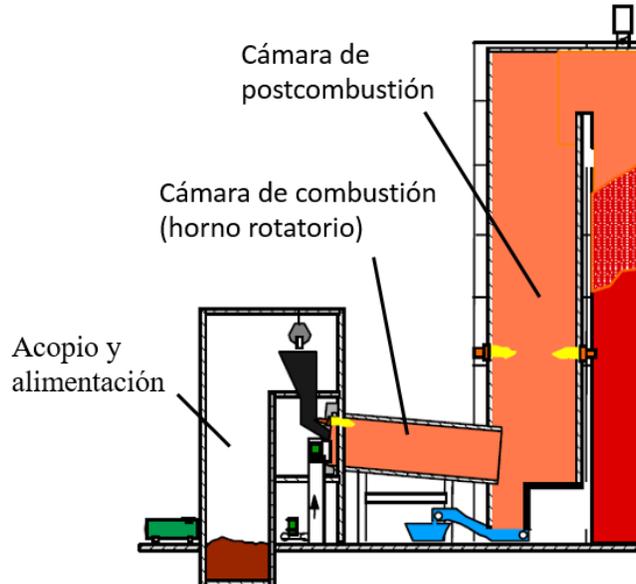


Figura 18: Horno rotatorio y cámara de postcombustión. Fuente: Adaptado de [3].

La cámara de combustión es de forma cilíndrica levemente inclinada para generar el flujo de material a medida que gira. La inclinación y rotación permiten ajustar el tiempo de residencia del material que normalmente es superior a los 30 [min]. Además del movimiento rotatorio, la cámara puede vibrar en otras direcciones. La cubierta del cilindro es de material refractario y en algunas aplicaciones industriales es enfriado por agua que circula dentro del cilindro. Los hornos rotatorios para RSM incluyen una cámara de postcombustión donde quemadores auxiliares son dispuestos con el fin de asegurar una combustión completa y cumplir así con las normas sobre temperatura y tiempo de residencia (ver Figura 18).

2.6.2. Gasificación

La gasificación es la combustión oxidativa parcial de un material que produce gas sintético (*syngas*). El *syngas* está compuesto principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno, por lo que posee un poder calorífico cercano al 30% del gas natural [33]. La ventaja de este proceso es que permite transformar combustibles sólidos de bajo valor en un gas o en un líquido limpio con múltiples aplicaciones. La gasificación ha sido utilizada como parte de procesos industriales hace varias décadas, aunque su uso en el tratamiento de RSM es relativamente nuevo al compararlo con la incineración. Las plantas de gasificación se caracterizan esencialmente por requerir un pretratamiento de los residuos sólidos para reducir su tamaño.

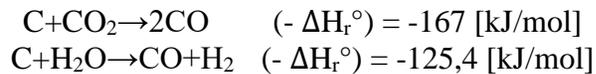
Los procesos de gasificación son los siguientes:

- a) Gasificación tradicional.
- b) Pirólisis.
- c) Gasificación por antorcha de plasma.

Las instalaciones de gasificación de RSM en su mayoría generan energía a partir del ciclo de vapor que se explica en la sección 2.7.4. La ventaja del ciclo de vapor, es su simpleza, y probada funcionalidad con residuos. La segunda configuración posible es la combustión del *syngas* mediante un ciclo de gas. En ella el gas sintético se combustiona en la turbina de gas para operar como una central de ciclo combinado, es decir, un ciclo de gas y un ciclo de vapor. Su elevado rendimiento y mayor flexibilidad en la generación de energía que el ciclo de vapor la destacan como una alternativa prometedora en el tratamiento de biomasa y en particular de residuos [57].

2.6.2.1. Gasificación tradicional

La gasificación tradicional utiliza entre 1/3 y 1/5 del oxígeno teórico requerido para la combustión total. Las principales reacciones de reducción que ocurren en el reactor son endotérmicas, es decir consumen energía.



El gas sintético generado se clasifica según su poder calorífico como sigue.

- a) Poder calorífico bajo: 1,104-3,254 [kWh/Nm³].
- b) Poder calorífico medio: 3,254-6,625 [kWh/Nm³].
- c) Poder calorífico alto: >6,625 [kWh/Nm³].

A elevadas temperaturas, la composición del *syngas* será mayor en CO y H₂ a la vez que disminuirán las concentraciones de H₂O y CO₂. En tanto, al aumentar la presión se produce el efecto inverso exceptuando la concentración de CO₂ que permanece casi invariante.

Los reactores de gasificación pueden ser de lecho fijo o lecho fluidizado. El primero es típicamente más sencillo ya que se alimenta el reactor desde la parte superior y el material reacciona lentamente con los gases que fluyen en contracorriente. Es más económico y produce un gas sintético de menor poder calorífico. En el lecho fluidizado utiliza el principio ya descrito en el numeral 2.6.1.2. La Tabla 16 presenta una estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de una planta de valorización térmica de residuos por gasificación tradicional.

Tabla 16: Estimación de emisiones para gasificación de residuos. Fuente: [28].

Contaminante	[mg/Nm ³]
Material Particulado (MP)	0,2
Dióxido de azufre (SO ₂)	<1
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	<10
Carbono Orgánico Total (COT)	2
Monóxido de Carbono (CO)	<3
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal (Cd)	<0.002
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal (Hg)	0,007
Metales pesados, suma total	<0,04
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico (HCl)	<0,2
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico (HF)	<0,1
Dioxinas y furanos TEQ	<0,02 ng/Nm ³
Emisión de gases por tonelada de residuo	3130 [mg/Nm³]

Al comparar la Tabla 16 con la Tabla 15 se observa que la generación por gasificación tradicional presenta menores niveles de emisión de MP, SO₂, NO_x, CO, metales pesados, HCL, dioxinas y furanos y gases totales por tonelada de residuo que la incineración. Sin embargo, la gasificación presenta mayores emisiones de Cd y Hg.

2.6.2.2. Pirólisis

Consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante como el oxígeno para la producción de *syngas*. En los procesos de gasificación también se entiende como la primera etapa del tratamiento, donde producto del secado y calentamiento del material se desprenden volátiles y se genera residuo carbonoso (*char*).

Los procesos de pirólisis han sido ampliamente usados en la producción de papel y en la industria petrolera, pero su aplicación en RSM es reciente. Es necesario el pretratamiento de los residuos para someter a reacción solo la componente orgánica de los mismos. Además, la temperatura de reacción se sitúa entre los 400 [°C] y 800 [°C]. Mientras mayor es la temperatura de reacción, la proporción de gases producidos aumenta a la vez que los productos sólidos disminuyen. Estos gases son ricos en H₂, CO, CH₄, H₂O y N₂.

La Tabla 17 presenta una estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de una PVT de residuos por pirólisis. En ella se observa que la emisión de gases por tonelada de residuos es notoriamente inferior al caso de incineración y gasificación tradicional ya expuestas.

Tabla 17: Estimación de emisiones para plantas de pirólisis de residuos. Fuente [28].

Contaminante	[mg/Nm ³]
Material Particulado (MP)	<1
Dióxido de azufre (SO ₂)	<5
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	<10
Carbono Orgánico Total (COT)	1
Monóxido de Carbono (CO)	<5
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal (Cd)	<0,0035
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal (Hg)	0,006
Metales pesados, suma total	<0.04
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico (HCl)	<0,5
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico (HF)	<0,1
Dioxinas y furanos TEQ	<0,01 ng/Nm ³
Emisión de gases por tonelada de residuo	2800 [mg/Nm³]

2.6.2.3. Gasificación por antorcha de plasma

La gasificación por antorcha de plasma se logra mediante una antorcha que es construida regularmente como un cilindro de acero inoxidable con electrodos en su interior. Estos son separados por un material de gran resistencia eléctrica y refrigerados por agua para evitar su fundición o sublimación durante el proceso. El chorro de plasma es generado por la inyección de un gas inerte como argón a través del arco eléctrico. El gas inerte es ionizado a altas temperaturas y se convierte en plasma permitiendo el tratamiento de residuos tanto orgánicos como inorgánicos. La sección orgánica del material es degradada mientras que la parte inorgánica se vitrifica para formar residuos inertes.

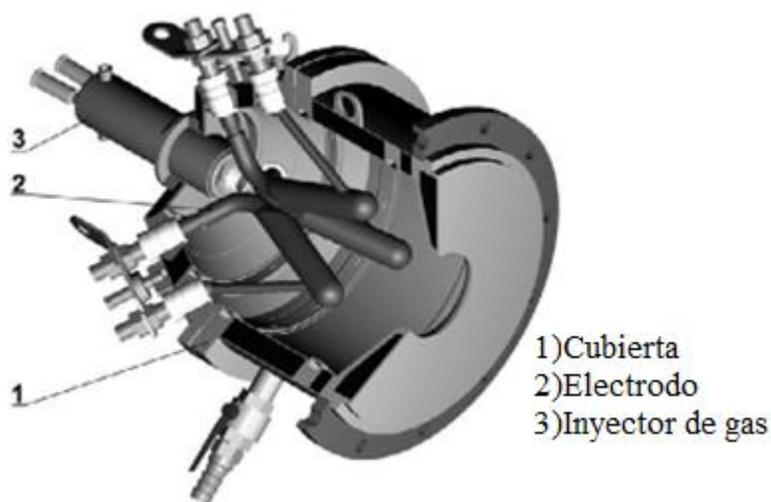


Figura 19: Antorcha de plasma.

Los principales componentes del gas sintético son hidrógeno, monóxido de carbono y metano, los cuales poseen alto poder calorífico. El gas puede ser combustionado para transferir calor al ciclo de vapor, refinado o bien usado en celdas de combustible para generación de energía.

La antorcha de plasma es el componente principal de esta tecnología. La antorcha puede ser del tipo DC (corriente continua) o AC (corriente alterna). La primera, opera en un rango de temperaturas entre 6000 [°C] y 15.000 [°C] según el tipo de electrodo. Es más estable que la antorcha AC y presenta un mayor costo por concepto de electrónica de potencia. La antorcha AC posee un rango mayor de temperaturas entre 2.000 [°C] y 20.000 [°C]. Pese a las elevadas temperaturas que puede alcanzar el plasma, 7000 [°C] es suficiente para desintegrar moléculas mayores en CO y H₂. [32].

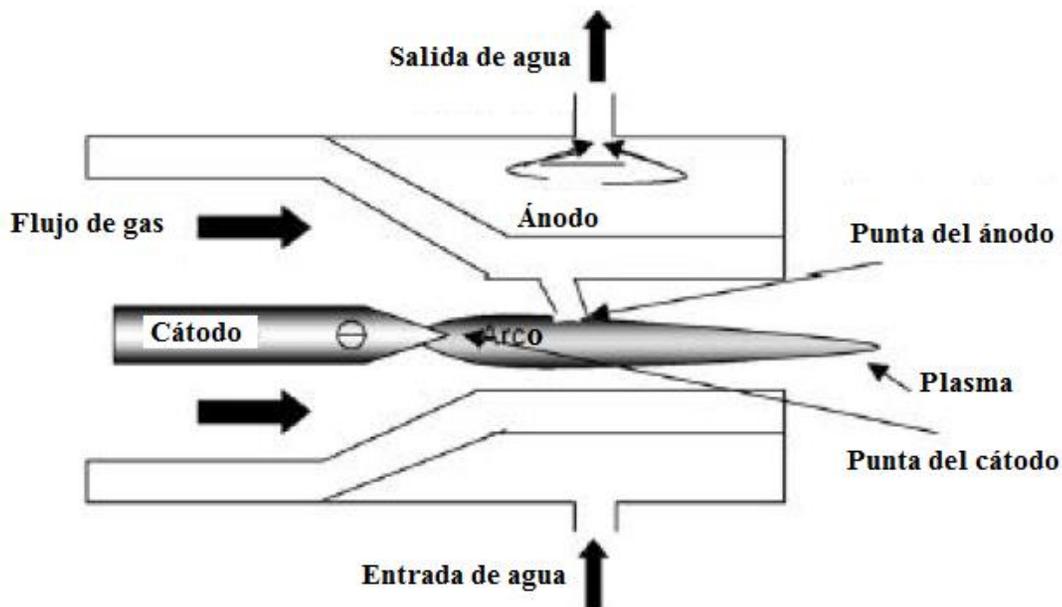


Figura 20: Antorcha DC de arco no transferido. Fuente: Adaptado de [33].

La antorcha DC de arco no transferido se caracteriza por ubicar el cátodo axial inserto en el flujo de gas, mientras que el ánodo se dispone de forma anular alrededor del cátodo (Ver Figura 20). La refrigeración es por agua y alcanza una eficiencia cercana al 50%.

Las tecnologías de gasificación por plasma poseen alto interés por su potencial de conversión termoquímica y aplicación en tratamiento de residuos. En términos económicos, la gasificación por plasma aplicada al tratamiento de RSM es la opción más costosa y por ello en muchos casos inviable [33]. No obstante, algunas plantas de incineración han utilizado gasificación asistida por plasma para acelerar el proceso de combustión y vitrifican el componente inorgánico de la basura.

El proveedor líder de esta tecnología para tratamiento de RSM es *Westinghouse Plasma Corporation (WPC)* con dos plantas comercialmente operativas en Japón; Utashinai y Mihami-Mikata. Utashinai es la PVT de RSM con gasificación por plasma con mayor capacidad en el mundo tratando 220 [ton/día], aunque la empresa ha anunciado la construcción de una planta de 1000 [ton/día] en *Tees Valley*, Reino Unido [34].

WPC ofrece dos tamaños de antorchas DC de arco no transferido; *Marc 3a* entre 80 y 300 [kW] de potencia y *Marc 11* entre 300 y 2400 [kW].

Tanto Pirólisis como Gasificación por plasma aplicadas a RSM son catalogadas como Tecnologías de Conversión Avanzadas (ACT por sus siglas en inglés) o tecnologías emergentes, de escaso uso y alto potencial de desarrollo [35].

2.7. Consideraciones de sistemas térmicos

2.7.1. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica establece la conservación de la energía en un sistema cerrado, por ello también se conoce como ecuación de balance energético.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Cambio de energía del} \\ \text{sistema en un tiempo} \\ \text{determinado} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Energía neta transferida} \\ \text{al sistema en un tiempo} \\ \text{determinado} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Energía neta transferida} \\ \text{desde el sistema en un} \\ \text{tiempo determinado} \end{array} \right]$$

La energía neta transferida al sistema y la energía neta transferida desde el sistema se representan como E_{in} y E_{out} respectivamente. Por otro lado, el cambio de energía del sistema se puede componer como la suma del cambio de energía cinética (ΔK) más el cambio de energía potencial gravitacional (ΔU) y el cambio de energía interna del sistema (ΔEI). Con las definiciones anteriores, la primera ley de la termodinámica se puede escribir como se muestra en la ecuación (3).

$$\Delta K + \Delta U + \Delta EI = E_{in} - E_{out} = Q - W \quad (3)$$

En la ecuación (3) Q y W representan el calor y el trabajo respectivamente. Ambos son los medios para transferir energía en sistemas térmicos de poder. El trabajo genera energía que escapa desde el sistema hacia el exterior por lo tanto se escribe con un signo negativo en la ecuación.

La ecuación (3) puede generalizarse también para ciclos termodinámicos, donde la variación de energía en el ciclo es nula, por lo tanto la expresión se reduce a la ecuación (4).

$$Q_{ciclo} = W_{ciclo} \quad (4)$$

En un ciclo de generación de energía o ciclo de poder, W_{ciclo} se entiende como el trabajo que mueve el eje de la turbina. A su vez Q_{ciclo} se toma como el calor proveniente del combustible (Q_{in}) menos el calor expulsado en el proceso (Q_{out}) en forma de vapor u otros. En base a lo anterior la ecuación de balance energético en ciclos termodinámicos se puede escribir según la ecuación (5).

$$Q_{in} - Q_{out} = W_{ciclo} \quad (5)$$

2.7.1.1. Eficiencia térmica

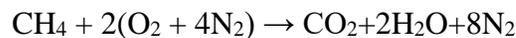
En base a la nomenclatura de la ecuación (5) para el balance energético, se establece la eficiencia térmica de un ciclo de poder en términos de la proporción de energía que ingresa al ciclo Q_{in} que es convertida en trabajo efectivo W_{ciclo} . Así, la eficiencia térmica se expresa en la ecuación (6).

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} = \frac{(Q_{in} - Q_{out})}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (6)$$

2.7.2. Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones químicas de oxidación entre un combustible y un comburente (generalmente el oxígeno molecular O_2 del aire) que involucran desprendimiento de calor, emisión de radiación luminosa, productos gaseosos de combustión y eventualmente humo.

Se pone como ejemplo de combustión la reacción estequiométrica del metano (CH_4), considerando el aire como una combinación de oxígeno y nitrógeno ($O_2 + 4N_2$).



Según la velocidad a la que ocurre la reacción química, la combustión puede caracterizarse como sigue [36]:

- a) Combustión lenta: baja temperatura. No hay presencia de llama.
- b) Combustión normal no deflagrativa: Presencia de llama, velocidad de propagación del orden de [cm/s].
- c) Combustión deflagrativa: velocidad de propagación del orden de [m/s], aumento de presión hasta 10 veces la inicial.
- d) Combustión rápida o instantánea: aumento en la presión de hasta 100 veces la inicial, si la velocidad de propagación supera los 343 [m/s] (velocidad del sonido) se denomina detonación.

El objetivo de la combustión en sistemas térmicos de poder es liberar el máximo calor minimizando las pérdidas por combustión incompleta y el aire en exceso. Los siguientes términos son relevantes para conocer la eficiencia energética.

Poder Calorífico Inferior (*LHV*): Se refiere a la máxima energía que se puede extraer desde el combustible por unidad de masa en un proceso real, lo que implica asumir que parte del agua se elimina con los productos de la combustión sin ocurrir condensación. Se calcula como el calor de reacción (entalpía de reacción Δh_R) dividido por la masa del combustible (M).

$$LHV = \frac{|\Delta h_R|}{M} \left[\frac{J}{g} \right] \quad (7)$$

Poder Calorífico Superior (*HHV*): Se refiere a la máxima energía que se puede extraer desde el combustible por unidad de masa considerando recuperación del calor latente en el vapor generado en la combustión, es decir, se asume que todo el vapor de la combustión es condensado.

$$HHV = LHV + \frac{n_{H_2O} h_{fgH_2O}}{M} \left[\frac{J}{g} \right] \quad (8)$$

Donde n_{H_2O} es la proporción molar del agua y h_{fgH_2O} es el calor latente del agua.

Para cálculos termodinámicos se usa normalmente el valor de LHV ya que representa la máxima energía real extraíble del combustible. La ecuación (9) relaciona ambos valores incorporando los porcentajes de Hidrógeno (H), Humedad (M) y Oxígeno (O) en el combustible [37].

$$LHV = HHV - 50,6 * H - 5,85 * M - 0,191 * O \left[\frac{kcal}{kg} \right] \quad (9)$$

2.7.3. Transferencia de calor

La transferencia de calor es una forma de transferencia de energía desde cuerpos con mayor temperatura a cuerpos con menor temperatura. Se da en tres modos elementales; conducción, convección y radiación. Las ecuaciones que se presentan a continuación son las versiones simplificadas aplicables a un volumen controlado.

2.7.3.1. Conducción

La transferencia de calor por conducción se produce por la interacción molecular donde el mayor movimiento molecular producto de una elevada temperatura transfiere energía a las moléculas adyacentes.

Se define el flujo de calor por conducción según la ecuación (10).

$$\frac{q}{A} = -k \nabla T \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10)$$

Donde:

q = Calor transferido [W].

A = Área normal a la dirección de transferencia [m^2].

k = Conductividad térmica [$\frac{W}{m \cdot K}$].

∇T = Gradiente de temperatura en la dirección de transferencia [$\frac{K}{m}$].

El signo negativo en la ecuación indica que el flujo de calor es contrario a la dirección de crecimiento del gradiente de temperatura, es decir que la energía se transfiere desde una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura. La conductividad térmica k es una característica propia del material, y para efectos prácticos normalmente se asume constante para todo el material (isotrópico).

2.7.3.2. Convección

La transferencia de calor por convección se produce entre una superficie y un fluido adyacente. Dos casos de convección son aplicados; convección natural y convección forzada. Como lo indica su nombre, la convección natural se genera por efectos naturales, donde un fluido a distinta temperatura circula adyacente a una superficie como resultado de la diferencia de densidad. Por otro lado la convección forzada impulsa la circulación del fluido por efecto de ventiladores o máquinas de este tipo. La ecuación (11) describe el flujo convectivo.

$$\frac{q}{A} = h\Delta T \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (11)$$

Donde:

ΔT = Diferencia de temperatura en la dirección de transferencia [K].

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$.

El coeficiente h en general se determina en función de la geometría, propiedades del fluido y el valor de ΔT . En los procesos de convección, se tiene que a pesar de la turbulencia del fluido, siempre existe una película de partículas adyacentes a la superficie donde el flujo es laminar. Para el flujo laminar cercano a la superficie, h tiene un valor mayor y se conoce como coeficiente laminar el cuál es relevante también para los procesos de ebullición y condensación.

2.7.3.3. Radiación

La radiación, es aquella transferencia de calor que ocurre entre superficies mediante ondas electromagnéticas, por lo tanto no se requiere un medio de transferencia entre ellas. En consecuencia, la transferencia por radiación es máxima en el vacío.

El flujo de calor por radiación se modela según la ecuación (12).

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (12)$$

Donde:

A = Área de la superficie radiante [m^2].

T = Temperatura absoluta [K].

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,676 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2} K^4 \right]$).

En sistemas de combustión de alta temperatura, la radiación domina el proceso de transferencia de calor. Las superficies de la cámara de combustión se caracterizan por su emisividad, la cual se define como la energía emitida por el material real (cuerpo gris) mediante radiación en razón de la energía emitida por radiación desde un material ideal que emite en todo el espectro (cuerpo negro).

2.7.4. Ciclo de Rankine

El ciclo de Rankine o ciclo de vapor es un ciclo termodinámico que modela la circulación de un fluido de trabajo que usualmente es vapor. Las principales propiedades del vapor son la entalpía, entropía y volumen específico. Estas propiedades fueron medidas y tabuladas en las tablas ASME (*American Society of Mechanical Engineers*). En las tablas ASME se define la relación entre presión y temperatura para las distintas condiciones del fluido. Es importante notar que cuando el vapor está sobrecalentado se puede considerar como un gas ideal, es decir sus propiedades solo dependen de la presión y temperatura [38]. En la Figura 21 se observa el ciclo del fluido de trabajo simplificado.

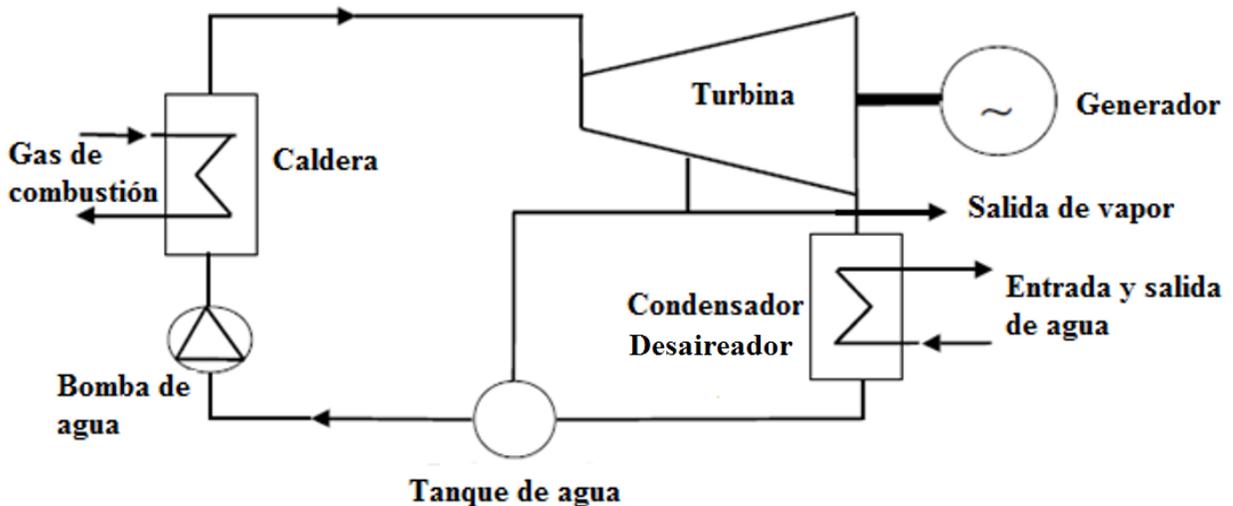


Figura 21: Ciclo del fluido de trabajo en una PVT.

En la caldera ocurre el traspaso de calor desde los gases de combustión al agua, buscando maximizar la transferencia de calor en la menor superficie de transferencia posible. El agua es precalentada en el economizador y luego evaporada en el evaporizador para obtener vapor saturado. El vapor saturado fluye hacia el sobrecalentador, donde alcanza su máxima temperatura (530 [°C]-600[°C]) y presión (30 [bar]-40[bar]). Luego es enviado a la turbina de vapor por medio de cañerías debidamente aisladas. En la turbina de vapor el fluido se expande y produce trabajo suficiente para impulsar el turbogenerador. Después de atravesar la turbina de vapor, es evacuado a baja presión y menor temperatura hacia el condensador (entre 0,1 y 0,2 [bar]). El agua pasa a través del desaireador para remover los gases no condensables (oxígeno y dióxido de carbono) y finalmente se bombea hacia el economizador otra vez cerrando el ciclo.

En sistemas térmicos de tratamiento de residuos, se recomienda una caldera de tipo horizontal para facilitar la limpieza y mantenimiento. Como norma general, el material de los tubos de intercambio de calor es metal Inconel o bien recubiertos por este material a fin de soportar las altas temperaturas. Los sobrecalentadores son normalmente fabricados a base de metal al carbono.

2.7.4.1. Desaireador

Equipo encargado de la captación y remoción del oxígeno disuelto en el agua. Para ello se utilizan generalmente sulfitos (sales que contienen el anión SO_3^{2-}) por poseer corto tiempo de reacción y bajo costo. Sin embargo, la reacción produce material sólido que puede limitar la eficiencia de la caldera. Normalmente esta técnica se aplica en sistemas que operan bajo los 20 [bar]. Para sistemas de alta presión se utiliza hidracina (N_2H_4), compuesto inorgánico de alta toxicidad que reacciona con el oxígeno para formar agua y nitrógeno gaseoso según la ecuación



2.7.5. Corrosión

La corrosión es la oxidación electroquímica de las superficies metálicas. Este fenómeno es de importancia en cualquier planta térmica, sin embargo es aún más relevante en una PVT de RSM ya que los residuos contienen un alto nivel de sulfuros, metales pesados y cloro en comparación con los combustibles convencionales. Durante la combustión estos compuestos reaccionan para formar HCL, NaCl, KCl, ZnCl_2 , PbCl_2 y otros compuestos dañinos [39] que condensan y se depositan en las superficies acelerando el proceso de corrosión. Factores que aumentan la corrosión son las altas temperaturas, mayor tiempo de residencia y elevada presión.

Aunque mayor presión y temperatura promueve la corrosión de los materiales, al mismo tiempo mejora la eficiencia de conversión energética. Por lo tanto, se ha encontrado que para incineradores de RSM tradicionales la temperatura óptima está en el rango 400-425 [°C] a una presión de 40-50[bar] [40].

Para disminuir los efectos de corrosión sobre el material es necesario proteger las superficies con materiales refractantes y de ser posible disminuir los niveles de oxígeno en la cámara de combustión y de cloruro en el agua. Adicionalmente, la temperatura de los gases emitidos debe considerar el punto de rocío de ácido que normalmente se sitúa entre los 130-140C. Para temperaturas menores se corre riesgo de que los ácidos en estado gaseoso se condensen y generen corrosión en la chimenea.

2.7.6. Pretratamiento de los residuos

El sistema de pretratamiento de los residuos (SPR) consiste en una serie de pasos previos al tratamiento térmico. Su finalidad es eliminar aquellos materiales que no aportan poder calorífico y obtener un combustible más homogéneo para alimentar la caldera de poder. En el proceso, se pueden recuperar metales con valor comercial que representan ingresos adicionales para la planta.

A continuación, la Figura 22 presenta un esquema que ilustra el proceso de pretratamiento. La eficiencia de recuperación de metales en este proceso se aproxima a 50%.

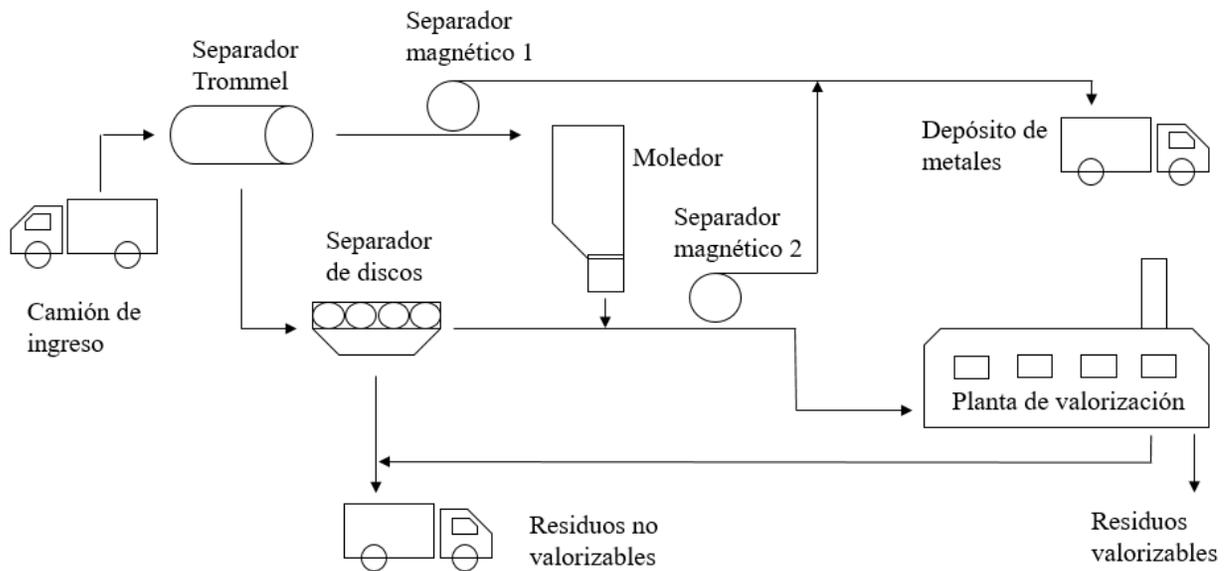


Figura 22: Esquema de sistema de pretratamiento de residuos. Fuente: Elaboración propia.

2.8. Aspectos regulatorios y medioambientales

El marco normativo en Chile respecto a residuos sólidos, data del año 1968 con la dictación del Código Sanitario el cual impone normativas relacionadas con el fomento, protección y recuperación de la salud de los habitantes y regula aspectos específicos asociados a higiene y seguridad del ambiente y de los lugares de trabajo. Con la dictación de la Ley 20.417, se crea el Superintendencia del Medio Ambiente, la que tiene por función la fiscalización de dichas normas.

De acuerdo a lo establecido en la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, una instalación como la que analiza este trabajo corresponde a la tipología “Centrales generadores mayores a 3 MW” y es además susceptible a causar impacto ambiental al ubicarse cerca de la población. Por lo tanto, es necesario la confección de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) previo a su construcción.

Al presentar el EIA el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) tiene un plazo de 127 días para pronunciarse sobre el estudio. En los primeros 60 días cualquier persona natural o jurídica puede formular observaciones al proyecto. En caso de ser aprobado, se entrega la Resolución de Calificación Ambiental (RCA). En el caso contrario, es posible presentar un nuevo EIA. Dicho estudio debe incluir un plan de participación ciudadana donde se describan las acciones relacionadas con consultas o encuentros con organizaciones ciudadanas o personas afectadas por el proyecto. Cabe señalar que por disposición del Ministerio del Medio Ambiente, habrá una revisión obligatoria de todas las normas de calidad ambiental y de emisión al menos cada cinco años [41].

2.8.1. Emisiones atmosféricas

El Decreto Supremo N° 138 del Ministerio de Salud establece la obligación de declarar los siguientes contaminantes:

- a) Ácido sulfúrico/Sulfuro de hidrógeno (o TRS).
- b) Arsénico (As).
- c) Benceno (C₆H₆).
- d) Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).
- e) Dibenzofuranos policlorados (PCDF).
- f) Dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD).
- g) Dióxido de carbono (CO₂).
- h) Metano (CH₄).
- i) Monóxido de carbono (CO).
- j) Material particulado (MP).
- k) Nitrito, Nitrato y Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- l) Nitrógeno amoniacal (o NH₃).
- m) Partículas totales suspendidas (PTS).
- n) Plomo (Pb).
- o) Óxidos de azufre (SO_x).
- p) Tolueno/ metilbenceno/ Toluol/ Fenilmetano.
- q) Mercurio (Hg).

Las principales emisiones atmosféricas para instalaciones de incineración, corresponden regularmente a material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). La metodología general [42] empleada para la estimación de emisiones atmosféricas de cualquier se basa en la ecuación (14).

$$E = Na * fe * \left(1 - \frac{Ea}{100}\right) \text{ [g/periodo]} \quad (14)$$

Donde:

E=Emisión.

Na=Nivel de actividad/tiempo [parámetro/periodo].

fe= factor de emisión [g/parámetro].

Ea=Eficiencia de abatimiento [%].

2.8.1.1.Cantidades máximas en el efluente

La Región Metropolitana fue declarada el año 1996 como zona saturada por ozono (O₃), material particulado respirable, partículas totales en suspensión y monóxido de carbono (CO), y zona latente por dióxido de nitrógeno (NO₂). Lo anterior impone exigencias especiales en cuanto a emisiones atmosféricas.

Una planta de valorización térmica de RSM clasifica como instalación de incineración y se rige por el Decreto 29 publicado el 2013 por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) el cual establece la Norma de Emisión para Incineración, Coincineración y Coprocesamiento [43]. Dicha norma aplica para todo el país y define como Combustible Tradicional variados productos derivados del petróleo y combustibles sólidos de uso común como carbón y otros. Por lo tanto, los RSM califican como Combustible no Tradicional [44].

La Tabla 18 presenta los valores límite de emisión atmosférica para instalaciones de incineración. Es importante notar que la norma de emisión para incineradores es más estricta que las normas de calidad del aire vigentes para centrales termoeléctricas tradicionales.

Tabla 18: Valores límites de emisión para la incineración en Chile. Fuente [43].

Contaminante	[mg/Nm³]
Material Particulado (MP)	30
Dióxido de azufre (SO ₂)	50
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	300
Carbono Orgánico Total (COT)	20
Monóxido de Carbono (CO)	50
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal (Cd)	0,1
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal (Hg)	0,1
Berilio y sus compuestos, indicado como metal (Be)	0,1
Plomo (Pb) + Zinc (Zn) y sus compuestos, indicado como metal, suma total	1
Arsénico (As) + Cobalto (Co) + Níquel (Ni) + Selenio (Se) + Telurio (Te) y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	1
Antimonio (Sb) + Cromo (Cr) + Manganeso (Mn) + Vanadio (V)	5
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico (HCl)	20
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico (HF)	2
Benceno (C ₆ H ₆)	5
Dioxinas y furanos TEQ ²	0,2 ng/Nm ³

Los valores límite de emisión establecidos en la Tabla 18 están referidos a un contenido de oxígeno en los gases, según lo señalado en la Tabla 19. Las metodologías particulares de medición para partículas y gases se indican en el Anexo A.

Tabla 19: Contenido de oxígeno de referencia en los gases de emisión. Fuente: [43]

Tipo de sustancia o material a incinerar	% de Oxígeno
Sustancias líquidas	3%
Sustancias gaseosas solas o combinadas con sustancias líquidas	3%
Materiales sólidos solos o combinados con sustancias líquidas o gaseosas	11%

² TEQ: Factor tóxico equivalente para mamíferos de la Organización Mundial de Salud 1998

Si el contenido de oxígeno medido es distinto al estipulado en la Tabla 19, las concentraciones medidas se deberán corregir según lo establece la ecuación (15).

$$C_c = \frac{C_m(21 - \% \text{ de oxígeno normado según Tabla 19})}{(21 - \% \text{ de oxígeno medido})} \quad (15)$$

Donde:

C_c = concentración de contaminante corregida a % de oxígeno normado.

C_m = concentración de contaminante medida.

El titular de la instalación debe presentar por única vez un Plan de Monitoreo ante la Superintendencia del Medio Ambiente, el cual contiene el conjunto de acciones a desarrollar para el cumplimiento de los requerimientos de monitoreo y medición del Decreto 29 del MMA.

La estimación de emisiones en las centrales de generación eléctrica es realizada a partir de los resultados de emisiones medidas por laboratorios autorizados por el MINSAL. De no contarse con muestreos se usan factores de emisión [42]. En enero de cada año se debe generar un Informe Anual con información relacionada a los tipos de sustancias o materiales procesados, los resultados de las mediciones discretas y continuas, las condiciones de operación de la instalación, más un resumen de las situaciones anormales de funcionamiento y medidas aplicadas.

2.8.1.2. Sistema de medición continua

Las instalaciones sometidas al Decreto 29 deben someterse a mediciones atmosféricas una vez al año. Sin embargo, se establece la necesidad de contar con un sistema de medición de tipo continuo en la chimenea de evacuación de gases de combustión para los siguientes parámetros.

- a) Material particulado (MP).
- b) Monóxido de carbono (CO).
- c) Dióxido de azufre (SO₂).
- d) Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- e) Temperatura (°C).
- f) Oxígeno (O₂).

Se considerará sobrepasada la norma de emisión respecto a los parámetros que se deben medir en forma continua si el percentil 95 de los valores horarios de emisión es mayor al valor establecido en la Tabla 19. También se considera sobrepasa la norma si cualquier valor medio horario es mayor a valor absoluto establecido en la Tabla 19 multiplicado por 1,25.

Se entiende por percentil 95 el valor que, ordenadas y numeradas las muestras efectivamente medidas de menor a mayor, se ubica en la posición del número entero más próximo a la posición 95 de 100. Su cálculo se puede formular como sigue:

El valor medido se redondea al [mg/Nm³] o [ng/Nm³] más próximo. Todos los valores se ordenan de forma creciente.

$$X_1 < X_2 < \dots < X_{N-1} < X_N$$

El percentil será el valor del elemento de orden “k” para el que “k” se calcula por medio de la ecuación (17).

$$k = q * N \quad (16)$$

Así por ejemplo; el Percentil 95 de una muestra de 100 elementos se tiene que $q=0,95$ para el Percentil 95 y N corresponde al número de valores efectivamente medidos. El costo estimado de un sistema de medición continua para centrales chilenas considerando medición de gases, material particulado y mercurio es de 426.000 [USD] [45].

2.8.1.3. Condiciones de operación

La norma indica que la temperatura mínima de los gases en la zona de combustión debe ser de 850 [°C]. En el caso de que se procesen sustancias o materiales con más de 1% de cloro en el peso, la temperatura mínima será de 1100 [°C]. De ser este el caso, la norma también indica que se deberá reducir al mínimo técnicamente posible el tiempo de enfriamiento de los gases de emisión desde los 400 [°C] hasta los 200 [°C]. El tiempo mínimo de residencia de los gases de combustión bajo las temperaturas señaladas es de 2 [s].

2.8.1.4. Medidas de mitigación

A continuación se presentan las principales medidas de mitigación para los principales contaminantes gaseosos que se encuentran en los gases de emisión. Las medidas primarias de mitigación son aquellas que se aplican en la etapa de combustión.

Material particulado (MP)

- a) Precipitadores electrostáticos (ESP): Las partículas son atraídas a las paredes o platos del equipo por fuerzas electrostáticas, luego se limpia la superficie por agitación. Ocasionalmente se utiliza un equipo de acondicionamiento de gas para aumentar la eficiencia de remoción que va desde 80% a 99,9% y el rango de tamaño de las partículas se concentra entre 1 [µm] y 10 [µm]. Los hay secos y húmedos.
- b) Filtros de telas: La corriente gaseosa pasa a través de la tela donde las partículas quedan atrapadas, la cantidad y tamaño de las partículas capturadas dependerá de la porosidad del material y la presión del gas. En general captura partículas de menor tamaño que los precipitadores electrostáticos. Pueden ser en forma de lechos o de mangas. Los primeros se emplean para limpiar gases con bajas concentraciones de MP durante largos periodos. Los filtros de mangas son más utilizados ya que alcanzan eficiencias de elevadas de 95% a 99,95% pero sufren más desgaste por lo que deben sustituirse con más frecuencia.
- c) Lavadores de gases (*Scrubber*): Equipo que además de remover MP normalmente también absorbe otros contaminantes gaseosos como SO₂, HCl y Hg. El equipo posee una superficie húmeda donde los contaminantes son capturados por los mecanismos de Impactación (impacto directo con la superficie), difusión (movimiento browniano) e intercepción y/o absorción de las partículas sobre pequeñas gotas de líquido. Distintas tecnologías de lavadores pueden ser

aplicadas, siendo las torres de aspersión Venturi la más común para partículas de diámetro entre $0,5[\mu\text{m}]$ a $5[\mu\text{m}]$ y una eficiencia cercana a 99%. Para lavadores de gases sin recirculación de agua, se deben tener precauciones en su eliminación ya que esta resulta ser altamente ácida. El proceso ayuda también a bajar la temperatura del gas, lo que aporta a reducir la pluma de vapor. En Figura 23 se observa la configuración de un lavador de gases.

- d) **Ciclones o separadores inerciales:** Utiliza fuerza centrífuga para separar el MP. Las partículas de mayor masa adquieren inercia y chocan contra las paredes y caen hacia un contenedor cónico mientras que el gas tratado escapa por el centro del ciclón. Se emplea para remover partículas gruesas y de tamaño medio superior a $10[\mu\text{m}]$, posee una eficiencia entre 70% a 90%.
- e) **Otras medidas:** Para mitigar emisiones fugitivas provenientes de la zona de acopio y alimentación, se debe considerar un diseño que proteja del viento e idealmente una edificación cerrada con presión negativa.

Dióxido de azufre (SO_2)

- a) **Desulfuración por vía húmeda (*Wet FGD*):** En el lavador de gases, estos se saturan con agua y se utiliza piedra caliza (carbonato de calcio, CaCO_3) como reactivo con el objetivo de transformar el dióxido de azufre a yeso (sulfato de calcio, CaSO_4). La eficiencia de remoción puede ser levemente superior a 90%.
- b) **Desulfuración en seco:** Se utiliza cal (óxido de calcio, CaO) como reactivo para transformar el SO_2 a azufre en fase sólida (sulfito de calcio, CaSO_3). El proceso también genera otros residuos tales como la mezcla de cenizas volantes y aditivos sin reaccionar. La eficiencia de remoción generalmente se encuentra el 80% para equipos tradicionales y 90% en equipos nuevos.
- c) **Desulfuración por vía semiseca:** Similar a la Desulfuración por vía húmeda, consiste en el abatimiento del SO_2 mediante la reacción con cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- d) **Desulfuración con agua de mar:** Se utiliza agua de mar para absorber y neutralizar el SO_2 , transformándolo en sulfatos disueltos, los cuales son devueltos al mar. Los sulfatos son compuestos presentes de forma natural en el medio marino.

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

- a) **Sistema de reducción selectiva (*SCR*):** Reduce químicamente los NO_x a nitrógeno molecular (N_2) y vapor de agua mediante la aplicación de urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) o amoníaco (NH_3). Mediante el uso de catalizadores se puede alcanzar una eficiencia entre 80% y 95% sin embargo estos pueden contener metales pesados por lo que se deben tener precauciones en su eliminación.
- b) **Sistema de reducción selectiva no catalítica (*SNCR*):** Reduce químicamente los NO_x a nitrógeno molecular (N_2) y vapor de agua mediante la aplicación de urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) o amoníaco (NH_3). Este sistema no utiliza catalizador, por lo cual la reacción se produce a mayor temperatura que el SCR y la eficiencia se encuentra entre el 30% y 50%. SNCR es más económico que SCR.
- c) **Controles de combustión:** Se refiere a reducir la generación de óxidos de nitrógeno en la etapa de combustión mediante combustión por etapas, bajo exceso de aire y recirculación del gas de

combustión. Estos sistemas se conocen con el nombre de *low NOx* y en caso de que existan quemadores *low NOx* en la caldera, se elige usar SCR cuando la eficiencia de abatimiento requerida es mayor a 50% y SNCR cuando no lo es [45].

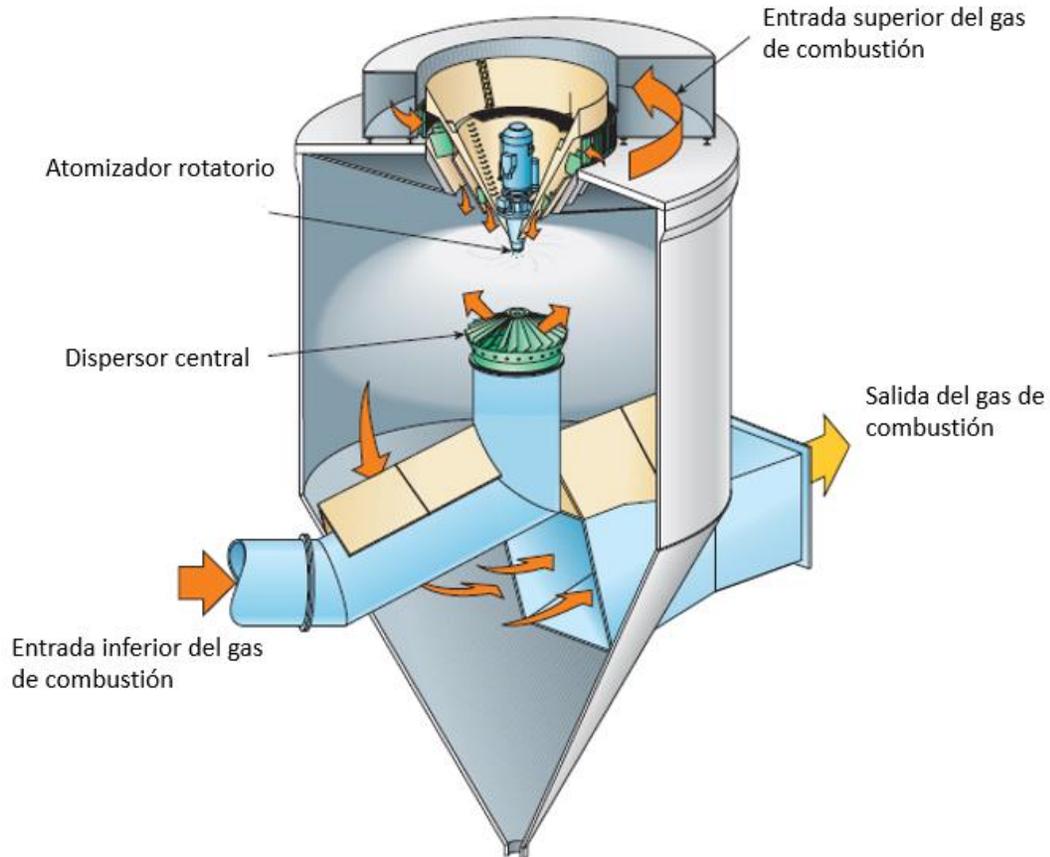


Figura 23: Lavador de gases. Fuente: Adaptado de [39].

2.8.1.5. Bonos de carbono

En 1992, 195 países se reunieron en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), posteriormente en 1997 nace el protocolo de Kyoto, acuerdo internacional que compromete a las naciones ratificantes a reducir sus emisiones o contribuir a ello según su situación económica. Además, crea un mecanismo para transar a nivel mundial Reducciones Certificadas de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (CERs por sus siglas en inglés), también denominadas bonos de carbono, promoviendo proyectos innovadores en materia de captura y reducción de GEI.

En particular, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) permite que países desarrollados compren bonos de reducción de emisiones generados en un país en desarrollo como Chile a fin de cumplir con su cuota de reducción. La autoridad asignada en Chile es el Ministerio del Medio Ambiente. Se reconocen seis gases a reducir.

Tabla 20: Equivalencia en CO₂e de GEI. Fuente: ProChile [46].

GEI	Índice GWP-CO ₂ e
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Óxido Nitroso (N ₂ O)	310
Hidrofluorocarbonos (HFC)	740
Perfluorocarbonos (PFC)	1.300
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	23.900

Chile se posiciona como el séptimo país con mayor oferta de proyectos MLD, sin embargo los valores de los bonos a disminuido dramáticamente en los últimos años, lo que afecta directamente la rentabilidad de proyectos limpios. Adicionalmente, la Unión Europea, el principal comprador de bonos de carbono, ha decidido que solo adquirirá de países menos desarrollados, excluyendo a Chile [47]. Por lo anterior y en base a los valores informados por el banco mundial, este trabajo considera que el valor de los bonos de carbono es 8 [USD] por tonelada de CO₂e.

La fórmula de cálculo para emisiones de CO₂ equivalente propuesta por la IPCC [48] se muestra en la ecuación (17).

$$Gf = Ef * Effic * FOC * \frac{44}{12} [ton] \quad (17)$$

Donde:

Gf : Emisiones de carbono equivalente [ton].

Ef : Energía consumida [MWh].

Effic : Factor de emisión [ton CO₂e/MWh].

FOC: Fracción de carbono oxidado=1.

2.8.1.6. Futuro impuesto al CO₂

En el mercado eléctrico chileno, el 58% % de la capacidad instalada corresponde a plantas térmicas a base de combustibles fósiles como carbón, petróleo diésel y gas natural, lo que equivale a 11.984 [MW] de los 20.662 [MW] instalados en todo el país. En este escenario, la ley 20.780 publicada el año 2014 introduce una reforma tributaria donde se incluye un impuesto anual que gravará las emisiones al aire de dióxido de carbono producidas por establecimientos cuyas calderas o turbinas sumen una potencia mayor a 50 [MWt]. El impuesto será de 5 [USD] por cada tonelada de CO₂ emitida y comenzará a regir desde el año 2017.

El impuesto a las emisiones de dióxido de carbono no aplicará para fuentes fijas ERNC cuya fuente de energía primaria sea la biomasa, por lo que las centrales que se estudian en este trabajo no están afectas a este impuesto. El objetivo del impuesto es reducir el uso de combustibles fósiles para incentivar proyectos limpios. Sin embargo algunos critican que el costo adicional del impuesto solo será traspasado a los consumidores.

2.8.2. Ruido

La emisión de ruidos provenientes de la instalación debe cumplir con el Decreto 38 [49], titulado Norma de Emisión de Ruidos Generados por Fuentes que Indica. La norma define cuatro zonas territoriales ubicadas dentro del límite urbano que se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21: Descripción de Zonas territoriales según Decreto 39.

Zona	Descripción
I	Permite exclusivamente uso de suelo residencial o bien este uso de suelo y alguno de los siguientes usos de suelo: Espacio Público y/o Área Verde.
II	Permite además de los usos de la Zona I, Equipamiento de cualquier escala
III	Permite además de los usos de la Zona II. Actividades Productivas y/o de Infraestructura.
IV	Permite solo usos de suelo de Actividades Productivas y/o de Infraestructura.
Rural	Ubicada al exterior del límite urbano establecido en el Instrumento de Planificación respectivo.

Adicionalmente, se establecen los siguientes términos:

a) Nivel de Presión Sonora (NPS):

$$NPS = 20 \text{ Log} \left(\frac{P_1}{P} \right) \text{ [dB]} \quad (18)$$

Donde P_1 es el valor de la presión sonora medida y P es el valor de la presión sonora de referencia, fijado en $2 \times 10^{-5} \left[\frac{N}{m^2} \right]$.

- b) Nivel de Presión Sonora Corregido (NPC): Nivel de presión sonora continuo equivalente, que resulta de aplicar el procedimiento de medición y correcciones establecidas en el Decreto 38.
- c) Ruido de Fondo: Es aquel ruido que está presente en el mismo lugar y momento de medición de la fuente que se debe evaluar, en ausencia de esta.

La Tabla 22 da cuenta de los valores máximos permisibles de presión sonora para una fuente emisora ubicada en una zona urbana.

Tabla 22: Niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos según decreto 38.

Zona	De 7:00 a 21:00 horas	De 21:00 a 7:00 horas
I	55 [dB]	45 [dB]
II	60 [dB]	45 [dB]
III	65 [dB]	50 [dB]
IV	70 [dB]	70 [dB]

Para el caso de la Zona Rural, la norma establece que los niveles máximos de presión sonora corregidos (NPC) se limitaran por el menor valor entre:

- a) Nivel de ruido de fondo + 10 [dB].
- b) NPC para Zona III de la Tabla 22.

Las principales fuentes de ruido son las siguientes:

- a) Vehículos de transporte.
- b) Pretratamiento o movimiento previo de los residuos.
- c) Ventiladores y compresores.
- d) Sistema de refrigeración.
- e) Turbina y generador.

Los equipos rotatorios; turbina, generador y ventiladores son los que presentan mayor ruido y vibraciones por lo que deben situarse en una estructura cerrada. El Estudio de Impacto Ambiental debe considerar una evaluación acústica para la etapa de construcción y operación. Adicionalmente, el D.S. N° 594 del Ministerio de Salud, publicado el año 2000, establece las condiciones laborales relativas al ruido cuando la planta esté en operación.

2.8.3. Normativa medioambiental

A continuación se exponen normas medioambientales adicionales que aplican para instalaciones de este tipo:

- a) Decreto 138, publicado el 17 de noviembre de 2005. Ministerio de Salud y la Subsecretaria de Salud Pública. Establece obligación de declarar emisiones que indica.
- b) Decreto 1. Publicado el 2 de mayo de 2013. Ministerio del Medio Ambiente. Aprueba el reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC).
- c) Decreto 55, publicado el 16 de abril de 1994. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Establece normas de emisión aplicables a vehículos motorizados pesados que indica.
- d) Decreto 144, publicado el 18 de mayo de 1961. Ministerio de Salud. Establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza.
- e) Decreto 594, publicado el 29 de abril de 2000. Ministerio de Salud. Establece reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.
- f) Decreto 10, publicado el 19 de octubre de 2013. Ministerio de Salud y la Subsecretaria de Salud Pública. Establece Reglamento de calderas, autoclaves y equipos que utilizan vapor de agua.
- g) Decreto 148, publicado el 16 de junio de 2004. Ministerio de Salud. Sobre reglamento sobre manejo de residuos peligrosos.

2.8.4. Normativa adicional

- a) Decreto N° 458. Publicado el 13 de abril de 1976. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Sobre Ley General de Urbanismo y Construcción.

- b) Decreto N°47. Publicado el 5 de junio de 1992. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Fija Nuevo Texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones.
- c) En el caso que se supere la generación de 60.000 [ton/año], se deben considerar los Decretos Supremos N° 18 y N° 474 del Ministerio de Obras Públicas.
- d) Decreto N°160, publicado el 7 de julio del 2009. Ministerio de Economía, fomento y reconstrucción. Sobre reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos.

3. Análisis técnico

3.1. Descripción general y supuestos

3.1.1. Poder calorífico

En base a la información de la Tabla 2 y Tabla 10 se calcula el poder calorífico estimado para los residuos de la Región Metropolitana. Se pondera el poder calorífico con el porcentaje que posee cada fracción de material. Para la fracción denominada otros, si utiliza el poder calorífico promedio de un estudio realizado en Santiago [23] de 10.200 [kJ/kg] equivalente a 2,83 [MWh/Ton]. Además metales y vidrios se consideran con aporte calórico nulo.

Tabla 23: Poder calorífico RSM Región Metropolitana.

Fracción	Porcentaje	LHV [MWh/ton]
Materia orgánica	50,1%	0,53
Plásticos	10,6%	5,6
Papel y cartón	17,4%	1,79
Vidrios	3,9%	0
Metales	1,1%	0
Telas	3,6%	3,27
Otros	13,3%	2,83
Total	100%	1,67

De la Tabla 23 se extrae que el poder calorífico de los RSM en la región Metropolitana es 1,67 [MWh] por tonelada. Este valor se sitúa bajo el poder calorífico de los RSM en Austria pero sobre el poder calorífico de los RSM en China.

3.1.2. Tasas de cambio

Para efectos de cuantificar el aporte de cada ítem del proyecto en la evaluación económica se consideran las tasas de cambio expuestas en la Tabla 24. Estas tasas son usadas para estimar los montos en dólares estadounidenses (USD).

Tabla 24: Tasas de cambio de unidades monetarias.

Unidad monetaria	Equivalente en CLP
Dólar estadounidense (USD)	\$690
Euro (€)	\$740
Unidad de Fomento (UF)	\$26.000
Unidad Tributaria Mensual (UTM)	\$46.000

3.2. Tecnología óptima para Santiago

El análisis que prosigue se hace sobre la base de dos casos de estudio. El primero (Caso 1) consiste en la instalación de una planta de valorización térmica de RSM dentro del radio urbano de Santiago, mientras que en el segundo (Caso 2) supone que la planta debe ubicarse en los alrededores de la ciudad.

Caso 1

Dentro del radio urbano la planta está a la vista de las personas, por lo tanto, requiere un diseño compacto y visualmente poco invasivo. Además el movimiento de residuos desde y hacia la instalación se limita por las vías de acceso al lugar y normas de vialidad que podrían aplicar en cada comuna. Se sabe que las estaciones de transferencia que se ubican en el radio urbano de Santiago sufren constantemente quejas por parte de la comunidad cercana a ella referente a la liberación de líquidos desde los camiones recolectores y los malos olores que ellos producen.

Las molestias se intensifican cuando se forma una línea de espera fuera de la estación.. El estado de descomposición y humedad de los residuos aumenta su hedor. En consecuencia, es deseable que la instalación del Caso 1 enfoque el tratamiento a residuos con lenta tasa de descomposición y baja humedad. Ejemplos de residuos adecuados según este criterio son materia vegetal proveniente de podas municipales, papeles, textil, caucho y asimilables.

Considerando lo anterior y teniendo presente la información expuesta en la sección 2.5, la tecnología de gasificación resulta más idónea que la incineración en todas sus formas ya que las instalaciones de gasificación comercialmente operativas son de menor tamaño y el nivel de emisiones es también inferior.

Dentro de las tecnologías de gasificación, aquella que presenta mayor rendimiento y menores impactos ambientales es la tecnología de gasificación por antorcha de plasma. Se escoge entonces para este caso la configuración gasificación por antorcha de plasma, en concreto con antorcha DC de arco no transferido por ser la modalidad que se encuentra en uso comercialmente. Respecto a la ubicación, se considera su construcción en la comuna de Renca en el terreno donde se encuentra la central termoeléctrica Renca. Esto a fin de comparar los beneficios sociales y ambientales de la PVT de RSM con respecto a la central Renca. No obstante, otros potenciales lugares son propuestos en el numeral 3.3.

Caso 2

En este caso se busca una instalación que se ubique fuera del radio urbano por lo que el criterio de reducir espacio e impacto visual se relaja. Existen instalaciones de recuperación energética en Santiago que se ubican en los rellenos sanitarios para aprovechar el biogás que de ellos se emite. Estas instalaciones generan energía eléctrica y la transportan por sus líneas de transmisión hasta los centros de consumo.

Según lo anterior, es conveniente ubicar una PVT de RSM en las proximidades del relleno sanitario para asegurar el flujo de combustible, sobre todo en instalaciones de gran tamaño. En este sentido, para el Caso 2 se escoge construir la planta en los alrededores del relleno sanitario Santa Marta en la comuna de Talagante por su relativa cercanía a la ciudad, disponibilidad de redes eléctricas de

transmisión y cercanía a la cuenca del río Maipo, que permite la instalación de pozos profundos para extracción de agua.

Al no existir restricciones fuertes de espacio e impacto visual y poseer combustible disponible en grandes cantidades, se opta por evaluar una planta de incineración.

Dentro de las variedades de incineración, se escoge la configuración de lecho fluidizado por su mayor eficiencia y menores emisiones. La instalación requiere pretratamiento de los residuos expuesto en el numeral 2.7.6 para disminuir el tamaño del material y eliminar materiales que por su volumen y composición no aportan poder calorífico.

La Tabla 25 resume las características establecidas para ambos casos. En base a estas suposiciones se desarrollan las secciones que siguientes.

Tabla 25: Características principales para los casos de estudio.

	Caso 1	Caso 2
Tecnología	Gasificación por antorcha de plasma DC no transferido Marc 11	Incineración de lecho fluidizado
Capacidad	200 [ton/día]	1100 [ton/día]
Ubicación	Termoeléctrica Renca	Relleno sanitario Santa Marta
Pretratamiento	Sí	Sí
Distancia a relleno sanitario	32 [km] a Santiago Poniente	Junto a relleno sanitario Santa Marta
Puede tratar RSI	Sí	No
Puede tratar residuos peligrosos	Sí	No
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Reducido tamaño. • Residuos inertes. • Flexibilidad. • Menores emisiones. • Posibilidad de acumular y refinar el <i>syngas</i> para otros usos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran capacidad. • Menor costo relativo de inversión. • Tecnología madura

3.3. Ubicación

Resulta interesante analizar los factores que determinan potenciales lugares para instalar una PVT de RSM. Dado el sistema actual de recolección, transporte y disposición de residuos en Santiago, las municipalidades son los actores principales para determinar la forma en que se tratan los residuos de cada comuna. Aquellas con alta generación de basura y alejadas de centros de disposición final debieran ser prioritarias para la instalación de PVT. Sin embargo, por la alta inversión que una planta significa, es probable que las municipalidades con menores recursos no consideren el tratamiento térmico como una opción viable.

Por otra parte, algunas municipalidades como Vitacura y Providencia a través de sus estrategias energéticas locales demuestran interés en iniciativas para el tratamiento de sus residuos. En consecuencia, la ubicación dependerá en gran parte de la situación y disposición de las municipalidades además de la percepción de la comunidad.

Una PVT de RSM dentro de la ciudad debe considerar los siguientes factores claves para definir la ubicación óptima:

- a) Cercanía a centros de generación de RSM.
- b) Condiciones meteorológicas de ventilación.
- c) Vías para camiones o tren.
- d) Acceso a cursos de agua.
- e) Acceso a redes eléctricas.

La ubicación tiene especial relevancia en la ciudad de Santiago debido a que su geografía favorece la acumulación de contaminantes atmosféricos. Los factores meteorológicos son en general desfavorables a la dispersión de contaminantes atmosféricos, especialmente durante la época invernal. La ventilación se produce desde el sector poniente por la interrupción de la cordillera de la costa de aproximadamente 50 [km] por donde drena el río Maipo [50]. En condiciones de alta concentración de contaminantes, el sector poniente resulta más afectado como se observa en la Figura 24. Se observa que la zona oriente registra mejores condiciones de contaminación que la zona poniente.

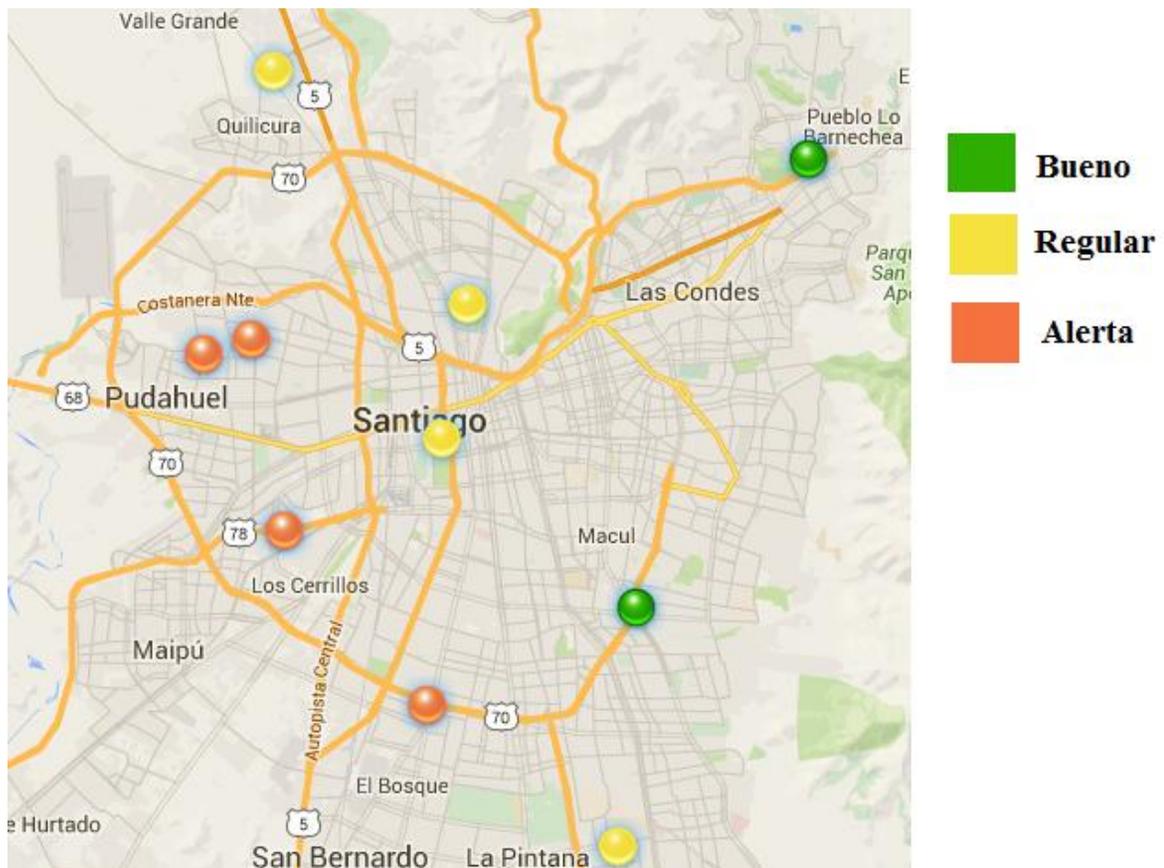


Figura 24: Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Santiago. Fuente [51].

Se proponen cuatro áreas dentro de la ciudad identificadas en la Figura 25 con las letras “a”, “b”, “c”, “d”. “e” y “f” en la Figura 25. Los puntos “d” y “f” apuntan las ubicaciones de las estaciones de transferencia Puerta Sur y Cerros la Leona respectivamente. En las estaciones de transferencia se reciben camiones recolectores de varios municipios y privados que traspasan sus residuos a camiones de mayor capacidad de carga para efectuar el transporte hasta los rellenos sanitarios. Ambos sectores son zonas industriales exclusivas.

La ubicación “e” corresponde a la central termoeléctrica Renca de 100 [MW] y es la ubicación de la planta del Caso 1. Dicha termoeléctrica opera desde el año 1962, en un principio a base de carbón y actualmente con dos turbinas diésel. Su operación resulta cara para el sistema porque posee costos de generación mayores al costo marginal promedio en su barra.

Las líneas expuestas en la Figura 25 siguen la siguiente designación:

- a) Azul: Curso de agua.
- b) Rojo: Líneas eléctricas de transmisión de 500 [kV].
- c) Verde: Líneas eléctricas de transmisión de 220 [kV].
- d) Naranja: Líneas eléctricas de transmisión de 110[kV].

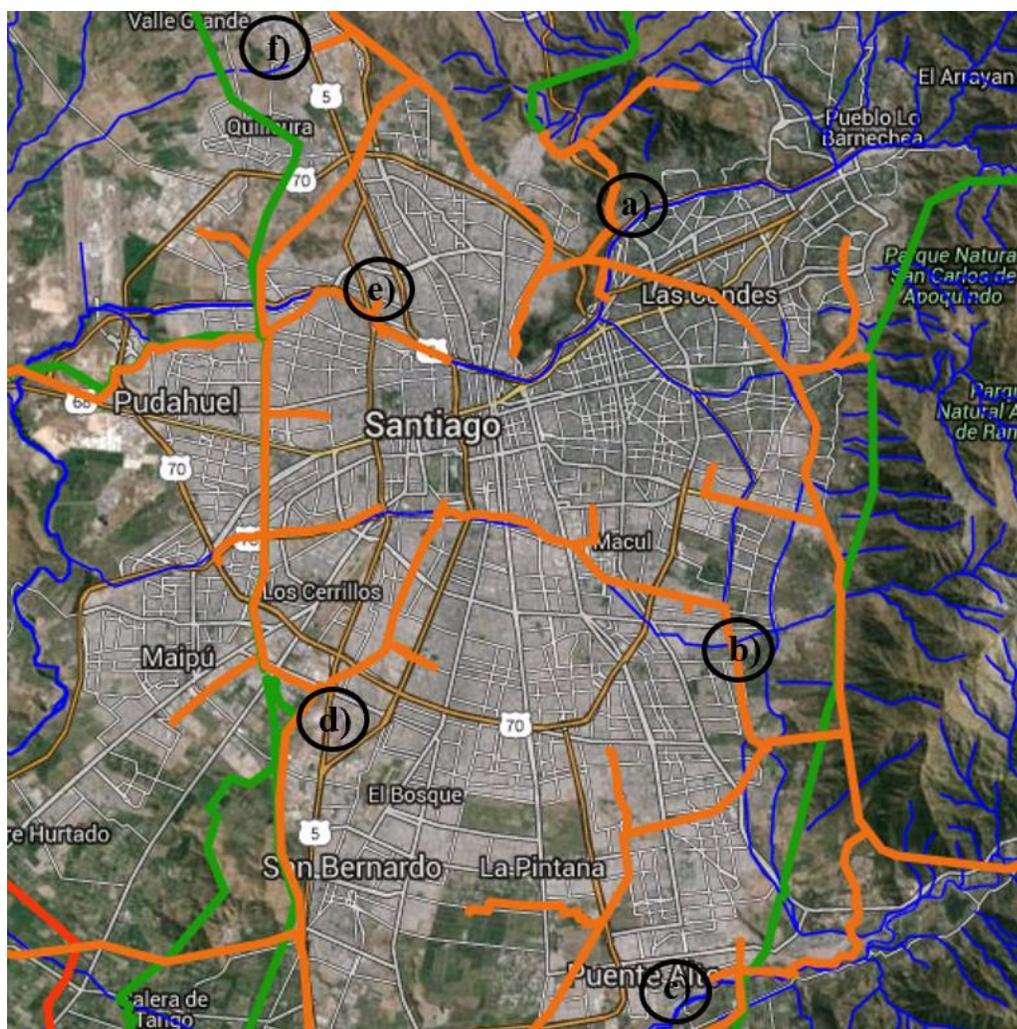


Figura 25: Ubicaciones propuestas para proyecto de valorización térmica de RSM. Fuente: Adaptado de [52].

En la Tabla 26 se nombran las comunas, los accesos para vehículos de transporte y velocidad media del viento en el mes invernal de agosto a 95 [m] de altura para cada área señalada en la Figura 24. La medición de velocidad el viento se obtuvo desde el explorador eólico de la Universidad de Chile [53]. Se escoge agosto por ser un mes de invierno y se mide a 95 [m] para simular la altura de salida de los gases por la chimenea.

Tabla 26: Comuna, vía de acceso y velocidad el viento en ubicaciones propuestas.

	Comuna	Vía de acceso	Velocidad del viento
a)	Vitacura	Américo Vespucio Norte	2,4 [m/s]
b)	La Florida	Tobalaba	1,9 [m/s]
c)	Puente Alto	Av. Concha y Toro	2,3 [m/s]
d)	San Bernardo	Autopista Central	2,2 [m/s]
e)	Renca	Costanera Norte	1,8 [m/s]
f)	Quilicura	Cerro Los Cóndores	2,1 [m/s]

3.4. Consideraciones de diseño

3.4.1. Antorcha de plasma DC de arco no transferido

Para una planta de 200 [ton/día] se requieren dos reactores de 100 [ton/día]. Cada reactor tiene en su base dos antorchas de plasma. Al conjunto reactor y antorchas se le llama reactor integrado. En él además de producirse el *syngas*, existen superficies intercambiadoras de calor para aprovechar la energía del proceso. En concreto, la antorcha escogida es el modelo Marc11 de 2,4 [MW] fabricada por Westinghouse por ser la de mayor potencia disponible en el mercado.

Youngchul Byun et al 2012 [54] analiza las características y comportamientos de una planta de gasificación por plasma de RSM de 10 [ton/día] con antorcha DC de arco no transferido instalada en Chungsong, Corea del Sur. En base a su estudio, Byun propone parámetros escalables para analizar plantas de gasificación de mayor tamaño. Los valores de la Tabla 27 toman como referencia este estudio y también los datos publicados sobre la planta de gasificación por plasma Utashiani en Japón [32].

Tabla 27: Insumos y características reactor integrado de 100 [Ton/día].

Insumo o característica	Cantidad
Consumo de la antorcha	0,447 [kWh/ton]
Consumo de gas licuado	7,37 [Nm ³ /ton]
Presión del reactor	1,01 [bar]
Suministro de aire	500 [L/min] a 4,9 [bar]
Vida del electrodo	1500 [h]

El principal inconveniente de las antorchas de plasma es el desgaste de los electrodos puesto que las altas temperaturas limitan su vida útil entre 1000 y 1500 [h] [54]. Por lo tanto, es necesario reemplazarlos unas cerca de ocho veces al año con un costo estimado de 120.000 [USD/año].

3.4.2. Caldera

El calor contenido en los gases de combustión es capturado cuando este pasa a través de las distintas etapas de la caldera de recuperación de calor; economizador, evaporador y sobrecalentador. Si el flujo de gas es suficientemente alto, pueden existir niveles de presión en la caldera; de alta presión (AP), media presión (MP) y baja presión (BP).

En el Caso 1, se toma como referencia la caldera de recuperación de calor de la planta de antorcha de plasma Utashinai en Japón [32] donde el ciclo de vapor genera un flujo de 42 [ton/día] de vapor para una capacidad de 220 [ton/día] de residuos.

Para el Caso 2 se considera la caldera que está operando en la planta de cogeneración de energía eléctrica con biomasa Horcones con 31 [MW] de potencia nominal. Esta caldera de poder, modelo HYBEX fabricada por METSO Power, es de configuración de lecho fluidizado y consume aproximadamente 1000 [ton] diarias de biomasa forestal no tratada. Está diseñada para producir entre 210 y 250 [ton/h] de vapor según el poder calorífico del combustible. El vapor será usado exclusivamente para generación de energía eléctrica mediante dos turbinas de vapor que se describen en el numeral 3.4.3. Quemadores de partida alimentados con gas propano permiten el encendido de la caldera. Los insumos estimados para la operación del Caso 2 se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28: Estimación de insumos para Caso 2. Fuente: DIA Planta de biomasa Horcones.

Insumo	Cantidad
RSM	1000[ton/día]
Agua alimentación caldera	5088[ton/día]
Arena	2,4 [ton/día]
Petróleo pesado (FO6)	0-240 [ton/día]
Aceite	5000 [lt/año]
Propano	400 [lt/año]
Soda cáustica	24 [lt/año]
Ácido sulfúrico	17 [lt/año]
Electricidad (disponibilidad 90%)	39420 [MWh]

Esta caldera de poder permite tratar cerca de un tercio de los residuos recibidos en el relleno sanitario Santa Marta. Se debe tener en cuenta que mientras menor es el poder calorífico del material, mayor será la capacidad de tratamiento diaria [28]. Según los datos de la Tabla 1, los RSM poseen un poder calorífico menor que la madera, por lo tanto se estima que la instalación podrá aumentar su capacidad en 10% con respecto a la planta Horcones, es decir 1100 [ton/día]. La caldera de poder más el turbogenerador ocupa una superficie estimada de 6.000 [m²].

3.4.3. Turbina de vapor

Para el Caso 2 se tienen dos turbinas de vapor de 20 [MW] cada una. A fin de conocer las características técnicas, se toma como referencia el modelo SST-150 de Siemens. Esta turbina está diseñada para activar un generador sincrónico a 1500 [rpm] o 1800 [rpm] y presenta la ventaja de ser un modelo en paquete (*skid*) de fácil transporte. Sus características se exponen en la Tabla 29.

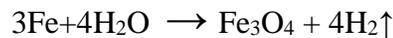
Tabla 29: Características técnicas turbina de vapor. Fuente: [55].

Característica	Valor
Potencia	Hasta 20 [MW]
Velocidad de giro	Hasta 13.300 [rpm]
Presión de entrada	Hasta 103 [bar]
Temperatura de entrada	Hasta 505 [°C]
Extracción controlada	Hasta 16 [bar]
Dimensiones	12 [m]x4[m]x5[m]

3.4.4. Tratamiento del agua

El agua que recibe una planta de incineración desde la red de agua se define como agua natural. Sus principales usos son como fluido de trabajo para la generación de vapor que impulsa la turbina de vapor, tratamiento de los gases de emisión y refrigeración. A pesar de ser tratada para su consumo o uso industrial, el agua natural puede contener compuestos orgánicos, iones inorgánicos como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^- , Cl^- , SO^{-2} , HCO_3^- y todo tipo de partículas dañinas para los materiales que componen el ciclo de agua-vapor, por lo que es necesario tratarla previo a su ingreso al sistema.

El tratamiento del agua tiene por objetivo aumentar la eficiencia en la transferencia de calor. Para ello se busca minimizar la corrosión en los conductos y reducir la deposición de sustancias en los mismos. Una reacción típica que ocurre cuando el hierro está en contacto con el agua, es la formación de una película de magnetita (Fe_3O_4) alrededor del material según la siguiente reacción.



Los tratamientos son de mayor complejidad en la medida en que se aumenta la presión y temperatura. El pretratamiento del agua natural consiste en remover calcio (Ca), magnesio (Mg) y silicio (Si). Para sistemas desmineralizados: nitratos (NO_3^-), carbonatos (CO_3^{-2}), y sulfatos (SO_4^{-2}). La captación de iones ocurre en un intercambiador de cationes y luego en un intercambiador de aniones. Ambos intercambiadores deben ser periódicamente regenerados con ácido sulfúrico para el primer caso y con hidróxido de sodio para el segundo de acuerdo a las mediciones de conductividad del agua tratada. En el caso que el vapor fuera exportado para calefacción o uso industrial, requerimientos adicionales sobre su pH y composición química podrían ser impuestos sobre el flujo de salida.

3.4.5. Compresor de aire y unidad ASU

El compresor permite inyectar aire con la velocidad necesaria a la cámara de combustión o reactor. Además permite la refrigeración de la turbina de vapor y a la vez que alimenta la Unidad de Fraccionamiento de Aire (ASU) en instalaciones de gasificación.

La ASU se compone de una serie de equipos compresores, de purificación y secado de aire que tienen por fin producir oxígeno y nitrógeno molecular para ser inyectados al proceso de gasificación del Caso 1. El arranque de la unidad exige un proceso de pre-enfriamiento mínimo de 3 horas. Se estima que en centrales de gasificación integradas con ciclo combinado, esta unidad representa entre el 10% y 15% del total de la inversión [57].

3.4.6. Dimensionamiento

Para dimensionar la planta del Caso 1 se toma como referencia es estudio de Caroline Ducharme 2010 [33] donde se establece que una planta de gasificación por plasma de similar capacidad a la que se estudia requiere 5000 [m²] de superficie. A esta superficie se adicionan 2500 [m²] para el pretratamiento de residuos y 2500 [m²] para la subestación sumando 10.000 [m²]. Por su parte, para el dimensionamiento del Caso 2 se usan como referencia las instalaciones usuales de una planta térmica de generación eléctrica que se detallan en la Tabla 30.

Tabla 30 Dimensión de edificios Caso 2.

Edificio	Dimensión [m²]
Caldera, turbogenerador y sus componentes	6000
Subestación	3000
Pretratamiento de residuos	2500
Recepción y pesaje de camiones	2000
Estacionamientos	1000
Almacén para repuestos y materiales	600
Taller mecánico	500
Nave de control	400
Recinto para el personal	200
Superficie Total	16.200 [m²]

De acuerdo a la Tabla 30 la instalación del Caso 2 contempla una superficie total de 16.700 [m²]. Al considerar que se ubica en Talagante, el valor por metro cuadrado se aproxima 13 [UF/m²]. Por otro lado, en el Caso 1, la planta se ubica en Renca donde el valor por metro cuadrado se considera igual a 25 [UF/ m²]. Con esto y en base a las tasa de cambio de la Tabla 24 se obtiene el valor a pagar por adquisición de terreno.

Tabla 31: Costos por adquisición de terreno.

	Superficie [m²]	Valor suelo [UF/m²]	Valor Total [UF]	Valor Total [USD]
Caso 1	10.000	15	150.000	5.652.170
Caso 2	16.200	4	64.800	2.441.740

3.5. Generación de energía eléctrica

Las plantas de incineración consumen grandes cantidades de energía eléctrica, aproximadamente un 20% de la energía eléctrica generada. Sin embargo, para generadores de energía renovable es conveniente inyectar al sistema la totalidad la energía generada y abastecerse desde el sistema. Las plantas se diseñan para operar de forma continua, por lo tanto pueden ser consideradas como generación de base. Sin perjuicio de lo anterior se asume una disponibilidad de 90% en ambos casos.

Caso 1

Los supuestos respecto la planta de generación por antorcha de plasma, se basan principalmente en los estudios de Caroline Ducharme, 2010 [33], Garret C. Fitzgerald, 2009 [56] y Manuel Treviño Coca, 2003 [57]. La antorcha DC de arco no transferido es capaz de convertir la energía contenida en los residuos con eficiencia de 80%. En el proceso existe además una pérdida térmica total de 22%, principalmente al enfriar el *syngas* antes de entrar a la turbina de gas. Se considera que el par turbina generador tiene una eficiencia del 50%. En base a lo anterior, la energía eléctrica generada por tonelada de residuo en el Caso 1 (E_{gen1}) se calcula como sigue.

$$E_{gen1} = 1,67 * 0,8 * 0,78 * 0,5 = 0,521[MWh/ton]$$

Por lo tanto, una tonelada de RSM es transformada en 0,501 [MWh] de energía eléctrica.

Caso 2

En el caso de la incineración por lecho fluidizado, la mayor generación de cenizas conlleva un aumento en las pérdidas térmicas por el calor que escapa con ellas. La Agencia Ambiental de Austria (Umweltbundesamt) [58], propone valores para estimar la eficiencia en plantas de incineración puramente eléctricas. En la caldera se transfiere 80% de la energía al vapor en forma de calor, luego en el ciclo de vapor se tienen pérdidas térmicas totales de 30% y finalmente el turbogenerador transforma 50% de la energía del vapor en electricidad. Según lo anterior se calcula la energía eléctrica generada por tonelada de residuo tratado (E_{gen2}).

$$E_{gen2} = 1,67 * 0,8 * 0,7 * 0,5 = 0,468[MWh/ton]$$

Las eficiencias así obtenidas se resumen en la Tabla 32.

Tabla 32: Eficiencia eléctrica Caso 1 y Caso 2.

	Eficiencia	E_{gen} [MWh/ton]	Capacidad [ton/año]	Energía anual [MWh]
Caso 1	31,2%	0,521	73.000	38.033
Caso 2	28%	0,468	401.500	187.902

3.5.1. Turbogenerador

Para determinar la potencia de generación se utiliza la información de la Tabla 32.

Tabla 33: Potencia necesaria.

	Energía anual [MWh]	Disponibilidad	Potencia ideal³ [MW]
Caso 1	38.033	90%	4,82
Caso 2	187.902	90%	23,83

³ La potencia ideal se entiende como aquella necesaria para aprovechar todo el poder calorífico de los residuos bajo los supuestos de eficiencia y disponibilidad.

En base a la Tabla 33 se intenta maximizar el factor de planta de la instalación escogiendo una capacidad instalada cercana a la potencia ideal según los turbogeneradores disponibles en el mercado. Es así que para el Caso 1 se escoge un turbogenerador de 6,25 [MVA] mientras que para el Caso se escogen dos turbogeneradores de 18,75 [MVA] (Figura 26). Ambos equipos son de 4 polos, es decir 1500 [rpm] y tensión de generación 13,8 [kV]. La Tabla 34 expone las características técnicas de los turbogeneradores para ambos casos.

Tabla 34: Características técnicas generador sincrónico.

Caso 1		Caso 2	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Potencia nominal	6,25 [MVA]	Potencia nominal	18,75 [MVA]
Factor de potencia	0,85 inductivo	Factor de potencia	0,85 inductivo
Tensión en bornes	13,8 [kV]	Tensión en bornes	13,8 [kV]
Frecuencia	50 [Hz]	Frecuencia	50 [Hz]
Velocidad sincrónica	1500 [rpm]	Velocidad sincrónica	1500 [rpm]
Refrigeración	Aire	Refrigeración	Aire-Agua



Cliente: LAGINHA AGRO INDUSTRIAL
Pais: Brasil
Suministro: 6.250 kVA, 13.800 V, 4 pólos
Aplicación: Turbina a vapor (Usina de açúcar e álcool)
Combustible: Biomassa



Cliente: UNI-SYSTEMS
Cliente final: Engenho Monte Rosa
Pais: Nicaragua
Suministro: 18.750 kVA, 13.800 V, 4 polos
Aplicación: Turbina a vapor (Usina de açúcar y alcohol)
Combustible: Bagazo de caña
Año de fabricación: 2001

Figura 26: Turbogeneradores escogidos. Izquierda: Caso 1. Derecha: Caso 2. Fuente: www.disai.net/.

La potencia firme para cada caso es la siguiente:

- a) Caso 1: Potencia firme = 5,3 [MW].
- b) Caso 2: Potencia firme = 31,9 [MW].

Los datos de potencia eléctrica para ambos casos se resumen en la Tabla 35.

Tabla 35: Datos de potencia eléctrica para ambos casos.

	Potencia ideal [MW]	Potencia aparente [MVA]	Potencia firme [MW]
Caso 1	4,82	6,25	5,3
Caso 2	23,83	37,5	31,9

3.5.2. Subestación

Dadas las ubicaciones, en el Caso 1 la subestación debe conectarse a la barra de 110 [kV] de la central Renca. Para el Caso 2 es necesario elevar el voltaje a 220 [kV]. Los puntos de conexión se presentan en el Anexo B.

A continuación se calculan las corrientes nominales y de cortocircuito primero para el Caso 1 y luego para el Caso 2. Teniendo en cuenta el voltaje del generador y su potencia aparente se calcula la corriente nominal en media tensión y alta tensión.

$$I_{n_{MT1}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_{MT}} = \frac{6.250 [kVA]}{\sqrt{3} * 13,8[kV]} = 262 [A]$$

$$I_{n_{AT1}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_{AT}} = \frac{6.250 [kVA]}{\sqrt{3} * 110[kV]} = 33 [A]$$

Para el Caso 2 se calculan las corrientes nominales en media tensión y alta tensión de la misma forma.

$$I_{n_{MT2}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_{MT}} = \frac{37.500 [kVA]}{\sqrt{3} * 13,8[kV]} = 1569 [A]$$

$$I_{n_{AT2}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_{AT}} = \frac{37.500 [kVA]}{\sqrt{3} * 220[kV]} = 98 [A]$$

Se calcula la corriente de cortocircuito trifásico que es necesaria para el dimensionamiento de la malla de tierra y elección de protecciones. Se considera que la impedancia de cortocircuito del transformador elevador (Z_{cc}) para ambos casos es igual a 8%. Por lo tanto la corriente de cortocircuito trifásico en por unidad es la siguiente.

$$I_{cc_{3\Phi}} = \frac{1}{Z_{cc}} = \frac{1}{0,08} = 12,5 [pu]$$

Con este valor se encuentran las corrientes de cortocircuito trifásico para MT y AT.

$$I_{cc_{3\Phi_{MT1}}} = I_{cc_{3\Phi}}[pu] * I_{n_{MT1}}[A] = 12,5 * 262 = 3275 [A]$$

$$I_{cc_{3\Phi_{AT1}}} = I_{cc_{3\Phi}}[pu] * I_{n_{AT1}}[A] = 12,5 * 33 = 413 [A]$$

$$I_{cc_{3\Phi_{MT2}}} = I_{cc_{3\Phi}}[pu] * I_{n_{MT2}}[A] = 12,5 * 1569 = 19.613 [A]$$

$$I_{cc_{3\Phi_{AT2}}} = I_{cc_{3\Phi}}[pu] * I_{n_{AT2}}[A] = 12,5 * 98 = 1225 [A]$$

La Tabla 36 resume las corrientes nominales y de cortocircuito trifásico obtenidas para ambos casos.

Tabla 36: Corrientes nominales y de cortocircuito trifásico Caso 1 y Caso 2.

Caso 1		Caso 2	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
S_{n1}	6.250 [kVA]	S_{n2}	37.500 [kVA]
$I_{n_{MT1}}$	262 [A]	$I_{n_{MT2}}$	1569 [A]
$I_{n_{AT1}}$	33 [A]	$I_{n_{AT2}}$	98 [A]
$I_{cc_{3\Phi_{MT1}}}$	3275 [A]	$I_{cc_{3\Phi_{MT2}}}$	19.613 [A]
$I_{cc_{3\Phi_{AT1}}}$	413 [A]	$I_{cc_{3\Phi_{AT2}}}$	1225 [A]

A continuación la Figura 27 y la Figura 28 presentan los diagramas unilineales del Caso 1 y Caso 2 respectivamente. Se identifican los principales componentes y sus protecciones. Por simplicidad no se ilustran los elementos de medida. La barra de servicios auxiliares está en corriente alterna a 6,6 [kV] mientras que la excitación de los generadores es en corriente continua a 400 [V].

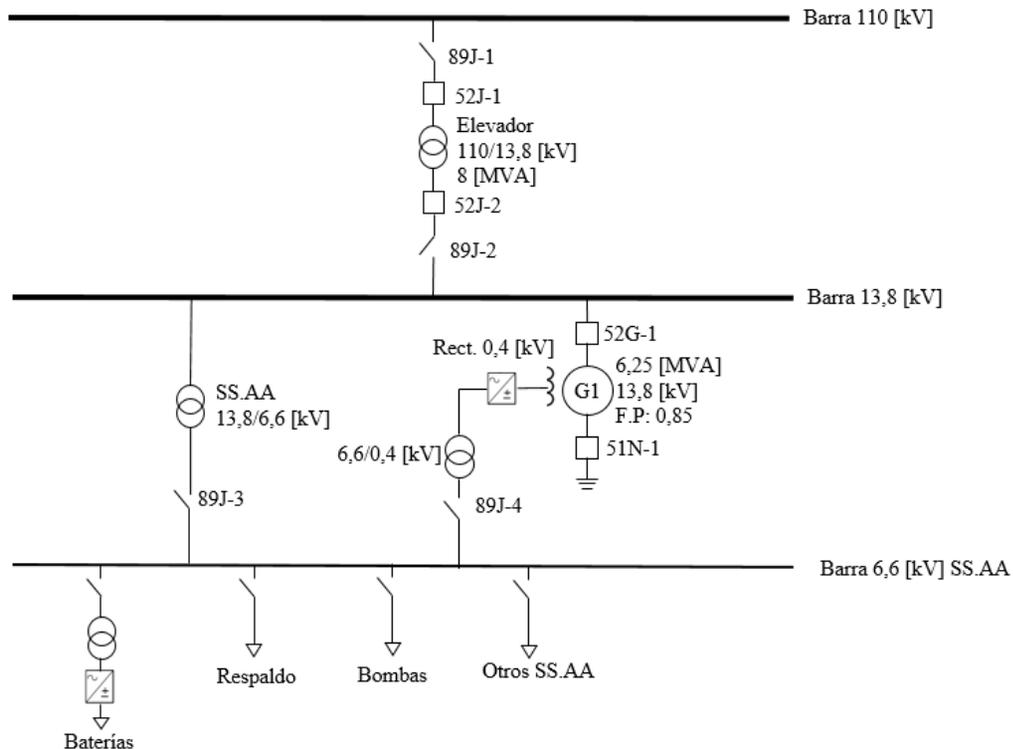


Figura 27: Diagrama unilineal Caso 1.

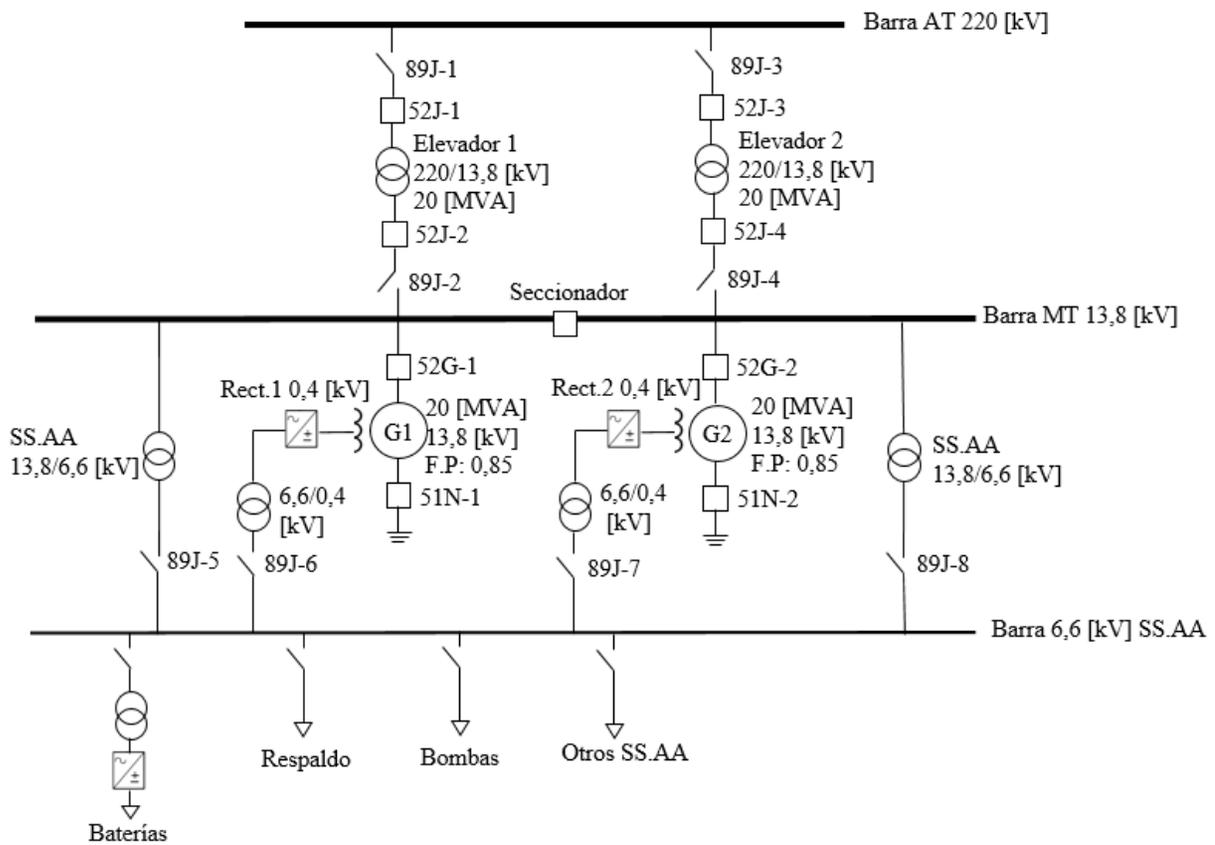


Figura 28: Plano unilineal Caso 2.

La Tabla 37 describe las nomenclaturas utilizadas en los diagramas unilineales.

Tabla 37: Descripción nomenclatura del plano unilineal.

Nomenclatura	Descripción
51N	Relé de sobrecorriente de neutro.
52J	Interruptor de campo.
52G	Interruptor del generador.
89J	Desconectador tripolar de campo.
G1-G2	Generadores 1 y 2.
Rect.	Rectificador.

Por su parte, la Tabla 38 resume las características técnicas de los transformadores elevadores.

Tabla 38: Características técnicas transformador elevador en ambos casos.

Caso 1		Caso 2	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Potencia nominal	8 [MVA]	Potencia nominal	20 [MVA]
Razón de transformación	13,8/110 [kV]	Razón de transformación	13,8/220 [kV]
Conexión	YNd11	Conexión	YNd11
Frecuencia	50 [Hz]	Frecuencia	50 [Hz]
Impedancia de cortocircuito	8%	Impedancia de cortocircuito	8%
Refrigeración	ONAN	Refrigeración	ONAN

El valor estimado de los equipos y sistemas que componen las subestaciones se muestran en la Tabla 39 y Tabla 40. Estos valores se aproximan a partir del último estudio de transmisión troncal y los DIA de proyectos eléctricos similares.

Tabla 39: Valor de equipos y sistemas primarios subestación Caso 1.

Equipo o sistema	Cantidad	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
Transformador de poder 110/13,8 [kV] 8 [MVA]	1 [unidad]	1.100.000	1.100.000
Interruptor de 110 [kV]	1 [unidad]	110.000	110.000
Barras con sus pórticos y aisladores			88.844
Interruptor de 13,8 [kV]	1 [unidad]	85.000	85.000
Transformador de SS/AA 13,8/6,6 [kV]	1 [unidad]	80.000	80.000
Interruptor de 6,6 [kV]	1 [unidad]	50.000	50.000
Transformador de corriente monofásico	3 [unidad]	16.000	48.000
Cables de aleación de aluminio	600 [m]	80	48.000
Transformador de potencial monofásico	3 [unidad]	11.000	33.000
Banco de baterías	1 [unidad]	30.000	30.000
Desconectador tripolar de 6,6 [kV]	6 [unidad]	3.500	21.000
Desconectador tripolar de 110 [kV]	1 [unidad]	9.000	9.000
Desconectador tripolar de 13,8 [kV]	1 [unidad]	7.000	7.000
Otros			16.000
Total			1.725.844

Tabla 40: Valor de equipos y sistemas primarios subestación Caso 2.

Equipo o sistema	Cantidad	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
Transformador de poder 13,8/220 [kV] 20 [MVA]	2 [unidad]	2.100.000	4.200.000
Barras con sus pórticos y aisladores			568.600
Interruptor de 220 [kV]	2 [unidad]	220.000	440.000
Banco de baterías	1 [unidad]	192.000	192.000
Interruptor de 13,8 [kV]	2 [unidad]	85.000	170.000
Transformador de SS/AA 13,8/6,6 [kV]	2 [unidad]	80.000	160.000
Transformador de corriente monofásico	6 [unidad]	16.000	96.000
Cables de aleación de aluminio	1.200 [m]	80	96.000
Transformador de potencial monofásico	6 [unidad]	11.000	66.000
Seccionador 13,8 [kV]	1 [unidad]	50.000	50.000
Desconectador tripolar de 6,6 [kV]	8 [unidad]	3.500	28.000
Desconectador tripolar de 220 [kV]	2 [unidad]	13.000	26.000
Desconectador tripolar de 13,8 [kV]	2 [unidad]	7.000	14.000
Otros			100.000
Total			6.192.600

3.6. Malla de tierra

La malla de tierra tiene por finalidad la seguridad de las personas (protección) y de los equipos (operación) frente a descargas eléctricas inesperadas. En esta sección se examina el procedimiento para el diseño de la misma teniendo como referencia la norma IEEE 80-2000 y los apuntes de clases del profesor de la Universidad de Chile, Nelson Morales.

En primer lugar se debe realizar un estudio de la resistividad del terreno. Los dos grandes factores que disminuyen la resistividad, son la humedad y salinidad. Por lo tanto, a fin de obtener mediciones conservadoras, se recomienda efectuar las mediciones en la época estival por el bajo nivel de humedad en la tierra. Este trabajo no abordará las múltiples formas para obtener la resistividad equivalente (ρ_e) sino que se limita a asumir su valor igual a 240 [Ω m]. Por otro lado, el dimensionamiento solo se realiza para el Caso 2 ya que en el Caso 1 la conexión a tierra se hace en la malla existente de la central Renca.

Una vez definidas las condiciones del terreno, se calculan el voltaje de paso (V_p) y el voltaje de contacto (V_c) tolerables por el cuerpo humano. El voltaje de paso o voltaje pie-pie hace referencia a la máxima diferencia de potencial que teóricamente se produce entre los pies de una persona al dar un paso. La norma establece que la medida debe hacerse entre puntos separados por 1 [m].

El voltaje de contacto, voltaje mano-pie o voltaje de retículo se entiende como la diferencia máxima de potencial que existirá entre los pies y la mano de una persona que está en contacto con una superficie energizada. La Figura 29 ilustra los conceptos de V_p y V_c como un circuito equivalente. En ella R_h representa la resistencia del ser humano mientras que R_p es la resistencia de los pies o del calzado. La norma IEEE 80-2000 considera la resistencia del cuerpo humano igual a 1000 [Ω].

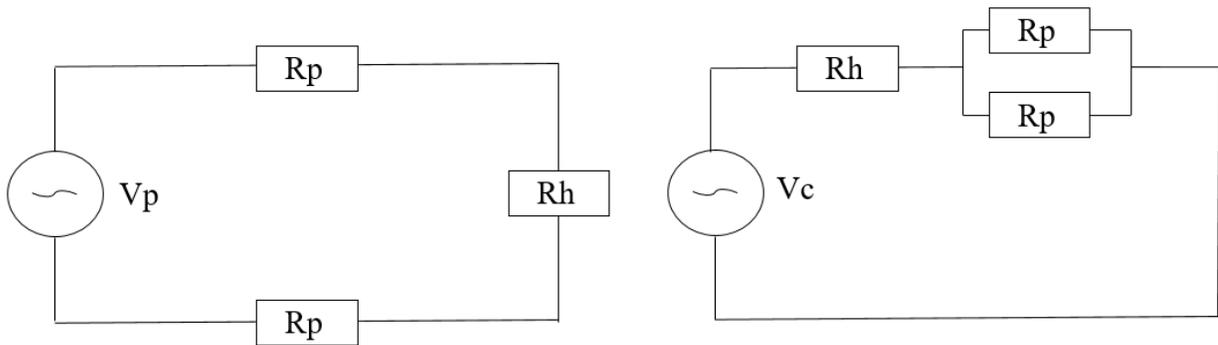


Figura 29: Izquierda: Voltaje de paso. Derecha: Voltaje de contacto. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la ley de Dalziel, se obtienen las ecuaciones (19) y (20) para el cálculo de ambos valores máximos tolerables en una persona de 50 [kg].

$$V_{p_{tolerable}} = \frac{116 + 0,696c * \rho_s}{\sqrt{t}} [V] \quad (19)$$

$$V_{c_{tolerable}} = \frac{116 + 0,174c * \rho_s}{\sqrt{t}} [V] \quad (20)$$

Donde:

ρ_s : Resistividad de a capa superficial [Ωm].

t : Tiempo global de exposición [seg].

c : Factor de corrección debido a la presencia de una capa resistiva adicional.

Tiempos típicos de exposición se encuentran entre 0,03 y 3 segundos. Para este análisis t es considerado igual a 0,5 [seg]. No se estima uso de una capa resistiva adicional por lo tanto c es igual a la unidad. Además, respecto a la resistividad del terreno es usual que instalaciones de poder posean una capa de grava limpia de 10 a 15 [cm] de espesor la cual representa una resistividad superficial de 3000 [Ωm].

Con las suposiciones anteriores y en base a las ecuaciones (19) y (20) se calculan los voltajes de paso y contacto máximos tolerables.

$$V_{p_{tolerable}} = \frac{116 + 0,696 * 1 * 3000}{\sqrt{0,5}} = 3069 [V]$$

$$V_{c_{tolerable}} = \frac{116 + 0,174 * 1 * 3000}{\sqrt{0,5}} = 854[V]$$

El paso siguiente es dimensionar la malla de tierra tal que su resistencia sea mínima y que los voltajes de paso y contacto inducidos sean inferiores a los voltajes máximos tolerables ya calculados. Para conocer la resistencia de la malla se utiliza la expresión simplificada de Laurent (ecuación (21)). Su valor debe ser inferior a 10 [Ω] en subestaciones eléctricas.

$$R = \frac{\rho_e}{4r} + \frac{\rho_e}{L_T} \quad (21)$$

Donde:

r : Radio de un círculo plano de igual área que el área total de la malla [m].

L_T : Longitud total del conductor enterrado [m].

ρ_e : Resistividad equivalente de la malla [Ω m].

Se propone una malla de tierra de dimensiones 180 [m] x 162 [m] con reticulados espaciados por 1,5 [m] y sin barras. Por lo tanto, el área del plano horizontal será igual a 29.160 [m²]. Llevada esta área a una configuración circular, el radio de la malla será de 96,4 [m]. Por otra parte, la longitud total del conductor enterrado se calcula como sigue.

$$L_T = 180 * 109 + 162 * 121 = 39.222[m]$$

Al considerar estos valores en la ecuación (21) se obtiene la resistencia de la malla de tierra.

$$R = \frac{240}{4 * 96,4} + \frac{240}{39.222} = 0,63[\Omega]$$

Se calculan el voltaje de paso y el voltaje de contacto inducidos de acuerdo a las condiciones de la anomalía. La falla más frecuente en sistemas eléctricos es el cortocircuito monofásico, sin embargo la más severa es el cortocircuito trifásico. Por lo tanto es recomendable utilizar la corriente de cortocircuito trifásico para considerar el peor escenario.

La ecuación (22) muestra el método de cálculo para el voltaje de paso inducido, de la misma forma la ecuación (23) lo hace para obtener el voltaje de contacto inducido.

$$V_{p_{inducido}} = \frac{\rho_e * K_s * K_i * I_{CC3\Phi}}{L_s} [V] \quad (22)$$

Donde:

$$K_s = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} * (1 - 0,5^{n-2}) \right)$$

$K_i = 0,644 + 0,148 * n$ Factor de corrección de la corriente.

$n = 2 * \frac{L_c}{L_p}$ (malla rectangular) Número efectivo de conductores paralelos.

L_c : Longitud total de conductor en el reticulado horizontal [m].

L_p : Longitud del perímetro de la malla [m].

h : Profundidad de la malla [m].

D : Espaciamiento entre los conductores [m].

$L_s = 0,75L_c + 0,85L_r$ [m].

L_r : Longitud de cada una de las barras [m].

Los valores de estos parámetros se muestran en la Tabla 41. Se utiliza la corriente de cortocircuito trifásico en media tensión del Caso 2 extraída desde la Tabla 36.

Tabla 41: Valores de parámetros para voltaje de paso inducido.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
K_s	0,69	h	0,5 [m]
K_i	17,6	D	1,5 [m]
n	114,7	L_s	29.417 [m]
L_c	39.222 [m]	L_r	0 [m]
L_p	684 [m]	$I_{CC3\Phi_{MT2}}$	19.613 [A]

El cálculo del voltaje de contacto se efectúa de forma similar.

$$V_{C_{inducido}} = \frac{\rho_e * K_m * K_i * I_{CC3\Phi}}{L_M} \quad (23)$$

Donde:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \left\{ \ln \left(\frac{D^2}{16h * d} + \frac{(D + 2h)^2}{8D * d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left(\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right\}$$

d : Diámetro del conductor [m].

$$K_{ii} = 1(\text{sin barras})$$

$$K_h = \sqrt{1 + h}$$

$$L_M = L_r + L_c \text{ [m] (sin barras)}$$

Tabla 42: Valor de parámetros para voltaje de contacto inducido.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
K_m	0,39	K_h	1,225
d	0,015 [m]	L_M	39.222 [m]
K_{ii}	0,4603		

Los valores de la Tabla 41 y la Tabla 42 se introducen en las ecuaciones (22) y (23) para calcular los voltajes inducidos en ambos casos.

$$V_{p_{inducido}} = \frac{240 * 0,69 * 17,6 * 19.613}{29.417} = 1.943[V]$$

$$V_{c_{inducido}} = \frac{240 * 0,39 * 17,6 * 19.613}{39.222} = 824 [V]$$

Se comprueban entonces las desigualdades, lo que quiere decir que la malla de tierra propuesta cumple con los requisitos de seguridad para las personas.

$$V_{p_{inducido}} = 1.943[V] < V_{p_{tolerable}} = 3.069 [V]$$

$$V_{c_{inducido}} = 824 [V] < V_{c_{tolerable}} = 854 [V]$$

El costo de la malla de tierra para el Caso 2 se calcula como el largo total del conductor enterrado por el precio del mismo. El largo total equivale a $L_c=39.222$ [m] y se asume el precio del conductor en 16 [USD/m], lo que resulta en un costo total de 627.552 [USD]. Esta malla de tierra es calculada bajo el peor caso de cortocircuito trifásico del Caso 2 y podría utilizar una superficie menor si se diseña con electrodos verticales.

3.7. Emisiones atmosféricas

3.7.1. Fase de construcción

Las emisiones atmosféricas en la etapa de construcción corresponden principalmente a material particulado PM10 proveniente del movimiento en las obras principales. Se toman como referencia los factores de emisión expuestos en la Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Proyectos Inmobiliarios para la Región Metropolitana [60] y los documentos AP-42 de la EPA [59] para el cálculo de emisiones de MP10. Se asume emisiones equivalentes para ambos casos.

Tabla 43: Actividades emisoras de MP10, fase de construcción

Actividad	Factor de emisión	Parámetros
Excavaciones	$fe = 0,45 * 0,75 * \frac{S^{1,5}}{M^{1,4}} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (24)$	S=% de finos de material. M=% de humedad del material.
Transferencia de material, carguío y volteo de camiones	$fe = 0,0016 * 0,35 * \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} \left[\frac{kg}{Ton} \right] \quad (25)$	U= Velocidad del viento [m/s]. M=% de humedad del material.
Resuspensión de MP por circulación de vehículos en caminos pavimentados	$fe = 0,62 * (sL)^{0,91} * W^{1,02} \left[\frac{g}{kmveh} \right] \quad (26)$	sL=Carga de fino de la superficie [g/m ²]. W=Peso promedio del flujo total de la flota que circula por las vías [Ton].
Actividades de demolición	$fe = 0,0544^4 \left[\frac{kg}{m^2 mes} \right] \quad (27)$	

3.7.1.1. *Excavaciones*

Por defecto se considera para una retroexcavadora con capacidad de palada de 1 [m³] y rendimiento igual a 30 [m³/h]. Los parámetros por defecto como porcentaje de finos de material (S) 8,5% y porcentaje de humedad del material (M) 6,5%. Aplicando estos valores en la ecuación (24) se obtiene el factor de emisión para excavaciones.

$$fe(excavaciones) = 0,45 * 0,75 * \frac{8,5^{1,5}}{6,5^{1,4}} = 0,6086 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

Se utiliza la ecuación (14) considerando que no existen medidas de mitigación $Ea=0$, y el nivel de actividad Na es calculado como el producto de las horas de operación diaria (h) y los días de operación (t). Con esto la ecuación queda de la forma:

$$E(excavaciones) = Na * fe = \frac{t * h * fe}{1000} \left[\frac{Ton}{periodo} \right]$$

Se considera una jornada laboral diaria $h=8$ [h] y una duración estimada de las excavaciones $t=30$ [días] con lo cual la emisión total se estima en 0,146 [ton/mes].

$$E(excavaciones) = \frac{t * h * fe}{1000} = \frac{30 * 8 * 0,6086}{1000} = 0,146 \left[\frac{Ton}{mes} \right]$$

3.7.1.2. *Transferencia de material, carguío y volteo de camiones*

El valor de la humedad (M) fue definido como 6,5. La velocidad del viento (U) se calcula como el promedio de las cinco ubicaciones propuestas en la Tabla 26 igual a 2,34 [m/s] y no existen medidas de mitigación. A partir de la ecuación (25) se obtiene el factor de emisión como sigue.

$$fe (transferencia) = 0,0016 * 0,35 * \frac{\left(\frac{2,34}{2,2} \right)^{1,3}}{\left(\frac{6,5}{2} \right)^{1,4}} 0,000117 \left[\frac{kg}{Ton} \right]$$

Se supone un movimiento de material de 30 [m³/día]. Considerando 30 días de trabajo, 8 horas por día, se moverá un volumen de tierra igual a 7200 [m³]. Se aplica una densidad del material de 2,2 [ton/m³] y se obtiene que el movimiento de tierra (D) corresponde a 15840 [Ton]. Con lo anterior se calculan las emisiones como:

$$E(transferencia) = D * fe = \frac{15840 * 0,000117}{1000} = 0,00185 \left[\frac{Ton}{mes} \right]$$

3.7.1.3. Resuspensión de MP por circulación de vehículos en caminos pavimentados

La carga de finos (sL) posee mayor valor para caminos menos transitados. Se supone un camino con flujo entre 500 y 20.000 vehículos día, lo que corresponde a $sL=0,7$ [g/m²]. El valor del peso promedio de los vehículos será de $W=20$ [Ton]. No se considera abatimiento por aspirado de calles ni precipitaciones en el periodo. Se reemplaza en la ecuación (26).

$$fe(resuspensión) = 0,62 * (0,7)^{0,91} * 20^{1,02} = 9,517 \left[\frac{g}{km-veh} \right]$$

La cantidad total de emisiones por Resuspensión de MP se obtiene al multiplicar el factor de emisión por la cantidad de kilómetros recorridos. Para un proyecto de este tamaño es adecuado considerar en la etapa de construcción dos camiones que realizan en promedio tres viajes de ida y vuelta con un promedio de 20 [km] por viaje para transporte de materiales y otros. La emisión total se calcula como sigue:

$$E(resuspensión) = 30 * \frac{(n * VD * L * fe)}{10^6} = 30 * \frac{2 * 3 * 20 * 9,517}{10^6} = 0,034 \left[\frac{Ton}{mes} \right]$$

Donde:

$n=2$, número de camiones.

$VD=3$, Viajes por día.

$L=20$, distancia del trayecto.

3.7.1.4. Actividades de demolición

La necesidad de demoler un edificio dependerá de la ubicación exacta. Como el proyecto se localiza en el radio urbano, se considera a modo de ejercicio la demolición de un edificio de 2000 [m²] con duración de un mes. Se utiliza el factor constante mensual de la ecuación (27).

$$fe(demolición) = 0,0544^4 \left[\frac{kg}{m^2 * mes} \right]$$

La emisión total por la actividad de demolición se calcula como sigue.

$$E(demolición) = Superficie * fe = \frac{2000 * 0,0544}{1000} = 0,1 \left[\frac{Ton}{mes} \right]$$

3.7.1.5. Emisión de motores de combustión

Durante la fase de construcción se considera el uso de maquinaria que corresponde a dos camiones tolva y una retroexcavadora. Los factores de emisión se obtienen desde la Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Proyectos Inmobiliarios para la Región Metropolitana [60] y se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44: Factor de emisión para camión recolector tipo.

<i>fe</i>	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx[g/kWh]	MP [g/kWh]	SO ₂ [g/km]
Camión tolva	3	1,35	14,36	1,1	0,097
Retroexcavadora	5,06	2,33	14,36	1,51	0,097

Se observa que el dióxido de azufre (SO₂) depende de los kilómetros recorridos (L) y no de la potencia del equipo. Por lo que se la estimación de emisiones de SO₂ será la multiplicación del factor de emisión por los kilómetros recorridos. Para el resto de los contaminantes, la emisión total se calcula a partir de la ecuación (28).

$$E = \frac{n * fe * T * t * C * P}{10^6} \quad (28)$$

Donde:

n=Número de máquinas.

Fe=Factor de emisión [g/kWh].

T=Días de operación [día].

t=Carga de trabajo [h/día].

C=Porcentaje de carga [%]. Se utiliza el valor por defecto 75%.

P=Potencia de la máquina [kW].

La Tabla 45 muestra los parámetros que se consideran para el cálculo de emisiones por combustión de motores en la etapa de construcción.

Tabla 45: Parámetros para cálculo de emisiones por combustión de motores, fase de construcción.

Máquina	<i>n</i>	<i>P</i> [HP]	<i>P</i> [kW]	<i>C</i> [%]	<i>T</i> [día]	<i>t</i> [h/día]	<i>l</i> (km/día)
Camión tolva	2	280	206	0,75	30	4	15
Retroexcavadora	1	114	84	0,75	30	8	6

Se consideraron camiones tolva de 280 [HP] trabajando treinta días para obtener la emisión mensual, con una carga de trabajo de cuatro horas por día y distancia diaria recorrida de 15 [km]. Por su parte la retroexcavadora se consideró de 114 [HP] de potencia con una carga de trabajo de 8 horas al día y una distancia recorrida diaria de 6 kilómetros. Para ambas máquinas el porcentaje de carga se asume por defecto 75%. En base a los parámetros de la Tabla 45, se calculan las emisiones totales por combustión de las maquinas.

Tabla 46: Emisión mensual por motores de combustión, fase de construcción.

Emisión mensual	CO [Ton/mes]	HC [Ton/mes]	NOx [Ton/mes]	MP [Ton/mes]	SO ₂ [Ton/mes]	T [mes]
Camiones tolva	0,1112	0,0501	0,5325	0,0408	46,7E-6	2
Retroexcavadora	0,07651	0,03523	0,21712	0,02283	17,5E-6	4
Emisión total	0,528 [Ton]	0,241 [Ton]	1,933 [Ton]	0,173 [Ton]	1,57E-4 [Ton]	

El uso de la retroexcavadora se estima en dos meses mientras que los camiones tolva por cuatro meses. Con esta información se presenta en la Tabla 47 la emisión total de contaminantes atmosféricos para la etapa da de construcción.

Tabla 47: Emisión total por motores de combustión, fase de construcción.

Contaminante	Emisión total [Ton]
MP10	0,778 [Ton]
CO	0,528 [Ton]
HC	0,241 [Ton]
NOx	1,933 [Ton]
SO₂	1,57E-4 [Ton]

La Tabla 48 presenta un resumen de las emisiones totales de MP 10 para cada tipo de fuente emisora en la etapa de construcción del proyecto.

Tabla 48: Emisión total PM10, fase de construcción.

Actividad	Emisión mensual	Duración	Emisión por fuente
Excavaciones	0,146 [Ton]	1 [mes]	0,146 [Ton]
Transferencia de material, carguío y volteo de camiones	0,00185 [Ton]	10 [mes]	0,019 [Ton]
Resuspensión de MP por circulación de vehículos en caminos pavimentados	0,034 [Ton]	10 [mes]	0,34 [Ton]
Actividades de demolición	0,1 [Ton]	1 [mes]	0,1 [Ton]
Motores de combustión	0,19 [Ton]	4 [mes]	0,778
Emisión Total MP10			1,38 [Ton]

3.7.2. Fase de operación

Tanto para el Caso 1 como para el Caso 2 la emisión por motores de combustión se desprecia ya que los dos proyectos no suponen un aumento en el número de viajes de camiones. Sin embargo, para el Caso 1 donde la planta se ubica dentro del radio urbano, existe una externalidad positiva producto de la reducción en el transporte de residuos hasta un relleno sanitario. Este cálculo será considerado en la evaluación social.

Respecto a las emisiones de CO₂ se puede decir que las instalaciones ERNC son consideradas como neutras en emisión de CO₂ según el protocolo de Kyoto. Aunque en la práctica si existe emisión real de este contaminantes (entre 0,7 y 1,2 [ton] de CO₂ por tonelada de basura) propia de una planta en operación, el Panel Intergubernamental en Cambio climático (*IPCC*) establece que estas no son consideradas como relevantes para el cambio climático toda vez que su contenido de carbono no sea de origen fósil. Dada la composición heterogénea y cambiante de los RSM, se hace más difícil conocer su proporción de carbono biológico en comparación con combustibles

tradicionales. Una forma propuesta por el *IPCC* es asumir que ciertas fracciones en los residuos están compuestas por carbono fósil, por ejemplo el plástico, telas y cueros. Siguiendo este principio y en base a la información sobre las fracciones que componen los RSM en Chile expuesta en la Tabla 10, la proporción de RSM compuestos por carbono fósil será la suma de los plásticos (10,6%), telas (3,6%) y otros materiales de origen fósil (5%) igual 19,2 %. Estas cifras permiten calcular los ingresos por venta de bonos de carbono.

Caso 1

La tecnología de antorcha de plasma está siendo desarrollada por presentar menores emisiones que la incineración tradicional. Para determinar la composición de los gases emitidos a la atmósfera en el Caso 1, se toma como referencia la información sobre la planta Utashinai [32] en Japón ya que esta planta posee una capacidad de 220 [ton/día] cercana a la capacidad del Caso 1 igual a 200 [ton/día].

El estudio no contiene información sobre las emisiones de monóxido de carbono, por lo que la concentración de CO se obtiene desde la planta Mihama-Mikata de 24 [ton/día] ubicada en el mismo país. Por otro lado, las concentraciones que se miden en partes por millón (ppm) son convertidas a [mg/m³] según el peso molecular de cada compuesto como muestra la Tabla 49.

Tabla 49: Peso molecular y factores de emisión para gasificación con antorcha de plasma.

Producto	Peso molecular [g/mol]	Factor de emisión
CO	28,01	1,23
NO₂	46,01	2,03
SO₂	64,06	2,82

En base a la Tabla 49 y considerando los valores expuestos en el estudio independiente de la consultora multinacional Juniper, las emisiones estimadas para el Caso 1 se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50: Concentraciones estimadas de gases de emisión Caso 1. Fuente: [32].

Producto	Concentración [mg/m³]
MP10	10
CO	12,2
NO ₂	160,4
SO ₂	5,6

Caso 2

En el numeral 3.4.1 se considera el uso de una caldera de poder tipo HYBEX que se encuentra en operación en la planta Horcones de biomasa forestal no tratada. Según ello, en la Tabla 24 se exponen los valores de SO₂, NO₂, CO y PM₁₀ modelados dentro de la DIA del proyecto en el punto de máxima concentración.

Tabla 51: Emisiones planta de incineración de lecho fluidizado. Fuente: DIA Horcones 2007.

Producto	Concentración [mg/m³]
MP10	3,8
CO	34
NO ₂	212
SO ₂	6

Al comparar los valores de la Tabla 51 con los límites de concentración establecidos en la norma de emisión para incineradores (Tabla 18) se confirma que la caldera seleccionada cumple con la norma de emisión para incineradores. Por otra parte, la Tabla 52 presenta parámetros de operación respecto a la temperatura de los gases que escapan por la chimenea, velocidad de los gases y cantidad anual emitida.

Tabla 52: Parámetros de emisión de gases Caso 2.

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de los gases	185	[°C]
Velocidad de los gases	9,43	[m/s]
MP10	300	[ton/año]
NO₂	1.030	[ton/año]
CO	758	[ton/año]
SO₂	352	[ton/año]

3.7.3. Venta de bonos de carbono

En el numeral 3.4.1 se estimó la capacidad de procesamiento anual en cada caso. Para el cálculo de CO₂ apto para la venta en el mercado de bonos de carbono, se considera la fracción biológica de los residuos y excluyen materiales que contengan carbono fósil. En esta línea, se obtuvo en la sección anterior que el 80,8% de los RSM a tratar es de origen no fósil. Se calculan las emisiones de carbono equivalentes a partir de la ecuación (17).

$$Gf = Ef * EFf * FOC * \frac{44}{12} [ton]$$

Donde:

Gf : Emisiones de carbono equivalente [ton].

Ef : Energía consumida [MWh].

EFf : Factor de emisión [ton CO_{2e}/MWh].

FOC: Fracción de carbono oxidado=1.

La energía consumida (*Ef*) es la cantidad anual de residuos aptos (80.08%) según el criterio *IPCC* multiplicado por el poder calorífico de los residuos, mientras que el factor de emisión *EFf* se considera igual a 30 [kg/GJ] (leña) es decir 0,00834 [Ton/MWh] y la fracción de carbono oxidado es 1 en ambos casos (Informe de GEI COCHILCO 2013 [48]).

Caso 1:

$$Ef = 73.000 * 0,808 * 1,67 = 97.626 \text{ [MWh]}$$

$$Gf = 97.626 * 0,00834 * 1 * \frac{44}{12} = 2.985 \text{ [ton } CO_{2e}\text{]}$$

Caso 2:

$$Ef = 401.500 * 0,808 * 1,67 = 536.940 \text{ [MWh]}$$

$$Gf = 536.940 * 0,00834 * 1 * \frac{44}{12} = 16.420 \text{ [ton } CO_{2e}\text{]}$$

En el numeral 2.8.1.5 se consideró que el precio de venta de las reducciones certificadas de gases de efecto invernadero es 8 [USD/ton], por lo tanto los ingresos anuales por venta de las mismas se presentan en la Tabla 53.

Tabla 53: Ingresos anuales por venta de bonos de carbono.

	Toneladas anuales [ton CO_{2e}]	Ingresos anuales [USD]
Caso 1	2.985	23.883
Caso 2	16.420	131.357

3.8. Recuperación de materiales

La ceniza es el residuo generado en la cámara de combustión y caldera. Cuando es muy fino su peso no es suficiente para depositarse directamente en el fondo del horno recibe el nombre de ceniza volante mientras que cuando su densidad y peso son mayores, esta cae hacia el fondo de la cámara de combustión en forma de escoria.

Las cenizas volantes se colectan principalmente en el sistema de limpieza de gases de combustión y se acumulan en forma de polvo en un silo. Luego, su descarga puede ser de forma seca por ductos herméticos o húmeda mediante inyección de agua. El alto contenido de compuestos tóxicos, metales y sales en las cenizas volantes no permite su recuperación para fines de construcción por lo que es necesario eliminarlas en un relleno sanitario.

Por otra parte, las escorias que se depositan en el captador de escoria o cenicero deben ser enfriadas por agua y retiradas continuamente para permitir el ingreso de más material. En el captador las escorias son enfriadas por agua para evitar que se fundan entre ellas y formen sedimentos de mayor tamaño. Compuertas en el fondo del captador guían el material a los trituradores para reducir su tamaño y transportarlo por el flujo de agua hasta un decantador. En este punto se puede efectuar la separación de metales y tratar la escoria para ser reusada como hormigón celular en la obra gruesa en actividades de construcción.

Se estima que la generación de cenizas para ambos casos es igual a 20% de la masa original y 10% del volumen [61]. La fracción recuperable de la gasificación por plasma es mayor que la incineración, ya que los residuos sometidos a altas temperaturas generan escorias inertes. Es razonable asumir para el Caso 1 que el 15% de la masa original de residuos será tratada para uso en materiales de construcción, mientras que para el Caso 2 será 12%.

En las PVT europeas, la fracción de metales en la escoria puede alcanzar entre 10 % y 15 % [61]. Sin embargo, en este trabajo no se considera recuperación de metales desde la escoria dado que la fracción de metales solo alcanza el 2,3% (Tabla 7) en los residuos a tratar y además el sistema de pretratamiento de residuos recupera la mitad de ellos, es decir 1,15% de la masa total. Según lo anterior la Tabla 54 muestra las tasas de recuperación de materiales para cada caso.

Tabla 54: Recuperación de materiales.

	Porcentaje recuperable para construcción	Porcentaje no recuperable	Porcentaje recuperación de metales en SPR.
Caso 1	15%	5%	1,15%
Caso 2	12%	8%	1,15%

3.9. Cronograma general

En base a los planes de trabajos de centrales térmicas convencionales de dimensiones similares, la Tabla 55 presenta el cronograma general del proyecto en el Caso 2. Se estima un periodo total de dos años desde la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental hasta la puesta en marcha comercial. Para el Caso 1, el cronograma es similar pero se estima un periodo de estudios, construcción y puesta en marcha de 14 meses.

Tabla 55: Cronograma general del proyecto Caso 2

Item	Año 1												Año 2													
	Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. EIA																										
2. Licitación de obras																										
3. Construcción																										
3.1. Ingeniería de detalle																										
3.2. Suministro de equipos																										
3.3. Construcción y montaje																										
3.4. Pruebas y puesta en marcha																										
3.5. Operación comercial																										

4. Evaluación del proyecto

4.1. Evaluación privada

4.1.1. Estimación de costos

4.1.1.1. Inversión

Se consideran equipos y sistemas estándar para centrales térmicas de generación eléctrica, en lo posible se usarán diseños modulares pre armados en fábrica. En el Caso 1, el ítem de adquisición de terreno es notoriamente mayor ya que la planta se ubica en el radio urbano.

Tabla 56: Estimación de inversión Caso 1

Ítem	Valor total [USD]
4 Antorchas de plasma DC de arco no transferido 600 [kW]	8.000.000
Obras de construcción	6.700.000
Adquisición del terreno	5.652.170
Unidad ASU	4.400.000
Turbogenerador de 6,25 [MVA]	4.300.000
2 Reactores y sus componentes	4.000.000
Sistema de purificación de aire	2.490.000
Sistema de limpieza del <i>syngas</i>	2.100.000
Subestación	1.725.844
Ingeniería	611.000
Malla de tierra	465.600
Montaje y pruebas	400.000
Estación de pesaje	400.000
Sistema de pretratamiento de RSM	364.000
Sistema contra incendios	80.000
Iluminación y ventilación	30.000
Grúa aérea de 4 [Ton]	12.900
Suma preliminar	41.731.514
Imprevistos (10%)	4.173.151
Total inversión	45.904.665

Tabla 57: Estimación de inversión Caso 2.

Ítem	Valor total [USD]
2 Calderas HYBEX 210 [ton/h]	18.000.000
2 Turbogeneradores de 20 [MVA]	16.000.000
Sistema de purificación de aire	13.700.000
Obras de construcción	8.700.000
Subestación	6.254.600
Adquisición del terreno	2.441.740
Montaje y pruebas	2.200.000
Sistema de pretratamiento de RSM	2.000.000
Ingeniería	611.000
Estación de pesaje	500.000
Malla de tierra	465.600
Sistema contra incendios	100.000
Iluminación y ventilación	35.000
Dos grúas aéreas de 4 [Ton]	25.800
Suma preliminar	71.033.740
Imprevistos (10%)	7.103.374
Inversión total	78.137.114

En la Tabla 58 se muestran los valores de inversión por potencia instalada y por tonelada tratada anualmente. Notar que estos indicadores son válidos para comparar entre proyectos de tratamiento de residuos pero pierden sentido al ser evaluados contra proyectos de generación con combustibles convencionales ya que el poder calorífico de los RSM es una fracción menor del poder calorífico de los combustibles convencionales, por lo tanto el costo de inversión por MegaWatt instalado será siempre mayor en PVT de RSM.

Tabla 58: Costos de inversión por MW y por tonelada anual.

	Caso 1	Caso 2	Unidad
Inversión por MW instalado	\$8.661.258	\$2.449.439	[USD/MW]
Inversión por tonelada anual	\$629	\$195	[USD/ton*año]

Al comparar ambos casos se observa que el proyecto de incineración por lecho fluidizado del Caso 2 posee indicadores de inversión mejores que los del Caso 1. La inversión por potencia instalada para el Caso 2 corresponde al 28% del valor en el Caso 1 mientras que la inversión por tonelada tratada anual es 31% del mismo indicador en el Caso 1.

4.1.1.2. Estimación de costos fijos y variables

Los costos de mantención, insumos y costos variables se expresan como porcentaje de la inversión. Para el Caso 1 la mantención los costos de mantención más importantes se relacionan con el cambio de electrodos mientras que los costos variables están influenciados por el consumo eléctrico de las antorchas de plasma y la unidad ASU. El costo variable que se ingresa en el flujo de caja es la suma del costo de disposición de residuos post tratamiento y los costos variables de la Tabla 59. Los costos por sueldos del personal se calculan en base al número de personas en la fase de operación por un sueldo promedio anual de 14,500 [USD/año]. Los costos por disposición de residuos se obtienen como la porción no recuperable de los residuos generados por la planta (Tabla 54) por el costo de disposición final. La Tabla 59 presenta los costos anuales de cada ítem.

Tabla 59: Estimación de costos, primer año.

Caso 1		Caso 2	
Ítem	Costo [USD]	Ítem	Costo [USD]
Mantenimiento (4%)	1.836.187	Mantenimiento (4%)	3.125.485
Personal (14 personas)	203.000	Personal (50 personas)	725.000
Disposición de residuos ⁴	59.886	Disposición de residuos	481.800
Costos variables (2,5%)	1.147.617	Costos variables (2,5%)	1.953.428
Total	3.246.689	Total	6.285.712

Notar que el costo de disposición de residuos es el único que varía en el tiempo con una tasa de crecimiento de 9,4% anual obtenida en el numeral 2.3.2.1. Esta variación también es relevante para el cálculo de los ingresos por recepción de residuos que se trata en la sección siguiente.

4.1.2. Estimación de ingresos

Los ingresos se componen de cinco categorías; ingresos por recepción de residuos, ingresos por venta de energía al sistema eléctrico, ingreso por recuperación de escorias, por venta de bonos de carbono e ingreso por venta de metales. No se considera ingreso por reciclaje de otros productos.

El ingreso por recepción de residuos es la multiplicación de la cantidad de toneladas recibidas anualmente por el valor de disposición final en cada periodo. Por otra parte, el ingreso por venta de energía es la multiplicación de la energía anual generada que se obtuvo en el numeral 3.5 por el costo marginal promedio en la barra Alto Jahuel 220 [kV] igual a 91 [USD/MWh]. Los ingresos por recuperación de escoria para materiales de construcción se consideran como la tasa de recuperación según la Tabla 54 por la capacidad anual de las plantas y por el precio del hormigón celular estimado en 14 [USD/ton]. De la misma forma el ingreso por recuperación de metales se obtiene con la tasa de recuperación (1,15%) del sistema de pretratamiento de residuos multiplicada por la capacidad anual y el valor del hierro promedio informado por COCHILCO el año 2014 igual a 97 [USD/ton]. El resumen de los costos anuales para ambos casos se muestra en la Tabla 60.

⁴ Valor correspondiente al año cero. Luego el costo de disposición final aumenta 9,4% anual.

Tabla 60: Estimación de ingresos.

Caso 1		Caso 2	
Ítem	Ingreso [USD]	Ítem	Ingreso [USD]
Recepción de residuos ⁵	1.197.711	Recepción de residuos	6.022.500
Venta de energía	3.461.003	Venta de energía	17.099.082
Recuperación escorias	153.300	Recuperación escorias	674.520
Bonos de carbono	23.883	Bonos de carbono	131.357
Recuperación metales	81.432	Recuperación metales	447.873
Total	4.917.329	Total	24.243.975

4.1.3. Flujo de caja

El flujo de caja es relevante para conocer los flujos de efectivo y obtener indicadores económicos como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de capital (PRC) que permiten evaluar la rentabilidad de los proyectos. Para la realización del flujo de caja se considera un horizonte de evaluación de 20 años y una tasa de descuento usual en proyectos eléctricos de 10%. Para efectos de la depreciación, los sistemas y equipos son depreciados un 4% anual y la ganancia de capital es nula.

A partir de estos supuestos, la Tabla 61 presenta los principales indicadores de evaluación de inversiones en proyectos puros, es decir sin crédito. Se observa que el Caso 1 entrega un VAN negativo igual a -\$ 23.064.243 [USD], TIR de 3% y PRC igual a 18 años, por lo tanto el proyecto de gasificación con antorcha de plasma no es rentable desde el punto de vista privado. Por otra parte, el Caso 2 presenta un VAN positivo igual a \$90.878.309, TIR del 23% y PRC de 5 años, lo cual resulta atractivo económicamente. Los indicadores se muestran en la Tabla 61 mientras que los respectivos flujos de caja se encuentran en el Anexo C.

Tabla 61: Indicadores de inversión de los proyectos puros.

Caso 1		Caso 2	
Indicador	Valor	Indicador	Valor
VAN	-\$ 23.064.243	VAN	\$90.878.309
TIR	3%	TIR	23%
PRC	18 años	PRC	5 años

4.1.4. Análisis de sensibilidad

Para efectuar el análisis de sensibilidad se escoge un parámetro considerado relevante y se cambia su valor manteniendo todos los demás constantes. Cada análisis crea dos escenarios; pesimista y optimista. Los parámetros escogidos y los rangos de variación para el análisis de sensibilidad se muestran en la Tabla 62.

⁵ Valor correspondiente al año cero. Luego el precio de recepción aumenta 9,4% anual.

Tabla 62: Escenarios análisis de sensibilidad

Parámetro	Pesimista	Optimista
Costo de disposición final	-10%	+10%
Valor de la energía	-10%	+10%
Costo de inversión	+10%	-10%
Tasa de descuento	+10%	-10%

4.1.4.1. Variación del costo de disposición final

Se varia en -10% y +10% el costo de disposición final original, lo que implica costos de 12,75 [USD/ton] y 17,25 [USD/ton] para el primer año. Con estos valores se calculan los indicadores económicos que se muestran en la Tabla 63. Se observa que para el Caso 1 el VAN presenta una variación de 6%. En el Caso 2 la variación del precio de disposición final produce una variación de VAN igual a 9 %.

Tabla 63: Análisis de sensibilidad, variación del precio de disposición final.

Caso 1			Caso 2		
Indicador	Pesimista	Optimista	Indicador	Pesimista	Optimista
Variación	-10%	+10%	Variable	-10%	+10%
VAN	-24.561.346	-\$ 21.567.140	VAN	82.904.264	98.852.354
Δ VAN	-6%	6%	Δ VAN	-9%	9%
TIR	3%	4%	TIR	22%	23%
PRC	18 años	17 años	PRC	5 años	5 años

4.1.4.2. Variación del valor de la energía

En este análisis se modifica el valor de la energía en -10% y +10% para los casos pesimista y optimista respectivamente, lo que implica valores de la energía eléctrica de 81,9 [USD/MWh] y 100,1 [USD/MWh]. A partir de ello, se obtiene la Tabla 64 con los indicadores de inversión. Se observa que para el Caso 1 el VAN reacciona con una variación del 10% aunque sigue siendo negativo en ambos escenarios. Por su parte, en el Caso 2 se tiene una variación del VAN igual a 12%.

Tabla 64: Análisis de sensibilidad, variación del valor de la energía.

Caso 1			Caso 2		
Indicador	Pesimista	Optimista	Indicador	Pesimista	Optimista
Variación	-10%	+10%	Variable	-10%	+10%
VAN	-25.352.812	-\$ 20.775.674	VAN	79.571.634	102.184.984
Δ VAN	-10%	10%	Δ VAN	-12%	12%
TIR	3%	4%	TIR	21%	24%
PRC	19 años	17 años	PRC	6 años	5 años

4.1.4.3. Variación del costo de inversión

Se modifica el costo de inversión en +10% y -10%. Se observa un 28% de variación del VAN en el Caso 1 y 12% de variación en el VAN del Caso 2. Por lo tanto, se deduce que el proyecto de gasificación por antorcha de plasma del Caso 1 es altamente sensible al valor de la inversión. La alta sensibilidad del Caso 1 se explica porque los costos que dependen de la inversión representan una fracción mayor de los costos totales que en el Caso 2. Notar que la variación positiva de 10% en la inversión se usa en el escenario pesimista mientras que la variación negativa de -10% aplica al escenario optimista.

Tabla 65: Análisis de sensibilidad, variación del costo de inversión.

Caso 1			Caso 2		
Indicador	Pesimista	Optimista	Indicador	Pesimista	Optimista
Variación	+10%	-10%	Variable	+10%	-10%
VAN	-29.627.733	-\$ 16.500.753	VAN	79.706.195	102.050.424
Δ VAN	-28%	28%	Δ VAN	-12%	12%
TIR	2%	5%	TIR	20%	25%
PRC	19 años	16 años	PRC	6 años	5 años

4.1.4.4. Variación de la tasa de descuento

Se realiza una variación de -10% y 10% en la tasa de descuento privada, lo que equivale a utilizar una tasa de 11% para el escenario pesimista y una tasa de 9% para el escenario optimista. Recordar que una menor tasa de descuento privada significa que el dueño le exige una rentabilidad menor al proyecto. En concreto, una tasa menor se traduce en que los flujos de caja tienen una mayor ponderación en el cálculo del VAN.

La Tabla 66 da cuenta de los indicadores de inversión para ambos casos. En ella se observa que a diferencia de los análisis de sensibilidad anteriores, el módulo de la variación del VAN es diferente en el escenario optimista y en el pesimista. Sin embargo la TIR y el PRC son iguales y equivalentes a los valores originales del proyecto puro. Esto es debido a que en oposición a los casos anteriores, la tasa de descuento solo afecta el cálculo del VAN y no modifica los flujos de caja como tampoco la TIR y el PRC ya que estos indicadores no dependen de la tasa de descuento. En consecuencia la TIR y el PRC permanecen constantes en ambos casos.

Tabla 66: Análisis de sensibilidad variación de la tasa de descuento.

Caso 1			Caso 2		
Indicador	Pesimista	Optimista	Indicador	Pesimista	Optimista
Variación	+10%	-10%	Variable	+10%	-10%
VAN	-25.045.467	-\$ 20.794.082	VAN	78.160.856	105.278.784
Δ VAN	-9%	10%	Δ VAN	-14%	16%
TIR	3%	3%	TIR	23%	23%
PRC	18 años	18 años	PRC	5 años	5 años

4.1.4.5. Comentarios sobre el análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad muestra que el VAN del Caso 1 es más sensible al costo de inversión mientras que el Caso 2 es más sensible a la variación de la tasa de descuento, presentando una variación de 16% cuando se aplica una tasa de 9% y una variación de -14% para una tasa de 11%. Esto se debe a que en el Caso 2, los ingresos por recepción de RSM son más importantes en los últimos años, lo que implica mayores ingresos en los flujos futuros. Si se considera que en el cálculo del VAN la tasa de descuento afecta de mayor manera a los flujos futuros, resulta que el VAN del proyecto de incineración del Caso 2 es fuertemente sensible a la variación de la tasa de descuento.

Respecto los valores de la tasa interna de retorno, se tiene que tanto para el Caso 1 como para el Caso 2, los máximos valores de la TIR se alcanzan en los escenarios optimistas del análisis de sensibilidad del costo de inversión. Para el Caso 1 la TIR máxima es 5% en tanto que para el Caso 2 la TIR máxima es 25%. Notar que la TIR es aquel valor de la tasa de descuento que hace el VAN igual a cero y se utiliza para medir la rentabilidad promedio de un proyecto. Por lo tanto, dentro del escenario optimista del análisis de sensibilidad del costo de inversión, los proyectos serán rentables si la tasa de descuento privada es igual o menor a 5% y 25% en el Caso 1 y el Caso 2 respectivamente.

Finalmente, el periodo de recuperación de capital es un indicador de inversiones que aunque por sí solo no entrega información determinante, es ampliamente conocido y usado por los inversionistas debido a su sencillez. El criterio es escoger aquel PRC que sea mínimo, por lo tanto para el Caso 1 la mejor situación se obtiene al variar -10% el costo de inversión, ya que el PRC bajó desde 18 años a 16 años. En el Caso 2, se aprecia que el PRC optimista permaneció invariante para todos los casos con un valor de 5 años.

4.2. Evaluación social

En esta sección se realiza una evaluación social de los dos casos definidos al inicio del capítulo 3 a fin de identificar, medir y valorizar los costos y beneficios para todos los agentes de la sociedad. Se utiliza la metodología de costo-beneficio, comparando los escenarios sin proyecto y con proyecto para medir el impacto en la contaminación atmosférica, liberación de terreno en los rellenos sanitarios y el costo social de la mano de obra. Luego de cuantificar costos y beneficios sociales, se obtiene el VAN social de ambos proyectos. Finalmente, se comenta sobre el resultado y otros aspectos sociales relevantes que aunque que no son cuantificados.

4.2.1. Costos sociales

4.2.1.1. Costo social de la mano de obra

El MDS establece precios sociales de la mano de obra para cuantificar el costo marginal en que incurre la sociedad por un trabajador adicional de cierta calificación. Se definen tres calificaciones [62] según el tipo de trabajo:

- a) Mano de obra calificada: trabajadores que desempeñen actividades cuya ejecución requiere estudios previos o vasta experiencia por ejemplo: profesionales, técnicos y obreros especializados.

- b) Mano de obra semi calificada: trabajadores que desempeñan actividades para las cuales no se requiere estudios previos y que, teniendo experiencia, esta no es suficiente para ser calificados como maestros de primera.
- c) Mano de obra no calificada: trabajadores que desempeñan actividades cuya ejecución no requiere de estudios ni experiencia, por ejemplo: jornaleros, cargadores, personas sin oficio definido.

Se asigna un factor de corrección aplicado sobre el costo real por pago de sueldos a los trabajadores. Los factores de corrección para la mano de obra se muestran en la Tabla 67.

Tabla 67: Factores de corrección precio social de la mano de obra. Fuente: [62].

Categoría de mano de obra	Factor de corrección
Calificada	0,98
Semi calificada	0,68
No calificada	0,62

Durante la operación de la planta, en el Caso 1 se tienen 14 trabajadores de los cuales 10 corresponden a mano de obra calificada y 4 a mano de obra semi calificada. En el Caso 2, durante la operación se requieren 50 trabajadores de los cuales 39 se identifican como mano de obra calificada y 11 como mano de obra no calificada. No se considera mano de obra no calificada en ningún caso. Según lo anterior y a partir de la estimación de costos de la Tabla 59, los costos sociales por mano de obra son 181.482 [USD/año] para el Caso 1 y 662.650 [USD/año] para el Caso 2.

4.2.1.2. Costo social de las emisiones de la planta

Para estimar los efectos sobre la salud de las personas debido a las emisiones contaminantes de una planta se recomienda utilizar la función de daño propuesta en el informe titulado: Análisis General del Impacto Económico y Social de una Norma de Emisión para Termoeléctricas [45] publicado en el año 2009. Dicha metodología requiere datos precisos sobre coeficientes concentración-respuesta, demografía de la zona de influencia, tasa de admisión hospitalaria por enfermedad además de conocer las condiciones meteorológicas y geográficas locales para finalmente determinar un valor monetario asociado a cada efecto nocivo para la salud.

Dada la dificultad para conseguir dichos datos, este trabajo se limita a asignar el costo social per cápita de los contaminantes más importantes establecidos en la ley 20.780. Los costos sociales por contaminante se muestran en la Tabla 68.

Tabla 68: Costo social per cápita de contaminantes atmosféricos.

Contaminante	Costo social [USD/persona]
MP₁₀	0,9
SO₂	0,01
NO₂	0,025

Se cuantifica el precio social por tonelada de contaminante como la multiplicación de tres factores; coeficiente aplicable a zona saturada (1,2), el costo social per cápita y la población de la comuna. La fórmula de cálculo se muestra en la ecuación (29).

$$T_{ij} = CCA_j * CSCpci * Pob_j \text{ [US/ton]} \quad (29)$$

Donde:

T_{ij} : Precio social por tonelada del contaminante i en la comuna j.

CCA_j : Coeficiente de calidad del aire en la comuna j. Se considera igual a 1,2.

$CSCpci$: Costo social per cápita del contaminante i según la Tabla 68.

Pob_j : Población de la comuna j.

En el Caso 1 la planta se ubica en la comuna de Renca, donde se considera una población de 151.500 personas mientras que en el Caso 2 el proyecto se instala en la comuna de Talagante donde se estima una población de 70.720 personas. En base a estos datos se obtiene el precio social por tonelada de contaminante para ambos casos suponiendo que las emisiones afectan al 10% de la población de cada comuna.

Caso 1:

$$T_{MP_{10}-Renca} = 1,2 * 0,9 * 151.500 * 0,1 = 16.362 \text{ [US/ton]}$$

$$T_{NO_2-Renca} = 1,2 * 0,025 * 151.500 * 0,1 = 455 \text{ [US/ton]}$$

$$T_{SO_2-Renca} = 1,2 * 0,01 * 151.500 * 0,1 = 189 \text{ [US/ton]}$$

Caso 2:

$$T_{MP_{10}-Talagante} = 1,2 * 0,9 * 70.720 * 0,1 = 7.638 \text{ [US/ton]}$$

$$T_{NO_2-Talagante} = 1,2 * 0,025 * 70.720 * 0,1 = 212 \text{ [US/ton]}$$

$$T_{SO_2-Talagante} = 1,2 * 0,01 * 70.720 * 0,1 = 85 \text{ [US/ton]}$$

Los parámetros de emisión de la Tabla 52 permiten determinar proporcionalmente las toneladas emitidas en el Caso 1. El precio social por tonelada para el monóxido de carbono (CO) se calcula como su índice *GWP* igual a 2,8 por el precio asumido del CO₂e de 8 [USD/ton] lo que entrega un valor de 22,4 [USD/ton]. Con todo lo anterior se obtiene el costo social total de emisiones para el Caso 1 y Caso 2 expuestos en la Tabla 69 y Tabla 70 respectivamente.

Tabla 69: Costo social por emisiones atmosféricas Caso 1.

Caso 1			
Contaminante	Precio [USD/ton]	Emisión [ton/año]	Total [USD/año]
MP10	16.362	143,5	2.347.947
CO	22,4	49,6	1.111
NO₂	455	141,7	64.474
SO₂	189	60,2	11.378
Costo social			2.424.909

Tabla 70: Costo social por emisiones atmosféricas Caso 2.

Caso 2			
Contaminante	Precio [USD/ton]	Emisión [ton/año]	Total [USD/año]
MP10	7.638	300	2.291.400
CO	22,4	758	16.979
NO₂	212	1.030	218.360
SO₂	85	352	29.920
Costo social			2.556.659

En consecuencia, el costo social total para cada caso, es la suma del costo social de la mano de obra y el costo social de las emisiones atmosféricas de la planta. Los costos sociales totales se resumen en la Tabla 71. Este valor se introduce luego en el flujo de caja para para obtener el VAN social de los proyectos.

Tabla 71: Resumen de costo social para ambos casos.

	Caso 1	Caso 2	Unidad
Costo social mano de obra	181.482	662.650	[USD/año]
Costo social emisiones	2.424.909	2.556.659	[USD/año]

4.2.2. Beneficios sociales

4.2.2.1. Reducción de emisiones en relleno sanitario

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha desarrollado un software llamado LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) para estimar las emisiones de GEI en rellenos sanitarios. El modelo opera bajo una función exponencial negativa descrita en el numeral 2.4. Se realiza un análisis de las emisiones de GEI que producirían los RSM tratados en las PVT si su destino fuera un relleno sanitario. El análisis considera emisiones entre los años 2018 y 2038 con los valores convencionales expuestos en Tabla 72.

Tabla 72: Parámetros para modelo de emisión de GEI en rellenos sanitarios.

Parámetro	Descripción	Valor
k	índice de generación de metano [año^{-1}]	0,05
L_0	Capacidad potencial de generación de metano [m^3/ton]	170
NMOC	Compuestos orgánicos distintos del metano [ppmv]	400

Caso 1:

En el Caso 1 la PVT de RSM por gasificación de antorcha de plasma se ubica en el radio urbano y presenta una capacidad anual de recepción de residuos igual a 73.000 [ton]. Es importante notar que las emisiones de GEI en un relleno sanitario se mantienen luego del cierre del relleno sanitario, lo que conlleva un impacto ambiental sustantivo posterior al cierre. Este hecho se aprecia en la Figura 30 donde las emisiones de GEI alcanzar su máximo en el año de cierre 2038 y luego decaen paulatinamente.

Es por ello que los terrenos de disposición final pierden su valor para otros usos luego del cierre y además es necesario continuar invirtiendo en tratamiento de gases y lixiviados durante al menos 20 años. La Figura 30 grafica las emisiones de metano, dióxido de carbono y emisiones totales de GEI en un relleno sanitario producto de la disposición de los RSM que son tratados en la planta del Caso 1.

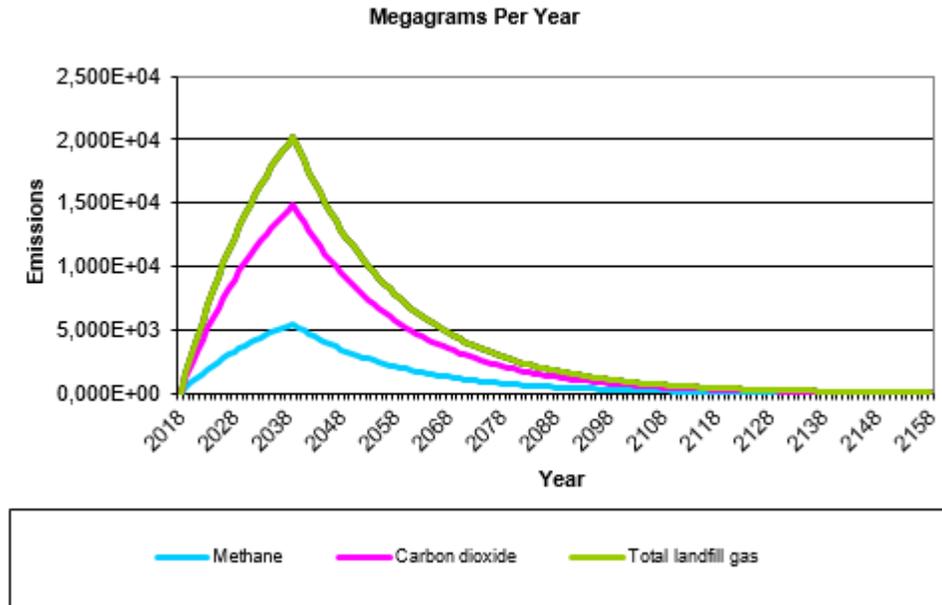


Figura 30: Emisiones de GEI en relleno sanitario Caso 1.

La Tabla 73 muestra las toneladas de GEI emitidas durante los 20 años de operación supuestos en el modelo. Se observa que el dióxido de carbono representa el 73% de las emisiones totales de GEI.

Tabla 73: Emisiones totales de GEI en relleno sanitario Caso 1.

Contaminante	Emisión total	Emisión total CO _{2e}
GEI total	238.364 [ton]	1.511.757
CO ₂	174.695 [ton]	174.695
CH ₄	63.670 [ton]	1.337.062

Para cuantificar los beneficios sociales de la reducción de emisiones, se considera un ingreso anual constante obtenido como las toneladas totales emitidas desde la Tabla 73 divididas en 20 años multiplicado por el valor social de las emisiones. Esto equivale a asumir que la reducción de GEI anual para el Caso 1 es igual 75.588 [ton CO_{2e}]. El valor social de las emisiones de GEI se extrae desde la el informe de precios sociales vigentes 2015 del MDS [62] igual a 2.213 [CLP]. Aplicando la tasa de cambio de este trabajo, el valor social de las emisiones es 3,2 [USD/tonCO_{2e}]. En consecuencia el beneficio social por disminución de GEI en el Caso 1 se obtiene como sigue.

$$\frac{1.511.757 [tonCO_{2e}]}{20 [año]} * 3,2 \left[\frac{USD}{tonCO_{2e}} \right] = 241.881 \left[\frac{USD}{año} \right]$$

Caso 2:

Se realizan los cálculos de forma análoga al Caso 1 considerando una tasa de recepción de residuos de 401.500 [ton] anualmente durante 20 años. La Figura 31 muestra como varían las emisiones en de GEI en un relleno sanitario de acuerdo a los resultados del software LandGEM. Por su parte la Tabla 74 contiene las toneladas totales emitidas en los 20 años de operación.

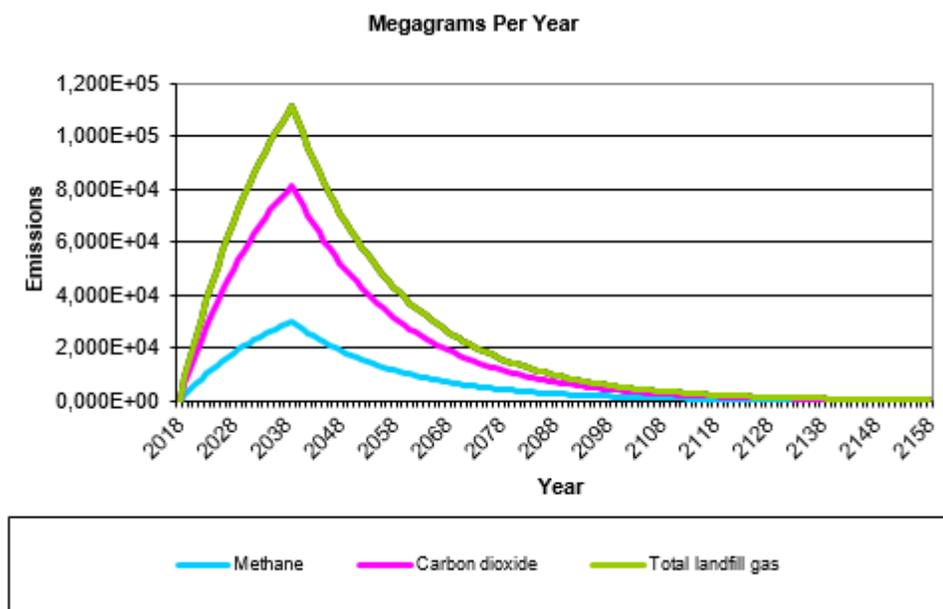


Figura 31: Emisiones de GEI en relleno sanitario Caso 2.

Tabla 74: Emisiones totales de GEI en relleno sanitario Caso 2.

Contaminante	Emisión total [ton]	Emisión total [ton CO _{2e}]
GEI total	1.311.003	8.314.663
CO ₂	960.820	960.820
CH ₄	350.183	7.353.843

El proyecto de generación del Caso 2 produce una reducción de GEI anual equivalente a 8.312.663 [tonCO_{2e}]. El beneficio social de esta reducción se estima en 1.330.346 [USD/año] según el siguiente cálculo.

$$\frac{8.314.663 \text{ [tonCO}_{2e}\text{]}}{20 \text{ [año]}} * 3,2 \left[\frac{\text{USD}}{\text{tonCO}_{2e}} \right] = 1.330.326 \left[\frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

La Tabla 75 resume las emisiones de dióxido de carbono equivalente y su respectivo beneficio social para ambos casos.

Tabla 75: Beneficio social por reducción de emisiones en relleno sanitario.

	Caso 1	Caso 2	Unidad
Emisión total	1.511.757	8.314.663	[ton CO _{2e}]
Beneficio social	241.881	1.330.346	[USD/año]

4.2.2.2. Reducción de emisiones por flujo de camiones

Este análisis se realiza exclusivamente para el Caso 1 ya que en el Caso 2 la planta se ubica junto al relleno sanitario por lo tanto el flujo de camiones hacia el lugar se supone invariante. Para el Caso 1, la planta se ubica a 32 [km] del relleno sanitario Santiago Poniente. Por lo tanto, se considera que en la situación sin proyecto los residuos son llevados desde el punto donde se ubica la planta hasta el relleno sanitario.

Para el transporte se modela un camión de recolección tipo con motor de 280 [HP] equivalente a 208,8 [kW], capacidad de transporte 8 [Ton] y rendimiento 0,25 [L/Km]. Los factores de emisión se obtienen desde Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Proyectos Inmobiliarios para la Región Metropolitana [60].

Tabla 76: Factor de emisión para camión recolector en evaluación social. Fuente [60]

<i>fe</i>	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx [g/kWh]	MP [g/kWh]
Camión	3	1,35	14,36	1,1

La cantidad de contaminantes emitidos anualmente producto de la combustión interna de los camiones se obtiene a partir de la ecuación (28).

$$E_{camión} = \frac{n * fe * T * t * C * P}{10^6}$$

Donde:

n=Número de camiones.

Fe=Factor de emisión [g/kWh].

T=Días de operación anual [día].

t=Carga de trabajo [h/día].

C=Porcentaje de carga [%].

P=Potencia del camión [kW].

Se supone que el camión en estudio realiza el trayecto de 32 [km] a una velocidad promedio de 50 [km/h]. A ello se suma un tiempo de carga y descarga promedio de 0,6 [h] con el motor encendido por lo que el tiempo total de caja viaje (ida y vuelta) es de 2,5 [h]. En consecuencia, se requieren tres camiones que realicen nueve viajes de ida y vuelta al relleno sanitario diariamente donde cada camión opera 22,5 [h/día]. La Tabla 77 resume los parámetros a utilizar.

Tabla 77: Parámetros para cálculo de emisiones por transporte en evaluación social.

	<i>n</i>	<i>P</i> [kW]	<i>C</i> [%]	<i>T</i> [día]	<i>t</i> [h/día]
Camión	3	208,8	0,75	365	22,5

$$E_{CO-camión} = \frac{3 * 3 * 365 * 22,5 * 0,75 * 208,8}{10^6} = 11,6 [ton/año]$$

$$E_{HC-camión} = \frac{3 * 1,35 * 365 * 22,5 * 0,75 * 208,8}{10^6} = 5,2 [ton/año]$$

$$E_{NOx-camión} = \frac{3 * 14,36 * 365 * 22,5 * 0,75 * 208,8}{10^6} = 55,4 \text{ [ton/año]}$$

$$E_{MP-camión} = \frac{3 * 1,1 * 365 * 22,5 * 0,75 * 208,8}{10^6} = 4,2 \text{ [ton/año]}$$

En base a lo anterior, los niveles de emisión por motores de combustión de camiones en el escenario sin proyecto se muestran en la Tabla 78.

Tabla 78: Emisión anual por transporte en evaluación social

	CO [ton/año]	HC [ton/año]	NOx [ton/año]	MP [ton/año]
Camión	11,6	5,2	55,4	4,2

Cuantificando las emisiones anuales con los precios sociales del MDS, los beneficios por reducción de emisiones suman 44.559 [USD/año].

4.2.2.3. Ahorro de petróleo diésel por flujo de camiones

Se modela un camión con un rendimiento promedio de 0,25 [L/Km], por lo tanto la cantidad de combustible consumido se obtiene como el rendimiento por el número de camiones, los kilómetros recorridos diariamente y el número de días del año. Un viaje de ida y vuelta al relleno sanitario Santiago poniente representa 64 [Km] recorridos. Como se supuso que un camión realiza 9 viajes diarios, se tiene que cada uno recorre 576 [Km] al día. Según lo anterior se calculan los litros de petróleo diésel consumidos anualmente como sigue.

$$Combustible = 0,25 * 3 * 576 * 365 = 157.680 \text{ [L]}$$

La ecuación anterior determina un consumo de 157.680 [L] de petróleo diésel por concepto de transporte de residuos desde la comuna de Renca al relleno sanitario más cercano. Se valoriza el combustible según el precio social que asigna el MDS [62] igual a 422 [CLP/L] equivalente a 0,612 [USD/L] según la tasa de cambio de este trabajo. En consecuencia el beneficio social por ahorro de petróleo diésel se estima en 96.500 [USD/año].

4.2.2.4. Desplazamiento de generación convencional

La generación renovable en PVT de RSM produce energía eléctrica que de otra forma provendría desde generadores convencionales. El desplazamiento de la generación térmica convencional involucra disminución de emisiones atmosféricas. La alta tasa de emisión desde fuentes térmicas convencionales se hace evidente al observar los factores de emisión de CO₂ del SING y el SIC publicados en el portal web de energía abierta [52]. Los factores de emisión del SIC y SING son 0,33 [tonCO₂/MWh] y 0,79 [tonCO₂/MWh]⁶ respectivamente. El SING es un sistema eminentemente térmico con un 94% de centrales de este tipo, razón por la que su factor de emisión promedio es superior al doble del factor de emisión del SIC.

⁶ Valores calculados en base a los datos del año 2014 publicados en www.energiabierta.cl.

Para el cálculo de emisiones desplazadas se utiliza el promedio simple entre los factores de emisión de ambos sistemas igual a 0,56 [tonCO₂/MWh]. El valor por tonelada de CO₂ es igual a 3,2 [USD/tonCO₂]. En base a lo anterior, y considerando la energía anual generada en cada caso según la Tabla 33, se cuantifica el beneficio social por desplazamiento de emisiones desde plantas convencionales expuesto en la Tabla 79.

Tabla 79: Beneficio social por desplazamiento de generación convencional.

	Generación anual [MWh/año]	Precio social [USD/tonCO₂]	Beneficio social [USD/año]
Caso 1	38.033	3,2	121.706
Caso 2	187.902	3,2	601.286

4.2.2.5. *Liberación de terreno en relleno sanitario*

La disposición final en rellenos sanitarios posee una serie de externalidades negativas, entre las cuales se destaca el uso de grandes extensiones de terreno y la contaminación del suelo producto de la filtración de lixiviados en las capas freáticas. Se considera que los residuos son depositados en el relleno sanitario con una densidad igual a 0,55 [ton/m³] obtenida desde un estudio para KDM realizado el año 2009 [23].

Para el Caso 1 se tiene que la capacidad de la planta es de 200 [ton/día] y un 5% de los residuos son no recuperables. Por lo tanto, anualmente se evita la disposición final de 69.350 [ton] de RSM en rellenos sanitarios. Este valor se divide por la densidad para obtener el volumen de residuos tratados igual a 126.091 [m³/año]. Luego, si se supone una altura promedio del relleno sanitario de 18 [m] la superficie liberada es 7.005 [m²]. Esta superficie se valora con el precio del metro cuadrado para un relleno sanitario utilizado en el numeral 3.4.6 igual a 13 [UF/m²], con lo cual se cuantifica la liberación de terreno del Caso 1 con un valor de 3.431.460 [USD/año].

El mismo procedimiento aplica para el Caso 2 donde la capacidad de la planta es de 1100 [ton/día] y el porcentaje de masa de residuos no recuperable es 8%. Por lo tanto, la cantidad de RSM desviada es 369.380 [ton] cada año. Bajo el supuesto de densidad y altura del relleno sanitario, esta cantidad equivale a 37.311 [m²] liberados que a su vez representan un beneficio social igual a 18.277.037 [USD/año].

La Tabla 80 muestra los beneficios sociales para cada ítem de evaluación y entrega además la suma total que posteriormente se introduce al flujo de caja para calcular el VAN social.

Tabla 80: Resumen beneficios sociales.

	Caso 1 [USD/año]	Caso 2 [USD/año]
Reducción emisiones en relleno sanitario	241.881	1.330.346
Ahorro de petróleo diésel por flujo de camiones	96.500	-
Reducción emisiones por flujo de camiones	44.559	-
Desplazamiento de generación convencional	121.706	601.286
Liberación de terreno en rellenos sanitarios	3.431.460	18.277.037
Beneficio social total	3.936.106	20.208.669

4.2.3. Indicadores de inversión de la evaluación social

Para obtener los indicadores de inversión sociales, se introducen los beneficios y costos sociales al flujo de caja con la tasa de descuento social (precio social del capital) propuesta por el MDS de 6% anual [62]. La tasa de descuento social representa el costo en que incurre la sociedad cuando el sector público extrae recursos para financiar sus proyectos. Los indicadores de inversión para la evaluación social se muestran en la Tabla 81 mientras que el detalle del flujo de caja se encuentra en el Anexo C.

Tabla 81: Indicadores de inversión evaluación social.

Caso 1		Caso 2	
Indicador	Valor	Indicador	Valor
VAN social	\$ 1.864.482	VAN social	\$ 318.203.541
TIR	6%	TIR	40%
PRC	14 años	PRC	3 años

En la Tabla 81 se observa un aumento sustancial de valor actual neto social de los proyectos al comparar con los valores privados de la Tabla 61. El Caso 1 presenta un aumento del VAN igual a 108% mientras que en el Caso 2 varía 250%. El Caso 2 presenta una variación más elevada ya que la cantidad de residuos tratados es sustancialmente mayor que en el Caso 1 lo que implica mayores beneficios sociales. La liberación de terreno en rellenos sanitarios representa más de cinco veces el beneficio social del Caso 1. El mismo fenómeno se da al calcular los beneficios sociales por reducción de GEI en rellenos sanitarios.

Los costos sociales de ambos casos son similares ya que el Caso 1 emite mayor cantidad de material particulado, el cual es cuantificado con un alto valor social según los precios sociales de la ley 20.780. Las otras emisiones contaminantes son menores en el Caso 1, sin embargo su costo social es menor.

El Caso 1, aunque rentable, posee un VAN social bajo en relación a la inversión necesaria. Una forma de mejorar el flujo de caja es adquirir crédito. El financiamiento por deuda permite al proyecto adquirir un escudo tributario que se cuantifica como la suma de los impuestos que son descontados producto de los intereses de la deuda. Para efectos de mejorar los indicadores de inversión del proyecto del Caso 1, se suponen tres niveles de deuda de 10%, 30% y 50% con una tasa del crédito igual a 5% anual. Si bien la deuda mejora los flujos de caja, al mismo tiempo agrega mayor incertidumbre, por lo que financiar el proyecto con un porcentaje mayor de deuda puede ser contraproducente. Los resultados al aplicar deuda para el proyecto del Caso 1 se muestran en la Tabla 82.

Tabla 82: Indicadores de inversión evaluación social Caso 1 con deuda.

Deuda 10%		Deuda 30%		Deuda 50%	
Valor	Indicador	Valor	Indicador	Valor	Indicador
VAN social	\$ 2.632.748	VAN social	\$ 4.169.280	VAN social	\$ 5.705.812
TIR	7%	TIR	7%	TIR	8%
PRC	15 años	PRC	17 años	PRC	20 años

Naturalmente el VAN social es mayor para el nivel más alto de deuda al igual que la TIR. Sin embargo el periodo de recuperación de capital parece desfavorable a mayor nivel de deuda. Esto se debe a que la inversión se distribuye en el tiempo por lo tanto toma más tiempo cubrirla. Para el Caso 2 no se realiza el análisis de financiamiento con deuda ya que se considera que el VAN social del proyecto puro es suficiente para tomar la decisión de invertir.

4.2.4. Comentarios sobre la evaluación social

Los detractores de las tecnologías térmicas de valorización energética de residuos establecen que estas plantas obstaculizan el crecimiento en la tasa de reciclaje, ya que poseen una capacidad de tratamiento que debe suplirse y muchos materiales reciclables poseen un alto poder calorífico como los plásticos y los cartones. Sin embargo, la evidencia que soporta esta afirmación no es concluyente a juicio del autor. Tal como se expresó en el numeral 2.2.1, las regiones de Estados Unidos con plantas valorización energética de residuos presentan las tasas de reciclaje más elevadas del país lo cual contradice la idea anterior.

Un segundo argumento en contra de las PVT de RSM es que no son compatibles con el concepto de *zero waste solution*. Este concepto establece que las sociedades deben asimilar sus desechos de forma que no exista necesidad de tratamientos térmicos o de disposición final luego de seguir el orden de la jerarquía de manejo de residuos expuesto en el numeral 2.1. Se justifica además que los tratamientos térmicos poseen un alto costo y aunque reducen el volumen de los residuos, igualmente se hace necesario el uso de rellenos sanitarios para la disposición final de sus propios residuos, algunos de alta toxicidad.

Con respecto al contexto social, es usual que proyectos de generación eléctrica tengan oposición por parte de las comunidades cercanas debido a las externalidades de congestión, emisiones e impacto visual cerca de la planta. Considerando además que el proyecto del Caso 1 se diseña dentro de la ciudad, es necesario establecer vínculos y conversaciones con los residentes. Normalmente se efectúan rondas de reuniones públicas para mostrar el proyecto y recibir las percepciones de los residentes con el fin de integrarlas en el desarrollo de la planta.

Se pone como ejemplo el caso de la ciudad de Seúl, Corea del Sur, donde existen cinco PVT de RSM de incineración dentro del radio urbano, construidas por la falta de espacios para nuevos rellenos sanitarios. Algunos de los acuerdos alcanzados con los residentes fueron una disminución de hasta 70% en las cuentas de electricidad para viviendas en un radio de 300 [m] de la planta. También, los proyectos incluyeron la construcción de áreas de recreación en los alrededores o en antiguos rellenos sanitarios y el desarrollo de programas de educación ambiental con charlas guiadas dentro de la planta permitiendo mayor conocimiento del proceso y sus beneficios respecto a la disposición final.

Existen beneficios sociales no cuantificados en este trabajo pero no por eso menos relevantes. La mayoría de ellos corresponden a la reducción de impactos producto de la disposición final en rellenos sanitarios y vertederos. A continuación se identifican beneficios sociales derivados de proyectos de valorización térmica de RSM.

- a) Disminución de malos olores en rellenos sanitarios y vertederos.
- b) Disminución de vectores que propagan enfermedades en rellenos sanitarios y vertederos.
- c) Disminución del riesgo de contaminación de los mantos freáticos por lixiviados en rellenos sanitarios y vertederos.
- d) Mayor información y conciencia ambiental.
- e) Desplazamiento de generación eléctrica o vapor con combustibles fósiles.
- f) Evita desvalorización de terrenos cercanos a rellenos sanitarios y vertederos.
- g) Riesgo de incendio, explosión y derrumbes en rellenos sanitarios y vertederos y sus consecuencias.

5. Conclusión

En esta memoria se analizan las características principales del manejo de residuos sólidos municipales (RSM) en países desarrollados y miembros de la OCDE a fin de encontrar parámetros de comparación con la situación nacional. En primer lugar, la incineración es una técnica ampliamente usada en Europa y en países con limitada superficie como Japón y Corea del Sur. En el mundo, más de 2.200 plantas están en operación y se estima que en los próximos 10 años cerca de 550 nuevas plantas serán construidas, lo cual demuestra su factibilidad económica positiva.

En segundo lugar, las plantas de valorización térmica (PVT) con recuperación de energía de los residuos, han demostrado que su eficiencia de conversión e impacto ambiental son menores que la generación de energía a partir del biogás producido en rellenos sanitarios. Es por ello, que las PVT se ubican como una alternativa sustentable de valorización, previa a la disposición final según la jerarquía de manejo de residuos.

Respecto a las condiciones locales, el mercado chileno de residuos se caracteriza por poseer costos de disposición final sustantivamente bajos en comparación con países OCDE. Además, existe un alto porcentaje de residuos depositados en basurales ilegales que alcanzó 9% el año 2011. Es también relevante la inexistencia de impuestos por disposición final en rellenos sanitarios con el objetivo de desviar los residuos y fomentar su valorización frente a la disposición final. A raíz de lo anterior y considerando los compromisos medioambientales de Chile ante la OCDE, se asume que el costo de disposición final crecerá en el tiempo.

Por otro lado, la información pública sobre caracterización y cuantificación de los residuos sólidos en el país es calificada por las autoridades como escasa y dispersa. Prueba de ello es que los datos más recientes en la bibliografía abierta provienen del primer y único reporte de manejo de residuos sólidos en Chile realizado el año 2010.

En la región Metropolitana las empresas están sujetas a normas de emisión estrictas toda vez que la región fue declarada como zona saturada el año 1996. Esta condición impide la operación de una planta en estado de alerta ambiental e impone restricciones que se espera sean más severas en el próximo plan de descontaminación de Santiago. También existen impuestos a las emisiones que deben ser considerados en la evaluación del proyecto. Lo anterior, sumando al bajo costo de disposición final de los residuos y la falta de información normalizada sobre el manejo de residuos, impone barreras de entrada considerables para una PVT de RSM en la región Metropolitana.

Se deduce entonces que de mantenerse las condiciones actuales, podría existir una crisis en el manejo de residuos sólidos en la región Metropolitana. A partir del primer reporte de manejo de residuos sólidos en Chile, se proyecta un crecimiento de 3% en la generación de RSM. Al considerar que dos de los cuatro rellenos sanitarios de la región Metropolitana tienen fecha de cierre en los próximos 7 años, cerca de 3.800 toneladas diarias de residuos dejarán de ser recibidas, lo que generará un aumento en la demanda por sitios de disposición final. En consecuencia, se prevé una carencia de estos sitios lo que puede llevar a la proliferación de basurales y sitios ilegales de disposición final.

El análisis técnico contempla el estudio de dos casos que se diferencian en su ubicación, capacidad y tecnología de tratamiento. El Caso 1 se sitúa dentro del radio urbano en el área donde se encuentra

la central termoeléctrica Renca en la comuna del mismo nombre, mientras que la planta del Caso 2 se ubica junto al relleno sanitario Santa Marta en la comuna de Talagante.

En el Caso 1, se prioriza un tamaño reducido, bajas emisiones y disminución del impacto urbano. Como resultado, se analiza una planta de gasificación con antorcha de plasma DC de arco no transferido. Las ventajas de esta tecnología son las bajas emisiones de NO₂ y SO₂, ambos altamente dañinos para la salud de las personas y precursores de la lluvia ácida. Además, permite tratar un amplio rango de residuos incluyendo residuos industriales, residuos hospitalarios y residuos peligrosos ya que la temperatura del plasma vitrifica todo el material que por consiguiente se transforma en inerte y reutilizable. Su alto costo se justifica por ser una tecnología emergente en el tratamiento de RSM, además de requerir unidades especiales para el tratamiento del gas sintético y fraccionamiento de aire. Esta planta trata 200 [ton/día] de RSM con una eficiencia eléctrica de 0,521 [MWh/ton]. Se escoge un turbogenerador de 6,25 [MVA] que genera en 13,8 [kV] y se conecta a la red en 110 [kV].

En el Caso 2 se analiza una planta de incineración con lecho fluidizado la cual representa la opción con menores emisiones dentro de las alternativas de incineración. Su principales ventajas son su madures, menor costo de inversión por capacidad de tratamiento y gran capacidad. Además, esta tecnología es usada en Chile para el tratamiento térmico de residuos forestales con recuperación de vapor para la industria maderera e industria del papel. La planta teórica tiene una capacidad de 1100 [ton/día] de RSM con una eficiencia eléctrica de 0,468 [MWh/ton]. La generación eléctrica se realiza a través de dos unidades de 18,75 [MVA] sumando una potencia firme de 31,9 [MW]. El voltaje de generación es 13,8 [kV] y se conecta a la red en 220 [kV].

Se evalúa factibilidad mediante una evaluación económica de ambos casos asumiendo proyectos puros, tasa de descuento privada de 10% anual y horizonte de evaluación de 20 años. Se obtiene que en el Caso 1 de gasificación por antorcha de plasma, no resulta rentable desde el punto de vista privado, ya que a pesar de poseer flujos anuales positivos, su VAN es negativo igual a -\$23.064.243 [USD], su TIR igual a 3% y su periodo de recuperación de capital de 18 años. No obstante, resulta interesante notar que con la reciente promulgación de la ley 20.920, conocida como responsabilidad extendida del productor (REP), queda abierta la posibilidad de tratar productos prioritarios como aceites, pilas, neumáticos y otros que además de tener un poder calorífico mayor, poseen un costo de disposición final elevado. Este trabajo solo analiza el tratamiento de RSM, por lo que se deja propuesto evaluar la viabilidad de gasificación por antorcha de plasma para tratar productos prioritarios según la ley 20.920.

En el Caso 2 se presentan indicadores de inversión favorables; VAN privado igual a 90.878.309 [USD], TIR de 23% y periodo de recuperación de capital de 5 años. El proyecto recibe gran parte de sus ingresos por la venta de energía.

Finalmente, la evaluación social cuantifica los costos y beneficios sociales de ambos proyectos, asignando precios sociales propuestos por el ministerio de desarrollo social y otros asumidos durante el desarrollo del trabajo. Se aplica una tasa social de descuento de 6% anual y se obtiene como resultado que ambos proyectos son socialmente rentables. En el Caso 1 el VAN social es igual a 1.864.482 [USD], la TIR es de 6% y el periodo de recuperación de capital 14 años. Además, el análisis de sensibilidad muestra que el VAN es altamente sensible al costo de inversión, por lo que es recomendable financiar el proyecto con deuda. Se realiza la simulación para tres niveles de

deuda asumiendo una tasa de deuda de 5% anual. Se observa que el VAN social alcanza \$5.705.812 [USD] cuando se adquiere un crédito del 50% del valor de inversión.

El VAN social del Caso 2 asciende a \$ 318.203.541 [USD], su TIR es de 40% y el periodo de recuperación de capital 3 años. Los indicadores de inversión del Caso 2 resultan suficientes para tomar la decisión de invertir incluso si el proyecto se financia sin deuda.

En ambos casos, la evaluación social se limita a los beneficios y costos sociales directos. Sin embargo existen factores sociales indirectos que aunque escapan de este trabajo son de gran importancia, tales como la propagación de enfermedades, mortalidad producto de las emisiones atmosféricas, percepción de la comunidad y efecto sobre el mercado de residuos. Al respecto, se puede decir que la bibliografía destaca las cualidades de la tecnología de gasificación por antorcha de plasma del Caso 1 por su alta eficiencia, menor impacto ambiental que la incineración y alto potencial de desarrollo.

En conclusión, existen condiciones desfavorables para el desarrollo de nuevas alternativas de valorización de RSM en la región Metropolitana. Se identifican acciones por parte de las autoridades para reducir la generación de residuos y fomentar el reciclaje, pero no se visualizan restricciones futuras para la disposición final. Dadas las condiciones actuales, se hace necesario encontrar nuevas alternativas de tratamiento de RSM para contar con procesos más sustentables y mermar la cantidad de residuos eliminados tanto en rellenos sanitarios como en sitios no controlados. Este desafío puede ser correctamente resuelto mediante plantas térmicas de valorización energética. El presente trabajo expone aspectos relevantes para el diseño y la evaluación de proyectos de este tipo, demostrando que tanto la tecnología madura de incineración por lecho fluidizado como la tecnología emergente de gasificación por antorcha de plasma, son beneficiosas para el conjunto de la sociedad y por lo tanto debieran considerarse como una opciones prioritarias en el tratamiento de RSM.

6. Glosario

BT: Baja tensión.

CLP: Peso chileno.

EIA: Estudio de Impacto Ambiental.

ERNC: Energías Renovables No Convencionales.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GRS: Gas de Relleno Sanitario.

kTon: Miles de toneladas.

kV: Kilovoltio.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

MDS: Ministerio de Desarrollo Social.

MW: Mega Watt eléctrico.

MWh: MegaWattthora.

MT: Media tensión.

MTon: Millones de toneladas.

Ppm: Partes por millón.

PVT: Planta de Valorización Térmica.

RM: Región Metropolitana.

RSI: Residuos Sólidos Industriales.

RSM: Residuos Sólidos Municipales.

SIC: Sistema Interconectado Central.

SING: Sistema Interconectado del Norte Grande.

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental.

SPR: Sistema de Pretratamiento de Residuos.

UF: Unidad de Fomento.

USD: Dólar Estadounidense.

UTM: Unidad Tributario Mensual.

WTE: *Waste to Energy*.

7. Bibliografía

- [1] Ministerio del Medio Ambiente. 2011. Informe del Estado del Medio Ambiente. [en línea]. <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-52016.html>
- [2] Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2005. Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos. 2005. [en línea]. http://www.sinia.cl/1292/articles-26270_pol_rsd
- [3] European Commission. 2006. BREF of Waste Incineration, Integrated Pollution Prevention and Control. [en línea] < http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf >
- [4] World Bank. 1999. Municipal Solid Waste Incineration, Technical Guidance Report. [en línea] http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/Waste%20Incineration.pdf
- [5] Organisation for Economic Co-operation and Development (OCDE). 2013. Waste Management Services. [en línea] <http://www.oecd.org/daf/competition/Waste-management-services-2013.pdf>
- [6] International Energy Agency (IEA). 2016. Key Renewables Trends. Excerpt from: Renewables information. [en línea]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyRenewablesTrends.pdf>
- [7] International Energy Agency (IEA). 2016. Recent trends in the OECD: energy and CO₂ emissions. [en línea]. http://www.iea.org/media/statistics/Recent_Trends_in_the_OECD.pdf
- [8] International Solid Waste Association (ISWA). 2012. Waste to Energy State of the Art Report 6th Edition [en línea] < <http://www.cewep.eu/information/data/iswawtstateofheartreport/index.html> >
- [9] C.S. Psomopoulos “et al”. 2009. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA [en línea] < <https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwi2gZvdyvrLAhUMFZAKHczOBpoQFggsMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.wiwmd.com%2Fdocument%2FWaste%20EnergyReview%20of%20the%20Status%20and%20Benefits%20in%20the%20USA.pdf&usq=AFQjCNGCfxOGtyPqioNF6sKNT3IsX7WVxw&bvm=bv.118443451,d.Y2I&cad=rja> >
- [10] Kaplan O. P., Decarolis J. and Thorneloe S. 2009. Is it better to Burn or Bury Waste for Clean Electricity Generation? [en línea] <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es802395e>
- [11] National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2013. Waste Not, Want Not: Analyzing the Economic and Environmental Viability of Waste-to-Energy (WTE) Technology for Site-Specific Optimization of Renewable Energy Options [en línea] <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/52829.pdf>
- [12] Lisa Branchini. 2015. Waste-to-Energy, Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants

- [13] Afval Energie Bedrijf (AEB). 2016. [en línea]. <http://www.aebamsterdam.com/about/technology/> [consulta: 8 de Septiembre de 2016]
- [14] Yoonjung Seo. 2013. Current MSW Management and Waste-to-Energy Status in the Republic of Korea. Columbia University [en línea]. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/YS%20Thesis_final_Nov3.pdf
- [15] Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2006. Caracterización de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Región Metropolitana, Informe Final. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). [en línea] http://www.sinia.cl/1292/articles-39508_pdf_informeF.pdf
- [16] Centro de Investigación Periodística (CIPER). 2015. El Mapa de Chile del Millonario Negocio de la Basura [en línea] <http://ciperchile.cl/2015/05/26/el-mapa-de-chile-del-millonario-negocio-de-la-basura/> [consulta: 9 de mayo de 2016]
- [17] Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2010. Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). [en línea] http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf
- [18] Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE), Municipal Waste [en línea] <https://data.oecd.org/waste/municipal-waste.htm> [consulta: 6 de mayo 2016]
- [19] KDM. 2013. Valorización de Residuos Orgánicos. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). [en línea] http://www.sinia.cl/1292/articles-54530_valorizacionKDM2013.pdf
- [20] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2016. Environmental Performance Reviews, Chile. [en línea] http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/environment/oecd-environmental-performance-reviews-chile-2016_9789264252615-en#page96
- [21] Servicio de Evaluación Ambiental. 2016. Estudio de Impacto Ambiental http://www.e-seia.cl/seia-web/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=3869&idExpediente=3869
- [22] Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. 2015. Castro de Residuos Sólidos 2015 [en línea]. <https://www.gobiernosantiago.cl/informacion-relevante-de-la-region-metropolitana/catastro-de-residuos-solidos-2015>
- [23]Marko Amovic & Fredrik Johansson. 2009. Pre-feasibility study of a Waste to Energy plant in Santiago de Chile. Umea University. [en línea] http://www8.tfe.umu.se/courses/energi/ExjobbCivIngET/Rapporter/Marko_A_Fredrik_J_2009.pdf
- [24] U.S. Environmental Protection Agency & Combined Heat and Power Partnership. 2007. Biomass Combined Heat and Power, Catalog of Technologies. [en línea]

https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/biomass_combined_heat_and_power_catalog_of_technologies_v.1.1.pdf

[25] División de Recursos Naturales, Residuos y Evaluación de Riesgo Puerto Montt, Ministerio del Medio Ambiente. 2013. Política de Residuos, Seminario de Valorización-Mayo 2013. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). [en línea]

http://www.sinia.cl/1292/articles-54530_politicaDeResiduos_MMA2013.pdf

[26] EUR-Lex. 2000. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council on the incineration waste. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32000L0076>

[27] Paula Estevez. 2003. Management of Municipal Solid Waste in Santiago, Chile: Assessing Waste-to Energy Possibilities.

[28] Amphos21. 2013. Antecedentes del Aprovechamiento Energético de la Fracción Biodegradable de los Residuos Sólidos Domiciliarios y No Domiciliarios. [en línea]. http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/11_Informe%20Final_Antecedentes%20de%20aprovechamiento%20energ%C3%A9tico%20de%20la%20fracci%C3%B3n%20biodegradable%20de.pdf

[29] Rubel Fred. N. 1. 1974. Incineration of Solid Wastes. Park Ridge, New Jersey, United States of America. Noyes Data Corporation. pp 76-80

[30] Umwelt Bundesamt. 2001. Draft of a German Report with basic informations for BREF-Documents "Waste Incineration". [en línea] <
http://files.gamta.lt/aaa/Tipk/tipk/4_kiti%20GPGB/63.pdf>

[31] Niessen Walter R. 2010. Combustion and Incineration Processes, Applications in Environmental Engineering. Andover, Massachusetts, United States of America. CRC Press.

[32] Juniper. 2008. Independent Waste Technology Report, The Alter NRG/Westinghouse Plasma Gasification Process. [en línea]. http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2013/09/Westinghouse_Plasma_Gasification.pdf

[33] Caroline Ducharme. 2010. Technical and Economic Analysis of Plasma-assisted Waste to Energy Processes. [en línea].
http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/ducharme_thesis.pdf

[34] AlterNRG. 2016. Waste to Energy Projects. [en línea].
http://www.alternrg.com/waste_to_energy/projects/ [consulta: 3 de agosto de 2016].

[35] Margallo M "et al". 2012. Best Available Techniques in Municipal Solid Waste Incineration: State of the Art in Spain and Portugal. [en línea]
https://www.researchgate.net/publication/250916261_Best_Available_Techniques_in_Municipal_Solid_Waste_Incineration_State_of_the_Art_in_Spain_and_Portugal

[36] Juan Carlos Elicer. 2016. Elementos de combustión, Apuntes de clase EL5300 Máquinas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

[37] Marión Díaz. 2016. Modelo de Cálculo de Eficiencia Térmica de una Central de Lecho Fluidizado en Función de la Composición del Carbón. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

[38] Claudio Mataix. 1998. Turbomáquinas Térmicas, Turbinas de Vapor, Turbinas de Gas, Turbocompresores. Editorial CIE DOSSAT 2000. 96-97 pp.

[39] John B. Kitto and Steven C. Stulz. 2005. Steam/its Generation and use, 41ST edition. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A.

[40] Wondwossen Bogale, Federico Vigano. 2013. A Preliminary Comparative Performance Evaluation of Highly Efficient Waste-to-Energy Plants. [en línea]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214001386>

[41] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2012. D.S. N° 38/11 MMA, Norma de Emisión de Ruidos Generados por Fuentes que Indica. XII Seminario de Contaminación Acústica y Control de Ruido Ambiental. Lámina 11. [en línea] http://www.mma.gob.cl/1304/articles-53375_pdf.pdf

[42] Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2009. Guía Metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes. [en línea]. http://www.mma.gob.cl/retc_ingles/1316/articles-51545_recurso_1.pdf

[43] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2013. Decreto 29, Norma de Emisión para Incineración, Coincineración y Coprocesamiento. [en línea] <http://bcn.cl/1v21k>

[44] Ministerio del Medio Ambiente, OIRS. Lunes 14 de marzo 2016. [en línea] Solicitud N° 1-2016-OC-294. [consulta: 6 de marzo de 2016].

[45] Kas Ingeniería. 2009. Análisis General del Impacto Económico y Social de una Norma de Emisión para Termoeléctricas. [en línea]. http://www.sinia.cl/1292/articles-44963_informe_final_term.pdf

[46] ProChile Alemania. 2012. Estudio de Mercado Bonos de Carbono. [en línea]. <http://www.prochile.gob.cl/documento-biblioteca/estudio-de-mercado-bonos-de-carbono-alemania/>

[47] Karen Greenhill Gálvez. 2013. Estudio del Mercado del Carbono en Chile. [en línea]. http://www.iei.uchile.cl/documentos/estudio-de-caso-completo_95581_0_0455.pdf

[48] Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2013. Actualización de la Información sobre Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Directos del Minería del Cobre al año 2013. [en línea]. http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Informe_GEI_2014_vf.pdf

[49] Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2012. Decreto 38, Norma de Emisión de Ruidos Generados por Fuentes que Indica. [en línea] http://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=1040928

- [50] Raúl Morales. 2006. Contaminación Atmosférica Urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria.
- [51] Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. 2016. [en línea]. www.sinca-mma.gob.cl [consulta: 22 de Junio de 2016]
- [52] Energía Abierta. 2016. [en línea]. <http://energiaabierta.cne.cl/> [consulta: 23 de Junio de 2016]
- [53] Explorador de Energía Eólica. 2016. Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. [en línea]. <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/> [consulta: 25 de Junio de 2016]
- [54] INTECH, Youngchul Byun “et al”. 2012. Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste. [en línea]. <http://www.intechopen.com/books/gasification-for-practical-applications/thermal-plasma-gasification-of-municipal-solid-waste-msw->
- [55] Siemens. 2016. Siemens Steam Turbine SST-150. [en línea]. <http://www.energy.siemens.com/br/en/fossil-power-generation/steam-turbines/sst-150.htm> [consulta: 13 de agosto de 2016].
- [56] Garret C. Fitzgerald. 2009. Technical and Economic Analysis of Pre-Shredding Municipal Solid Wastes Prior to Disposal. [en línea]. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Garrett_Fitzgerald_MS_Thesis.pdf
- [57] Manuel Treviño Coca. 2003. Tecnología de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado: GICC. Aplicación real en España ELCOGAS. Puertollano.
- [58] Umweltbundesamt. 2002. State of the Art Waste Incineration Planta-Austria [en línea]. http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/industrie/pdfs/english_version.pdf
- [59] United States Environmental Protection Agency (EPA). 2016. Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. [en línea] <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/> [consulta: 12 de Julio de 2016].
- [60] Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana. 2012. Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Proyectos Inmobiliarios para la Región Metropolitana [en línea]. http://www.sinia.cl/1292/articles-51710_Guia_SEA_Aire_11012012.pdf
- [61] Confederation of European Waste-to-Energy Plants. 2016. What is Waste to Energy Presentation. [en línea] http://www.cewep.eu/information/whatiswastetoenergy/interactivewtepresentation/m_1040
- [62] Ministerio de Desarrollo Social. 2015. Precios Sociales Vigentes. 2015. [en línea]. <http://www.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/>

8. Anexos

Anexo A. Metodologías de medición

Las metodologías de medición para partículas y gases se indican en la siguiente tabla.

Contaminante	Método de medición
MP	Método CH-5, Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias.
SO ₂	Método CH-6C, Determinación de las emisiones de dióxido de azufre desde fuentes fijas (Procedimiento con analizador instrumental).
NO _x	Método CH-7E, Determinación de las emisiones de dióxido de nitrógeno desde fuentes estacionarias (Procedimiento con analizador instrumental).
CO	Método CH-10, Determinación de las emisiones de monóxido de carbono desde fuentes estacionarias.
COT	Método CH-25 A, Determinación de la concentración de los compuestos orgánicos volátiles totales mediante un analizador de ionización de flama.
O ₂	Método CH-3A, Determinación de las concentraciones de oxígeno, anhídrido carbónico y monóxido de carbono de las emisiones de fuentes fijas (Procedimiento con analizador instrumental).
Cd, Hg, Pb, Zn, Be, As, Co, Ni, Se, Te, Sb, Cr, Mn, V.	Método CH-29, Determinación de las emisiones de metales de fuentes estacionarias.
HCl, HF	Método CH-26A, Determinación de las emisiones de Halógenos y HALEGENUROS de Hidrogeno de fuentes estacionarias – Método Isocinetico.
C ₆ H ₆	EPA Method 0031, Volatile Organic Sampling Train
Dioxinas y Furanos TEQ	CH-23, Determinación de las emisiones de dibenzo-p-dioxinas y dibenzo furanos policlorados y provenientes de residuos municipales.

Adicionalmente se podrá utilizar un método de medición de referencia o equivalente aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América o por la Unión Europea.

Para los sistemas de monitoreo continuo de emisiones se aceptarán las mediciones realizadas con equipos que cuentan con la aprobación de la USEPA o, en su defecto, con la aprobación de la Unión Europea.

A continuación se presentan los principios de edición continua.

Anexo C. Flujos de caja

a) Caso 1. Proyecto puro.

Caso 1-Proyecto puro	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingresos	0	4.917.329	5.029.674	5.152.557	5.286.967	5.433.984	5.594.792	5.770.683	5.963.073	6.173.509
Costos variables	0	-1.207.502	-1.213.119	-1.219.264	-1.225.984	-1.233.335	-1.241.375	-1.250.170	-1.259.789	-1.270.311
Costos fijos	0	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion	0	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	0	-45.652.759	358.634	475.373	603.062	742.729	895.496	1.062.593	1.245.363	1.445.278
Impuestos (25%)	0	0	89.659	118.843	150.766	185.682	223.874	265.648	311.341	361.319
UDI	0	-45.652.759	268.976	356.530	452.297	557.047	671.622	796.945	934.023	1.083.958
Depreciacion	0	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	0	1.670.640	1.687.709	1.775.264	1.871.031	1.975.780	2.090.356	2.215.678	2.352.756	2.502.692
Inversion	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	-45.904.665	1.670.640	1.687.709	1.775.264	1.871.031	1.975.780	2.090.356	2.215.678	2.352.756	2.502.692

Caso 1-Proyecto puro	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos	6.403.684	6.655.450	6.930.831	7.232.043	7.561.508	7.921.877	8.316.049	8.747.195	9.218.781	9.734.603	10.298.809
Costos variables	-1.281.820	-1.294.408	-1.308.177	-1.323.238	-1.339.711	-1.357.730	-1.377.438	-1.398.995	-1.422.575	-1.448.366	-1.476.576
Costos fijos	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187	-2.039.187
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	1.663.944	1.903.121	2.164.733	2.450.884	2.763.877	3.106.227	3.480.691	3.890.279	4.338.286	4.828.317	5.364.312
Impuestos (25%)	415.986	475.780	541.183	612.721	690.969	776.557	870.173	972.570	1.084.572	1.207.079	1.341.078
UDI	1.247.958	1.427.341	1.623.550	1.838.163	2.072.907	2.329.671	2.610.518	2.917.709	3.253.715	3.621.238	4.023.234
Depreciacion	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	2.666.692	2.846.075	3.042.284	3.256.897	3.491.641	3.748.404	4.029.252	4.336.443	4.672.448	5.039.971	5.441.968
Inversion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.093.669
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.093.669
FLUJO DE CAJA	2.666.692	2.846.075	3.042.284	3.256.897	3.491.641	3.748.404	4.029.252	4.336.443	4.672.448	5.039.971	16.535.637

b) Caso 2. Proyecto puro.

Caso 2-Proyecto puro	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingresos	0	24.940.243	25.558.142	26.234.000	26.973.254	27.781.849	28.666.291	29.633.693	30.691.838	31.849.237
Costos variables	0	-2.480.421	-2.529.853	-2.583.921	-2.643.062	-2.707.749	-2.778.505	-2.855.897	-2.940.548	-3.033.140
Costos fijos	0	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion	0	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	-78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	0	-61.908.686	16.796.895	17.418.685	18.098.798	18.842.706	19.656.392	20.546.402	21.519.895	22.584.702
Impuestos (25%)	0	0	4.199.224	4.354.671	4.524.699	4.710.676	4.914.098	5.136.601	5.379.974	5.646.176
UDI	0	-61.908.686	12.597.671	13.064.013	13.574.098	14.132.029	14.742.294	15.409.802	16.139.922	16.938.527
Depreciacion	0	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	0	18.609.338	14.978.581	15.444.923	15.955.008	16.512.939	17.123.204	17.790.711	18.520.831	19.319.436
Inversion	-78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	-78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	-78.137.114	18.609.338	14.978.581	15.444.923	15.955.008	16.512.939	17.123.204	17.790.711	18.520.831	19.319.436

Caso 2-Proyecto puro	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos	33.115.199	34.499.909	36.014.505	37.671.170	39.483.230	41.465.262	43.633.207	46.004.507	48.598.234	51.435.252	54.538.383
Costos variables	-3.134.417	-3.245.194	-3.366.362	-3.498.895	-3.643.860	-3.802.422	-3.975.858	-4.165.562	-4.373.060	-4.600.021	-4.848.272
Costos fijos	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485	-3.850.485
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	23.749.388	25.023.321	26.416.749	27.940.881	29.607.976	31.431.445	33.425.955	35.607.551	37.993.780	40.603.837	43.458.717
Impuestos (25%)	5.937.347	6.255.830	6.604.187	6.985.220	7.401.994	7.857.861	8.356.489	8.901.888	9.498.445	10.150.959	10.864.679
UDI	17.812.041	18.767.491	19.812.562	20.955.661	22.205.982	23.573.584	25.069.467	26.705.663	28.495.335	30.452.878	32.594.038
Depreciacion	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	20.192.951	21.148.401	22.193.472	23.336.570	24.586.892	25.954.494	27.450.376	29.086.573	30.876.244	32.833.787	34.974.948
Inversion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.904.548
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.904.548
FLUJO DE CAJA	20.192.951	21.148.401	22.193.472	23.336.570	24.586.892	25.954.494	27.450.376	29.086.573	30.876.244	32.833.787	46.879.496

c) Caso 1. Evaluación social.

Caso 1-Evaluación social	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingresos	0	8.853.434	8.965.780	9.088.663	9.223.073	9.370.090	9.530.897	9.706.789	9.899.179	10.109.615
Costos variables	0	-3.632.412	-3.638.029	-3.644.173	-3.650.893	-3.658.244	-3.666.285	-3.675.079	-3.684.699	-3.695.221
Costos fijos	0	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación	0	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	0	-44.120.045	1.891.348	2.008.087	2.135.777	2.275.443	2.428.210	2.595.307	2.778.078	2.977.992
Impuestos (25%)	0	0	472.837	502.022	533.944	568.861	607.053	648.827	694.519	744.498
UDI	0	-44.120.045	1.418.511	1.506.066	1.601.833	1.706.582	1.821.158	1.946.480	2.083.558	2.233.494
Depreciación	0	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	0	3.203.354	2.837.245	2.924.799	3.020.566	3.125.316	3.239.892	3.365.214	3.502.292	3.652.228
Inversion	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	-45.904.665	3.203.354	2.837.245	2.924.799	3.020.566	3.125.316	3.239.892	3.365.214	3.502.292	3.652.228

Caso 1-Evaluación social	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos	10.339.790	10.591.555	10.866.936	11.168.148	11.497.614	11.857.983	12.252.155	12.683.300	13.154.887	13.670.709	14.234.914
Costos variables	-3.706.729	-3.719.318	-3.733.087	-3.748.147	-3.764.621	-3.782.639	-3.802.348	-3.823.905	-3.847.484	-3.873.275	-3.901.486
Costos fijos	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	3.196.658	3.435.835	3.697.447	3.983.599	4.296.591	4.638.942	5.013.405	5.422.993	5.871.001	6.361.031	6.897.026
Impuestos (25%)	799.165	858.959	924.362	995.900	1.074.148	1.159.735	1.253.351	1.355.748	1.467.750	1.590.258	1.724.257
UDI	2.397.494	2.576.877	2.773.086	2.987.699	3.222.443	3.479.206	3.760.054	4.067.245	4.403.250	4.770.773	5.172.770
Depreciación	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	3.816.227	3.995.610	4.191.819	4.406.433	4.641.177	4.897.940	5.178.788	5.485.979	5.821.984	6.189.507	6.591.504
Inversion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.093.669
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.093.669
FLUJO DE CAJA	3.816.227	3.995.610	4.191.819	4.406.433	4.641.177	4.897.940	5.178.788	5.485.979	5.821.984	6.189.507	17.685.172

d) Caso 2. Evaluación social.

Caso 2- Evaluación social	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingresos	0	45.148.912	45.766.811	46.442.669	47.181.923	47.990.518	48.874.960	49.842.363	50.900.507	52.057.906
Costos variables	0	-5.037.080	-5.086.512	-5.140.580	-5.199.721	-5.264.408	-5.335.164	-5.412.556	-5.497.207	-5.589.799
Costos fijos	0	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion	0	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	-78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	0	-44.194.326	34.511.255	35.133.045	35.813.158	36.557.066	37.370.752	38.260.763	39.234.256	40.299.063
Impuestos (25%)	0	0	8.627.814	8.783.261	8.953.290	9.139.266	9.342.688	9.565.191	9.808.564	10.074.766
UDI	0	-44.194.326	25.883.442	26.349.784	26.859.869	27.417.799	28.028.064	28.695.572	29.425.692	30.224.297
Depreciacion	0	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	0	36.323.698	28.264.351	28.730.693	29.240.778	29.798.709	30.408.974	31.076.481	31.806.601	32.605.206
Inversion	-78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	-78.137.114	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA	-78.137.114	36.323.698	28.264.351	28.730.693	29.240.778	29.798.709	30.408.974	31.076.481	31.806.601	32.605.206

Caso 2- Evaluación social	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos	53.323.869	54.708.579	56.223.175	57.879.840	59.691.900	61.673.931	63.841.877	66.213.176	68.806.903	71.643.922	74.747.053
Costos variables	-5.691.076	-5.801.853	-5.923.021	-6.055.554	-6.200.519	-6.359.081	-6.532.517	-6.722.221	-6.929.719	-7.156.681	-7.404.931
Costos fijos	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135	-3.788.135
Intereses por credito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciacion	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910	-2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	41.463.748	42.737.681	44.131.110	45.655.241	47.322.337	49.145.805	51.140.316	53.321.911	55.708.140	58.318.197	61.173.077
Impuestos (25%)	10.365.937	10.684.420	11.032.777	11.413.810	11.830.584	12.286.451	12.785.079	13.330.478	13.927.035	14.579.549	15.293.269
UDI	31.097.811	32.053.261	33.098.332	34.241.431	35.491.752	36.859.354	38.355.237	39.991.433	41.781.105	43.738.648	45.879.808
Depreciacion	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910	2.380.910
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	33.478.721	34.434.171	35.479.242	36.622.341	37.872.662	39.240.264	40.736.146	42.372.343	44.162.014	46.119.557	48.260.718
Inversion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.904.548
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Capitales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.904.548
FLUJO DE CAJA	33.478.721	34.434.171	35.479.242	36.622.341	37.872.662	39.240.264	40.736.146	42.372.343	44.162.014	46.119.557	60.165.266

e) Caso 1. Evaluación social con deuda de 50%.

Caso 1-Deuda 50%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ingresos	0	8.853.434	8.965.780	9.088.663	9.223.073	9.370.090	9.530.897	9.706.789	9.899.179	10.109.615
Costos variables	0	-3.632.412	-3.638.029	-3.644.173	-3.650.893	-3.658.244	-3.666.285	-3.675.079	-3.684.699	-3.695.221
Costos fijos	0	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669
Intereses por credito	0	-1.147.617	-1.112.910	-1.076.467	-1.038.203	-998.026	-955.839	-911.543	-865.033	-816.197
Depreciacion	0	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	-22.952.333	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	0	-22.315.329	778.439	931.620	1.097.574	1.277.418	1.472.371	1.683.764	1.913.045	2.161.795
Impuestos (25%)	0	0	194.610	232.905	274.393	319.354	368.093	420.941	478.261	540.449
UDI	0	-22.315.329	583.829	698.715	823.180	958.063	1.104.278	1.262.823	1.434.784	1.621.346
Depreciacion	0	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	22.952.333	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	0	2.055.737	2.002.563	2.117.449	2.241.914	2.376.797	2.523.012	2.681.557	2.853.517	3.040.080
Inversion	-45.904.665	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prestamo	22.952.333	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	0	-694.138	-728.845	-765.287	-803.551	-843.729	-885.915	-930.211	-976.722	-1.025.558
Flujo Capitales	-22.952.333	-694.138	-728.845	-765.287	-803.551	-843.729	-885.915	-930.211	-976.722	-1.025.558
FLUJO DE CAJA	-22.952.333	1.361.600	1.273.718	1.352.162	1.438.363	1.533.068	1.637.097	1.751.345	1.876.796	2.014.522

Caso 1-Deuda 50%	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos	10.339.790	10.591.555	10.866.936	11.168.148	11.497.614	11.857.983	12.252.155	12.683.300	13.154.887	13.670.709	14.234.914
Costos variables	-3.706.729	-3.719.318	-3.733.087	-3.748.147	-3.764.621	-3.782.639	-3.802.348	-3.823.905	-3.847.484	-3.873.275	-3.901.486
Costos fijos	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669	-2.017.669
Intereses por credito	-764.919	-711.077	-654.543	-595.183	-532.854	-467.409	-398.692	-326.539	-250.778	-171.229	-87.703
Depreciacion	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734	-1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UAI	2.431.739	2.724.758	3.042.904	3.388.416	3.763.737	4.171.533	4.614.713	5.096.455	5.620.223	6.189.802	6.809.324
Impuestos (25%)	607.935	681.190	760.726	847.104	940.934	1.042.883	1.153.678	1.274.114	1.405.056	1.547.451	1.702.331
UDI	1.823.805	2.043.569	2.282.178	2.541.312	2.822.803	3.128.650	3.461.035	3.822.341	4.215.167	4.642.352	5.106.993
Depreciacion	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734	1.418.734
G/Perdidas de Capital	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdidas ejercicio anterior	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Operacional	3.242.538	3.462.303	3.700.912	3.960.046	4.241.536	4.547.383	4.879.769	5.241.075	5.633.901	6.061.085	6.525.727
Inversion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.093.669
Prestamo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización	-1.076.836	-1.130.678	-1.187.211	-1.246.572	-1.308.901	-1.374.346	-1.443.063	-1.515.216	-1.590.977	-1.670.526	-1.754.052
Flujo Capitales	-1.076.836	-1.130.678	-1.187.211	-1.246.572	-1.308.901	-1.374.346	-1.443.063	-1.515.216	-1.590.977	-1.670.526	9.339.617
FLUJO DE CAJA	2.165.703	2.331.625	2.513.701	2.713.474	2.932.636	3.173.038	3.436.706	3.725.859	4.042.924	4.390.560	15.865.343