

Lakeside Energy from Waste facility", Colnbrook, Reino Unido (UK) – 450.000 ton de residuos por año.

## **GOBIERNO REGIONAL METROPOLITANO DE SANTIAGO Y MINISTERIO DE ENERGÍA**

Estudio de Factibilidad de una Planta Waste to Energy para la Región Metropolitana

COPYRIGHT © PÖYRY & EBP 2017

Este informe ha sido preparado por la unión temporal de Pöyry (Chile) Ltda. ("Pöyry") y EBP Chile SpA (EBP) para el Gobierno Regional Metropolitano ("GORE") y el Ministerio de Energía. Los Consultores no se responsabilizan de ningún cambio u desviación de uso no autorizado en dichos trabajos.

## Contacto

Pöyry (Chile) Ltda.  
Coronel Pereira 62, Piso 4, Of. 404  
Las Condes, Santiago de Chile

Tel. + 56 2 2951 5016

Email: [energy.cl@poyry.com](mailto:energy.cl@poyry.com)

Web: [www.poyry.com](http://www.poyry.com)

EBP Chile SpA.  
La Concepción 191, Piso 12, Of. 1201,  
Providencia, Santiago de Chile

Tel. +56 2 2573 8505

Email: [info.chile@ebp.ch](mailto:info.chile@ebp.ch)

Web: [www.ebpchile.cl](http://www.ebpchile.cl)

Email: [patrick.furrer@poyry.com](mailto:patrick.furrer@poyry.com)

Email: [roger.walther@ebp.ch](mailto:roger.walther@ebp.ch)

Patrick Furrer  
Country Manager  
Pöyry (Chile) Ltda.

Roger Walther  
Director EBP Chile  
EBP Chile SpA.

## Contraparte técnica

Gobierno Regional Metropolitano

Ministerio de Energía

Seremi de Energía RM

Seremi de Medioambiente RM

## Tabla de Contenidos

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>1</b>
<i>Resultados.....</i>	<i>2</i>
<b>1 OBJETIVOS Y ALCANCES .....</b>	<b>15</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	15
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.4 ACTIVIDADES REALIZADAS .....	17
1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO .....	18
<b>2 ETAPA 1 – OBJETIVO ESPECÍFICO 1 .....</b>	<b>19</b>
2.1 CUANTIFICAR Y CARACTERIZAR LA GENERACIÓN RESIDUOS SÓLIDOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA .....	19
2.1.1 Alcance del tipo de residuos considerados en el estudio .....	19
2.1.2 Cuantificación de los residuos sólidos generados en la Región Metropolitana .....	19
2.1.3 Estacionalidad de la recolección de residuos .....	22
2.1.4 Caracterización de los residuos sólidos en la Región Metropolitana .....	24
2.2 PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA .....	27
2.2.1 Antecedentes para la proyección .....	27
2.2.2 Proyección de residuos hasta 2050 .....	27
2.3 LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN CONTRACTUAL EN LA REGIÓN METROPOLITANA .....	29
2.3.1 Metodología de levantamiento de información .....	29
2.3.2 Recolección y transporte de residuos sólidos .....	29
2.3.3 Disposición final de residuos sólidos domiciliarios .....	33
2.4 EFECTO DE LAS POLÍTICAS E INICIATIVAS DE RECICLAJE EN LA GENERACIÓN DE RESIDUOS EN LA RM .....	38
2.4.1 Alcances y proyección de efectos de la ley REP .....	38
2.4.2 Análisis de iniciativas de reciclaje en la RM .....	42
2.4.3 Definición de escenarios de reciclaje para el estudio .....	45
2.5 LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SOBRE RELLENOS SANITARIOS DE LA REGIÓN METROPOLITANA .....	47
2.5.1 Relleno Sanitario Loma Las Colorados (RSLLC) .....	48
2.5.2 Relleno Sanitario Santa Marta (RSSM) .....	48
2.5.3 Relleno Sanitario Santiago Poniente (RSSP) .....	50
2.5.4 Relleno Sanitario Cerros La Leona (RSCLL) .....	51
2.5.5 Vertedero Controlado de Popeta (VCP) .....	52
2.5.6 Fiscalizaciones y procesos sancionatorios asociados a rellenos en la RM .....	52
2.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS INICIATIVAS DE GENERACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA .....	53
2.6.1 KDM Energía .....	53
2.6.2 Consorcio Santa Marta .....	54
2.6.3 Enerkey .....	56
2.7 CONCLUSIONES .....	57
<b>3 ETAPA 1 – OBJETIVO ESPECÍFICO 2 .....</b>	<b>59</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	59
3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS .....	62
3.2.1 General .....	62
3.2.2 Pre-tratamiento .....	65
3.2.3 Tecnologías Termo-químicas .....	71
3.2.4 Tecnologías Bioquímicas .....	73
3.2.5 Combustión de Parrilla .....	74
3.2.6 Combustión en Horno Rotatorio .....	86
3.2.7 Combustión de Lecho Fluidizado .....	94
3.2.8 Gasificación con Turbina a Vapor .....	104
3.2.9 Gasificación con Turbina a Gas .....	111

3.2.10	Gasificación con Plasma .....	116
3.2.11	Pirólisis.....	122
3.2.12	Digestión Anaeróbica .....	128
3.2.13	Relleno sanitario con y sin aprovechamiento energético.....	137
3.2.14	Recuperación energética .....	144
3.2.15	Tratamiento de gases de combustión.....	147
3.2.16	Producción y uso de energía final.....	147
3.3	CRITERIOS Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS .....	148
3.3.1	Madurez Tecnológica .....	152
3.3.2	Análisis de Combustibles.....	156
3.3.3	Análisis Cumplimiento Ambiental.....	158
3.3.4	Disponibilidad .....	163
3.3.5	Costo Operacional OPEX .....	163
3.3.6	Costo de Inversión CAPEX .....	164
3.3.7	Vida Útil.....	164
3.4	CONCLUSIONES .....	165
<b>4</b>	<b>ETAPA 2 – OBJETIVO ESPECÍFICO 3 .....</b>	<b>168</b>
4.1	REQUERIMIENTOS PARA LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS .....	168
4.1.1	Decreto Supremo 4/1992. Norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales .....	168
4.1.2	Decreto Supremo 29/2013. Norma de incineración, co-procesamiento y co-incineración .....	169
4.1.3	Decreto Supremo 812/1994 del Ministerio de Salud .....	170
4.1.4	Norma europea para plantas WTE.....	170
4.1.5	Nuevo Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana .....	171
4.1.6	Tratamiento de Gases de Combustión.....	174
4.2	REQUERIMIENTOS PARA RUIDO Y OLORES .....	180
4.2.1	Ruido.....	180
4.2.2	Olor.....	183
4.3	REQUERIMIENTOS PARA RESIDUOS .....	185
4.3.1	Ceniza de fondo.....	186
4.3.2	Ceniza volante.....	193
4.3.3	Normativa para emisiones de ceniza.....	196
4.3.4	Residuo líquido.....	198
4.4	REQUERIMIENTO DE PERMISOS AMBIENTALES.....	200
4.4.1	Proceso de consulta ciudadana.....	200
4.4.2	Evaluación Sectorial.....	201
4.5	VARIABLES DETERMINANTES PARA UBICACIÓN DE UNA PLANTA WTE.....	204
4.5.1	Aspectos principales .....	204
4.5.2	Selección de ubicaciones.....	208
4.5.3	Comparación cualitativa de ubicaciones .....	212
4.6	CONCLUSIONES .....	214
<b>5</b>	<b>ETAPA 2 – OBJETIVO ESPECÍFICO 4 .....</b>	<b>216</b>
5.1	EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA COMPARATIVA ENTRE TECNOLOGÍAS .....	216
5.1.1	Madurez Tecnológica .....	216
5.1.2	Análisis de Combustibles.....	227
5.1.3	Análisis cumplimiento ambiental .....	228
5.1.4	Disponibilidad .....	232
5.1.5	Costo Operacional OPEX .....	234
5.1.6	Costo de Inversión CAPEX .....	236
5.1.7	Vida Útil.....	237
5.1.8	Elaboración de un Costo por tonelada tratada preliminar.....	237
5.1.9	Resumen .....	238
5.2	FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS EN RM .....	240

5.2.1	<i>Diseño preliminar de la planta</i> .....	240
5.2.2	<i>Costo de inversión – CAPEX</i> .....	251
5.2.3	<i>Costo de operación – OPEX</i> .....	255
5.2.4	<i>Implementación de un proyecto WTE</i> .....	261
5.3	MODELOS DE NEGOCIOS .....	265
5.3.1	<i>Fuentes de ingreso</i> .....	265
5.3.2	<i>Escenarios de análisis</i> .....	271
5.3.3	<i>Metodología de análisis de sensibilidad</i> .....	274
5.3.4	<i>Principales inputs y supuestos</i> .....	274
5.3.5	<i>Resultados</i> .....	276
5.3.6	<i>Conclusiones</i> .....	287
<b>6</b>	<b>ETAPA 3 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5 Y 6</b> .....	<b>290</b>
6.1	PERCEPCIÓN DE ACTORES RELEVANTES .....	290
6.1.1	<i>Metodología de levantamiento de información</i> .....	290
6.1.2	<i>Actores contactados</i> .....	290
6.1.3	<i>Formato de la entrevista</i> .....	292
6.1.4	<i>Diagnóstico de la percepción</i> .....	293
6.1.5	<i>Síntesis de la percepción</i> .....	294
6.2	SISTEMATIZAR LAS BARRERAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA WTE EN LA RM. ....	295
6.2.1	<i>Metodología para la sistematización de barreras y oportunidades</i> .....	295
6.2.2	<i>Sistematización de barreras y oportunidades</i> .....	295
6.3	PROPUESTA DE ESTRATEGIA REGIONAL PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RSD .....	301
6.3.1	<i>Visión</i> .....	301
6.3.2	<i>Definición de ejes transversales y metas</i> .....	301
6.4	PROPUESTA DE PLAN DE ACCIÓN PARA IMPLEMENTAR LA ESTRATEGIA REGIONAL .....	303
6.4.1	<i>Principales drivers</i> .....	303
6.4.2	<i>Acciones para el corto, mediano y largo plazo</i> .....	303
6.5	PLAN DE ACCIÓN PARA MUNICIPIOS .....	307
6.5.1	<i>Reducir la generación de residuos en el municipio</i> .....	307
6.5.2	<i>Identificación de oportunidades de implementación de proyectos</i> .....	307
6.5.3	<i>Información, modelos de negocios y financiamiento</i> .....	308
6.5.4	<i>Desarrollo de un proyecto de WTE</i> .....	308
<b>7</b>	<b>COMENTARIOS FINALES</b> .....	<b>310</b>
7.1	GESTIÓN Y PROYECCIÓN DE RESIDUOS .....	310
7.2	TECNOLOGÍAS .....	310
7.3	INICIATIVAS Y TECNOLOGÍAS COMPLEMENTARIAS .....	311
7.4	MODELOS DE NEGOCIOS Y FINANCIAMIENTO .....	311
7.5	IDENTIFICACIÓN DE BARRERAS Y ESTRATEGIA .....	311

## Índice de Figuras

Figura 0-1: Proyección de residuos sólidos domiciliarios al año 2050.....	3
Figura 0-2: Procesos principales en una planta WTE.....	4
Figura 0-3: Resultados de la evaluación económica por escenario - Rangos de Tarifas de Disposición (Gate Fee) [USD/ton] .....	12
Figura 0-4: Rango de Tarifa de disposición y economía de escala por tamaño de planta en Escenario de Concesión, considerando precios de energía bajo, medio y alto simulados por el software BID-3 y distintas combinaciones de proyección de PIB y reciclaje en la RM. [USD/ton] .....	13
Figura 1-1: Comparación de estadísticas para Chile, Alemania, España, Francia, Grecia, Israel, México, Suiza y Turquía con respecto a: a) generación de RSD, b) Generación de RSD per cápita, c) porcentaje de reciclaje y d) porcentaje dispuesto en relleno sanitario/vertedero.....	15
Figura 1-2: Cronograma resumido del estudio.....	17
Figura 2-1: Cantidad de residuos recolectados en el año 2015.....	21
Figura 2-2: Mapa de cantidad de residuos recolectados en el año 2015 .....	22
Figura 2-3: Cantidad residuos recolectado mensualmente en la Región Metropolitana entre los años 2007, 2010 y 2015 (Elaboración propia).....	23
Figura 2-4: Proyección de residuos año 2050, para los 3 escenarios principales (Elaboración propia) .....	28
Figura 2-5: Participación en el mercado de las empresas de recolección y transporte de RSD en la Región Metropolitana (Elaboración propia).....	30
Figura 2-6: Costo del servicio de recolección y transporte mensual por comunas en la RM, precio en pesos (Elaboración propia) .....	31
Figura 2-7: Duración de los contratos de recolección y transporte de RSD en la RM (Elaboración propia).....	32
Figura 2-8: Localización de los sitios de disposición final en la Región Metropolitana.....	33
Figura 2-9: Participación de los sitios de disposición en la recepción de residuos en la RM, año 2015 (cantidad) .....	34
Figura 2-10: Término de contratos de disposición final, (Elaboración propia).....	35
Figura 2-11: Precio tonelada de residuos dispuesta en relleno sanitario, (Elaboración propia) .....	37
Figura 2-12: Estrategia jerarquizada en el manejo de residuos .....	38
Figura 2-13: Tasas de reciclaje EyE alcanzada por países miembros UE, fuente: EUROOPEN, 2014 .....	40
Figura 2-14: Recuperación y reciclaje de sub-categorías papel y cartón en Europa.....	41
Figura 2-15: Recuperación y reciclaje de sub-categoría madera en Europa .....	41
Figura 2-16: Recuperación y reciclaje de sub-categoría plástico en Europa.....	41
Figura 2-17: Cantidad de residuos per cápita en Europa el año 2015 [kg/ha/año] .....	43
Figura 2-18: Tasa de reciclaje de residuos municipales en Europa entre los años 2004 y 2014 .....	44
Figura 2-19: Localización de las plantas generadoras de energía en base a RSD .....	53
Figura 3-1: Tecnologías disponibles, (Elaboración propia) .....	60
Figura 3-2: Etapas principales tecnologías WTE, (Elaboración propia).....	62
Figura 3-3: Diagrama de Tanner, materia orgánica v/s humedad, ceniza y poder calorífico.....	63
Figura 3-4: Esquema general de tecnologías de Waste to Energy (elaboración propia en base a esquema de World Bank Technical Report Municipal Solid Waste Incineration) .....	64
Figura 3-5: Combustibles derivados de residuos (RDF) según pre-tratamiento, (Elaboración propia).....	70
Figura 3-6: Esquema general de Combustión de Parrilla.....	76
Figura 3-7: Componentes principales – Planta de Combustión de Parrilla.....	78
Figura 3-8: Número de plantas WTE de combustión de parrilla por país.....	79
Figura 3-9: Capacidad anual por línea de procesos de proyectos construidos o en construcción .....	79
Figura 3-10: Diagrama de combustión, una línea de proceso de combustión de parrilla con capacidad de 330.000 ton anuales .....	80
Figura 3-11: Costos de inversión para proyectos llave en mano de Hitachi Zosen.....	83
Figura 3-12: Esquema general combustión de horno rotatorio.....	87
Figura 3-13 Componentes Principales – Planta de Combustión de Horno Rotatorio .....	88
Figura 3-14: Número de plantas WTE de combustión de RSD en horno rotatorio por país.....	89
Figura 3-15: Esquema general Combustión de Lecho Fluidizado.....	95

Figura 3-16 Componentes principales – Planta de Combustión de Lecho Fluidizado .....	97
Figura 3-17: Número de plantas WTE de combustión de lecho fluidizado por país .....	98
Figura 3-18: Diagrama de combustión, una línea de proceso de combustión de lecho fluidizado con capacidad de 330.000 ton anuales .....	99
Figura 3-19: Esquema general de gasificación con caldera y turbina a vapor .....	105
Figura 3-20: Componentes principales – Planta de Gasificación con Turbina a Vapor.....	106
Figura 3-21: Esquema general de gasificación con caldera a gas.....	112
Figura 3-22: Componentes principales – Planta de Gasificación con Turbina a Gas .....	114
Figura 3-23: Esquema general de gasificación con plasma.....	117
Figura 3-24: Componentes principales – Planta de Gasificación con Plasma.....	119
Figura 3-25: Esquema general de gasificación con turbina o motor a gas .....	123
Figura 3-26: Componentes principales – Planta de Pirólisis .....	125
Figura 3-27: Esquema general de digestión anaeróbica .....	129
Figura 3-28: Componentes principales – Planta de Digestión Anaeróbica de dos etapas (elaboración propia).....	131
Figura 3-29: esquema general de tecnologías de relleno sanitario con captura de biogás .....	138
Figura 3-30: Esquema relleno sanitario (izquierda: sin captura de gas; derecha: con captura e incineración de gas).....	139
Figura 3-31: esquema relleno sanitario con captura de gas y aprovechamiento energético.....	139
Figura 3-32 Ciclo de biogás – Relleno sanitario con aprovechamiento energético .....	141
Figura 3-33 Asignación lineal de puntos, criterio ambiental, disponibilidad y vida útil. ....	149
Figura 3-34: Asignación lineal de puntos, criterios CAPEX y OPEX.....	150
Figura 3-35: Distribución porcentual de número de plantas en operación por tecnología en el mundo. ....	153
Figura 3-36: Madurez Tecnológica.....	166
Figura 4-1: Esquema de tratamiento Seco / Semi-seco .....	176
Figura 4-2: Esquema sistema húmedo <sup>100</sup> .....	179
Figura 4-3: Estudio de emisión e inmisión de ruidos en proyecto de Winterthur, Suiza. Fuente: Estudio realizado por Pöyry Suiza. ....	182
Figura 4-4: Tipos de residuos del proceso de incineración (Elaboración propia) .....	186
Figura 4-5: Composición promedio de compuestos en ceniza de fondo, para el caso de tecnologías de incineración por parrilla y gasificación .....	187
Figura 4-6: Comparación de descarga húmeda (izquierda) versus seca (derecha). Fuente: Martin GmbH, 2015, <i>Energy and resource recovery from WTE plants</i> .....	188
Figura 4-7: Diagrama de flujo simplificado de los procesos utilizados para separación de ceniza de fondo (Elaboración propia) .....	189
Figura 4-8: Funcionamiento de aplastador de impacto (Elaboración propia) .....	189
Figura 4-9: Proceso de tamizado (Elaboración propia).....	190
Figura 4-10: Separación magnética (Elaboración propia).....	190
Figura 4-11: Esquema de separación eléctrica (Elaboración propia).....	191
Figura 4-12: Composición promedio de ceniza volante, para el caso de tecnologías de incineración por parrilla y gasificación.....	193
Figura 4-13: Estrategia jerarquizada en el manejo de residuos .....	201
Figura 4-14: Ejes principales de la RM (Elaboración propia) .....	206
Figura 4-15: Principales líneas de transmisión. Líneas azules son de 500kV, verdes de 220kV y naranjas 110kV (Elaboración propia) .....	208
Figura 5-1 Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada .....	216
Figura 5-2: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de combustión por parrilla.....	217
Figura 5-3: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada.....	218
Figura 5-4: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de horno rotatorio.....	219
Figura 5-5: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada.....	220
Figura 5-6: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de lecho fluidizado.....	220

Figura 5-7: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada.....	221
Figura 5-8: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de gasificación convencional con turbina a vapor. ....	222
Figura 5-9: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada.....	224
Figura 5-10: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada.....	224
Figura 5-11: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada.....	225
Figura 5-12; Designación de horas.....	233
Figura 5-13: Organigrama típico de operadores en una planta WTE.....	234
Figura 5-14: Aspectos principales para el diseño de una planta WTE (Elaboración propia).....	241
Figura 5-15: Sala de descarga (derecho), grúa pórtico para mezclar/transportar RSD (izquierdo), planta Winterthur, Suiza.....	242
Figura 5-16: Esquema y foto de la parrilla de combustión (Doosan Lentjies, derecha, Babcock, izquierdo)..	243
Figura 5-17: Conceptos principales de arreglo de la caldera; horizontal o vertical (Elaboración propia).....	244
Figura 5-18: Balance de masa planta preliminar.....	247
Figura 5-19: Generación de energía para planta preliminar.....	248
Figura 5-20: Planta general de una planta WTE.....	250
Figura 5-21: Sección transversal.....	251
Figura 5-22: Distribución del CAPEX de la planta WTE sin contingencias para 330.000 ton anuales [USD]	255
Figura 5-23: Periodos de mantenimiento; naranja mantenimientos menores, verde mantenimientos mayores. ....	258
Figura 5-24: Cronograma de construcción simplificado.....	264
Figura 5-25: Cronograma total de implementación simplificado.....	264
Figura 5-26: Esquema de opciones de organización de ejecución del proyecto.....	265
Figura 5-27: Esquema general BID 3.....	267
Figura 5-28: Proyección de precios zona Región Metropolitana.....	268
Figura 5-29: Análisis de sensibilidad de escenario 2 – comercialización solo con electricidad.....	284
Figura 5-30: Rango de tarifas de disposición por escenario [USD/ton].....	285
Figura 5-31: Rango de <i>tarifas de disposición</i> y economía de escala por tamaño de planta en Escenario Concesión 2 [USD/ton].....	286
Figura 6-1: Formato de entrevista semi-estructurada para actores relevantes.....	292
Figura 6-2: Mapa de percepción en base a entrevistas con actores relevantes.....	293
Figura 6-3: Diagrama de sistematización de barreras.....	297
Figura 6-4: Diagrama de sistematización de oportunidades.....	300
Figura 6-5: Propuesta de ejes estratégicos.....	301
Figura 6-6: Propuestas de metas para cada eje estratégico.....	302
Figura 6-7: Propuesta de drivers para el plan de acción.....	303
Figura 6-8: Plan de acción para eje 1.....	304
Figura 6-9: Plan de acción para eje 2.....	305
Figura 6-10: Plan de acción para eje 3.....	306
Figura 6-11: Plan de acción para Municipios.....	307
Figura 6-12: Resumen de pasos para implementación de un proyecto a nivel municipal.....	309

## Índice de Tabla

Tabla 0-1: Resumen de características principales de las tecnologías WTE para residuos sólidos domiciliarios	7
Tabla 0-2: Resumen aplicación de criterios de evaluación de tecnologías.	8
Tabla 0-3: Resumen de escenarios de análisis.	11
Tabla 2-1: Cantidad total de residuos recolectados por comuna	20
Tabla 2-2: Tipos de residuos generados según categoría socioeconómica	24
Tabla 2-3: Repartición típica de generación de residuos por tipo en el sector comercial	25
Tabla 2-4: Composición química y humedad de las categorías de residuos [% peso, base seca]	26
Tabla 2-5: Cálculos de los PCI de las categorías de residuos según diferentes métodos	26
Tabla 2-6: RSD esperados al año 2050 para los 3 escenarios, unidades en [ton/año]	28
Tabla 2-7: Características de los sitios de disposición final	33
Tabla 2-8: Comunas que disponen en cada sitio de disposición final	35
Tabla 2-9: Categoría y sub-categorías de Envases y Embalajes	39
Tabla 2-10: Variación en la composición de RSD residencial para el año 2050	45
Tabla 2-11: Porcentaje de residuos reciclados al 2050 para los distintos escenarios	46
Tabla 2-12: Ficha técnica Relleno sanitario Loma Las Coloradas	48
Tabla 2-13: Resoluciones de Calificación Ambiental de KDM S.A. (favorables)	48
Tabla 2-14: Ficha técnica Relleno sanitario Santa Marta	48
Tabla 2-15: Resoluciones de Calificación Ambiental Consorcio Santa Marta S.A. (favorables)	49
Tabla 2-16: Ficha técnica Relleno sanitario Santiago Poniente	50
Tabla 2-17: Resoluciones de Calificación Ambiental Proactiva Servicios Urbanos S.A. (favorables)	50
Tabla 2-18: Ficha técnica Relleno sanitario Cerros La Leona	51
Tabla 2-19: Resoluciones de Calificación Ambiental Gersa S.A. (favorables)	51
Tabla 2-20: Ficha técnica Vertedero Controlado Popeta	52
Tabla 2-21: Industrias de generación energética a partir de RSD en la RM	53
Tabla 2-22: Características de las centrales de generación de KDM Energía	54
Tabla 2-23: Características de las centrales de generación de Santa Marta	55
Tabla 2-24: Características de la central de generación de Enerkey	56
Tabla 3-1: Resumen de características principales tecnologías WTE	61
Tabla 3-2: Efecto de eliminación de materiales reciclables	68
Tabla 3-3: Comparación del proceso de combustión entre tecnologías	72
Tabla 3-4: Requisitos para los residuos	75
Tabla 3-5: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos de componentes principales (años)	81
Tabla 3-6: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de combustión de parrilla	82
Tabla 3-7: Resumen de características de tecnología de combustión de parilla	85
Tabla 3-8: Requisitos para los residuos	86
Tabla 3-9: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)	90
Tabla 3-10: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de combustión de Horno Rotatorio	91
Tabla 3-11: Resumen de características de tecnología de horno rotatorio	93
Tabla 3-12: Requisitos para los residuos	94
Tabla 3-13: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)	99
Tabla 3-14: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de combustión por lecho fluidizado	100
Tabla 3-15: Resumen de características de tecnología de lecho fluidizado	103
Tabla 3-16: Requisitos para los residuos	104
Tabla 3-17: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)	107
Tabla 3-18: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de gasificación con turbina a vapor	108
Tabla 3-19: Resumen de características de tecnología gasificación con turbina a vapor	110
Tabla 3-20: Requisitos para los residuos	111
Tabla 3-21: Requisitos para los residuos	118
Tabla 3-22: Requisitos para los residuos	124
Tabla 3-23: Requisitos para los residuos	130
Tabla 3-24: Resumen de tecnologías de digestión anaeróbica a escala industrial comercializado	133

Tabla 3-25: Composición de biogás por DA .....	134
Tabla 3-26: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años).....	134
Tabla 3-27: Resumen de características de digestión anaeróbica .....	136
Tabla 3-28: Volumen de gases típicos presentes en rellenos sanitarios de Santiago. ....	137
Tabla 3-29: Requisitos para los residuos.....	138
Tabla 3-30: Condiciones de operación de plantas de relleno sanitario en Chile. ....	140
Tabla 3-31: comparación entre relleno sanitario y planta WTE.....	143
Tabla 3-32: Resumen de Criterios de evaluación .....	150
Tabla 3-33: Tabla que se utilizará como resumen de evaluación .....	151
Tabla 3-34: Resumen de plantas instaladas por país y tecnología.....	154
Tabla 3-35: Análisis del uso de distintos tipos de residuos en las tecnologías WTE .....	156
Tabla 3-36: Requerimientos de combustible RSD para las distintas tecnologías WTE.....	157
Tabla 3-37: Valores límites de emisión para incineración .....	159
Tabla 3-38: Criterios de calificación de residuos peligrosos que aplican a cenizas .....	160
Tabla 3-39: Resumen de parámetros ambientales .....	161
Tabla 4-1: Tabla de valores límites para incineración de acuerdo al DS 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente.....	170
Tabla 4-2: Tabla de valores límites para incineración, norma europea.....	171
Tabla 4-3: Emisiones anuales y compensación hipotética para RM. Operación según planta de Bielefeld. ...	172
Tabla 4-4: Sistemas principales de tratamiento de gases de combustión .....	177
Tabla 4-5: Ejemplos de fuentes de emisión de ruido y su correspondiente intensidad.....	181
Tabla 4-6: Niveles máximos permitidos de Presión Sonora Corregida (NPC) en db (A). ....	183
Tabla 4-7: Valores máximos de intensidad de olor, para norma Europea UNE-EN 13725.....	185
Tabla 4-8: Cantidad de metales presentes en ceniza de fondo, y precio de mercado .....	191
Tabla 4-9: Usos principales de ceniza de fondo por país .....	192
Tabla 4-10: Principales procesos para control de ceniza volante. Cabe destacar que estos procesos están comercialmente disponibles <sup>110</sup> .....	195
Tabla 4-11: Comparación entre norma chilena y europea, de manejo de residuos peligrosos, con respecto de descargas de ceniza de fondo y volante para principales tecnologías WTE.....	197
Tabla 4-12: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales y descarga de efluentes que se efectúan a redes de alcantarillado que cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas .....	199
Tabla 4-13: Cálculos referenciales de ahorro por transporte y disposición de residuos en relleno sanitario, por ubicación de planta. ....	211
Tabla 4-14: Tabla comparativa de ubicaciones típicas .....	212
Tabla 5-1: Los requerimientos para las distintas tecnologías.....	227
Tabla 5-2: Comparación entre valor objetivo de residuos peligrosos en toma de muestras y test de lixiviación, con respecto a descarga de ceniza de fondo para principales tecnologías WTE (Elaboración propia).....	230
Tabla 5-3: Comparación entre valor objetivo de residuos peligrosos en Test de lixiviación, con respecto a descarga de ceniza volante para principales tecnologías WTE (Elaboración propia).....	231
Tabla 5-4: Puntaje de impacto ambiental para diferentes tecnologías. ....	232
Tabla 5-5: Horas anuales de disponibilidad por tecnología. ....	233
Tabla 5-6: Dotación de personal entre las tecnologías.....	235
Tabla 5-7: Puntaje por tecnología de costos de operación y mantenimiento .....	236
Tabla 5-8: Inversión de capital CAPEX.....	236
Tabla 5-9: Vida útil aproximada de los componentes principales por tecnología .....	237
Tabla 5-10: Resumen aplicación de criterios de evaluación de tecnologías .....	238
Tabla 5-11: Resumen de aplicación de criterios GIZ.....	239
Tabla 5-12: Desglose del CAPEX bajo modelo de contratación EPC [USD].....	253
Tabla 5-13: Desglose del CAPEX bajo modelo de contratación EPCM [USD] .....	254
Tabla 5-14: Distribución de personal (elaboración propia).....	256
Tabla 5-15: Base de costos totales por empleado (Elaboración propia) .....	257
Tabla 5-16: Frecuencia y costos de mantención según estudios de consultor y proveedores. ....	259

Tabla 5-17: Base de datos y precios de consumibles .....	260
Tabla 5-18: Fases de desarrollo de proyectos WTE .....	262
Tabla 5-19: Fase Evaluación de Impacto Ambiental .....	263
Tabla 5-20: Precios referenciales de costo calor otras fuentes .....	268
Tabla 5-21: Precios referenciales de costo vapor otras fuentes según metodología Metrogas.....	269
Tabla 5-22: Precio de plástico referencial reciclable, no incluye costo de retiro. ....	270
Tabla 5-23: Precio de papel reciclado, no incluye costo de retiro .....	270
Tabla 5-24: Precio de vidrio reciclado, sin costo de retiro .....	271
Tabla 5-25: Precio de metal reciclado.....	271
Tabla 5-26: Matriz de resumen de escenarios de análisis .....	272
Tabla 5-27: Definición CAPEX por escenario .....	273
Tabla 5-28: Resultados Escenario 1, capacidad 330.000 ton/año.....	276
Tabla 5-29: Resultados Escenario 2, capacidad 330.000 ton/año.....	277
Tabla 5-30: Resultados Escenario 3, capacidad 330.000 ton/año.....	278
Tabla 5-31: Resultados Escenario 4, capacidad 330.000 ton/año.....	278
Tabla 5-32: Comparación de escenarios considerando poder calorífico de los RSD y precio de energía medio .....	279
Tabla 5-33: Resultados escenario 2 – 150.000 ton/año.....	280
Tabla 5-34: Resultados escenario 2 – 1.000.000 ton/año.....	280
Tabla 5-35: Resumen de tarifas de disposición por tamaño de planta en Escenario 2, Concesión.....	281
Tabla 5-36: Diferencia de costos involucrados en modo de contratación EPC vs EPCM.....	282
Tabla 5-37: Resumen de resultados comparativos de modo de contratación, para un precio de electricidad medio .....	282
Tabla 5-38: Resumen de resultados comparativos con y sin reciclaje, para un precio de electricidad medio .	282
Tabla 5-39: Resumen de resultados comparativos según el destino de cenizas de fondo, para un precio de electricidad medio.....	283
Tabla 5-40: Comparación de Tarifas de disposición con distintos modelos de depreciación, para un precio de electricidad medio.....	284
Tabla 6-1: Listado de actores contactados para entrevistas.....	290
Tabla 6-2: Criterios de percepción en base a entrevistas con actores relevantes .....	293
Tabla 6-3: Categorías de agrupación para barreras y oportunidades .....	295
Tabla 6-4: Barreras identificadas para el desarrollo de WTE.....	296
Tabla 6-5: Oportunidades identificadas para el desarrollo de WTE.....	298

## **Anexos digitales**

- Anexo A Metodología de parámetros para la proyección de residuos**
- Anexo B Listado de iniciativas de reciclaje en la Región Metropolitana**
- Anexo C Proyección de residuos 2050**
- Anexo D Situación contractual de municipios**
- Anexo E Bibliografía**
- Anexo F Listado de plantas WTE Global**
- Anexo G Evaluación ambiental y obtención permisos**
- Anexo H Compensaciones, reducción de emisiones y estimación de costos por transporte**
- Anexo I Matriz de evaluación de tecnologías**
- Anexo J Evaluación según metodología GIZ**
- Anexo K Planos de proyecto WTE para la RM**
- Anexo L Resultados: planillas de escenarios 1 a 4**
- Anexo M Modelos de negocio**
- Anexo N Transcripción de entrevistas a actores relevantes**

## RESUMEN EJECUTIVO

### Introducción

La Región Metropolitana (RM) genera más de 3 millones de toneladas al año de residuos sólidos domiciliarios (RSD). De ellos, el 98% se dispone en tres rellenos sanitarios: Santa Marta, Santiago Poniente, y Lomas Los Colorados, y el 2% restante en el vertedero Popeta que cuenta con autorización sanitaria.

Por disposiciones sanitarias, los tres rellenos cuentan con sistemas de captura de biogás, que se genera naturalmente por la descomposición de la materia orgánica. Dos de ellos utilizan el biogás para producir energía eléctrica: Loma Los Colorados, en Til Til (20,2 MW) y Santa Marta, en Talagante (17,3 MW), a lo que se suma el Vertedero Popeta (2,0MW). Santiago Poniente, en Maipú, no tiene un sistema de aprovechamiento energético del biogás capturado.

Otra alternativa para el aprovechamiento energético de los RSD es la tecnología Waste To Energy (WTE), que permite una recuperación energética más eficiente que los rellenos sanitarios. Actualmente existen diversas tecnologías que serán presentadas y analizadas más adelante, siendo la tecnología de incineración o combustión directa la que a la fecha presenta la mayor madurez tecnológica.

El Gobierno Regional Metropolitano y el Ministerio de Energía desarrollaron este estudio para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de una planta de generación de energía WTE a partir de RSD en la RM.

El estudio contempló dar respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Qué tipo y cuanta basura produce la RM?
- ¿Qué tecnologías Waste to Energy existen y cuál es su madurez?
- ¿Qué requisitos ambientales debe cumplir una planta WTE?
- ¿Cuáles son las tecnologías más aptas para la RM?
- ¿Cuánto cuesta?

### Metodología

El estudio se concentró en la cuantificación y caracterización de aquellos residuos de origen domiciliario o asimilables a domiciliario que están siendo recolectados por los municipios, y llevados a disposición final.

Se caracterizaron las tecnologías WTE de acuerdo a una serie de criterios técnicos, económicos y ambientales, los cuales fueron ponderados. Se consideraron criterios excluyentes, que son requisitos mínimos para la implementación y operación de una determinada tecnología, y criterios ponderados, los cuales fueron evaluados de forma independiente para cada tecnología a fin de poder compararlas.

Una vez seleccionada la tecnología más adecuada para desarrollar en la RM se describió en detalle su proceso de implementación y se desarrolló una evaluación económica de una planta WTE de acuerdo a distintos escenarios y modelos de negocio.

## Resultados

### *Residuos*

En el año 2015 en la RM se generaron 3.272.387 toneladas de RSD, donde Maipú y Puente Alto fueron los municipios que más residuos generaron. De estos, el 75% corresponde a residuos residenciales y un 25% a residuos comerciales, siendo la comuna de Santiago las que más aporta a la componente comercial, con un 11,9%.

En cuanto a la composición de los RSD, los residuos residenciales cuentan con una composición similar independiente del grupo socioeconómico de origen, donde el 57,2% corresponde a orgánicos, un 24,0% a materiales de alto contenido energético (papel, cartón, plásticos, tetra pack y especiales), mientras que el 18,8% restante corresponde a metales, vidrio, otros inertes y otros residuos no clasificados. En el caso de los residuos comerciales, un 39,4% corresponden a orgánicos, un 53,6% a residuos de alto contenido energético, mientras que el 7% restante corresponde a metales, vidrio, otros inertes y otros residuos no clasificados. El poder calorífico promedio de los RSD en la RM es de 3,01 kWh/kg o 10,94 MJ/kg.

Actualmente la recolección y transporte de RSD está a cargo de 15 empresas, estando el 46% del mercado comprendido por dos grupos: Dimensión y Starco-Demarco. El costo promedio del servicio de recolección y transporte es de \$ 22.111 por tonelada (USD 34,56 por tonelada), y la duración promedio de los contratos es de 5 años. Los factores que generan las diferencias en el costo de recolección y transporte por tonelada corresponden a la extensión territorial de la comuna, la densidad poblacional, el tipo de tecnología de camiones considerados, los tipos de residuos recolectados y aspectos de recolección diferenciada para reciclaje, entre otros.

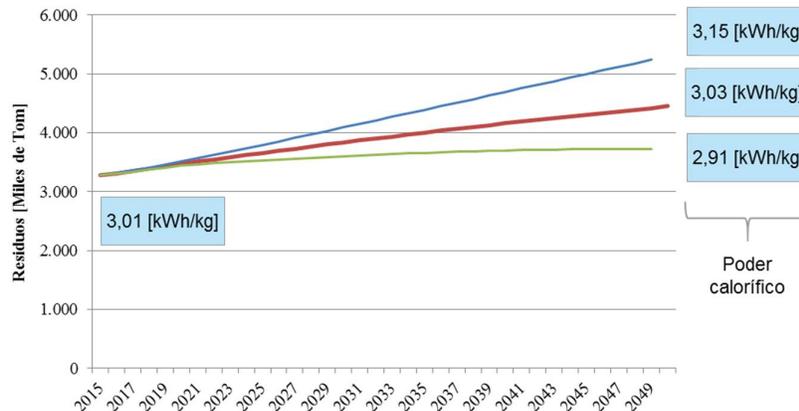
En cuanto a la disposición final, el costo promedio del servicio es de \$ 10.918 por tonelada (USD 17,06 por tonelada).

Los contratos de disposición que más se extienden tienen plazo hasta el año 2027, y corresponden a 21 contratos de municipalidades con el relleno Loma Los Colorados. Además, el 47% de los residuos se dispone en rellenos con autorización sanitaria menor al año 2025, lo cual constituye uno de los principales agravantes que manifiesta la urgencia por encontrar soluciones a la gestión de residuos en la RM.

Con el objetivo de conocer la disponibilidad futura de los RSD, se realizó una proyección de estos hasta el año 2050. A partir de parámetros de crecimiento demográfico, crecimiento económico del país, la implementación de políticas de reciclaje como la Ley Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje, y de acuerdo a la experiencia internacional, se proyectó la cantidad anual de residuos que se generaría en la RM para distintos escenarios. Los resultados son presentados en la Figura 0-1.

Según lo anterior, considerando un escenario de crecimiento económico medio y un escenario de reciclaje medio, se proyecta para el año 2050 una disposición total de RSD de 4.455.991 toneladas.

RSD al 2050		Escenario Crecimiento Económico (Ton/año)		
		Bajo	Medio	Alto
Escenario de reciclaje	Pesimista	4.347.318	4.806.194	5.313.941
	Medio	4.048.691	4.455.991	4.907.013
	Optimista	3.750.064	4.105.787	4.500.085

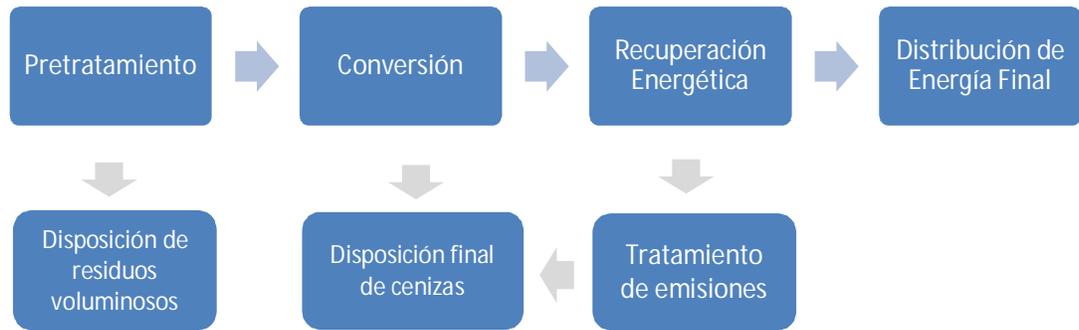


**Figura 0-1: Proyección de residuos sólidos domiciliarios al año 2050**

Como se aprecia en la figura, los distintos escenarios de proyección también afectan en el poder calorífico ponderado de los RSD. Esto se debe a que, a mayor tasa de reciclaje, menor es la disponibilidad de materiales de alto valor calorífico (exceptuando el vidrio), provocando una reducción en el poder calorífico ponderado total de los RSD. Por ello es que, en teoría, un escenario de alto reciclaje es desfavorable para la implementación de una planta de WTE. Sin embargo, las diferencias observadas en los poderes caloríficos son leves, por lo que no existirán implicancias mayores en el desarrollo de un proyecto.

### **Tecnologías**

En las plantas WTE es posible identificar cinco procesos o componentes principales: **pre-tratamiento** donde se realiza una clasificación y homogeneización de los residuos si fuese necesario; **conversión** donde se realiza la transformación de los residuos en calor y/o gas; **recuperación energética** en la cual se convierte el calor/gas en energía para su **distribución y uso final**; y **tratamiento de emisiones**.



**Figura 0-2: Procesos principales en una planta WTE**

A su vez, será necesaria la disposición final de residuos producto de la separación de los residuos voluminosos y la gestión y disposición final de cenizas, así como la posible gestión de materiales reciclables.

De acuerdo a las características de los RSD de la RM, es factible implementar diversos sistemas de pre-tratamiento, que permiten separar y recuperar materiales revalorizables. Esto modifica la composición del residuo, incrementando o disminuyendo su poder calorífico y por lo tanto, pudiendo impactar en el desempeño de la planta.

Las tecnologías de conversión analizadas pueden ser clasificadas en procesos de combustión (de parrilla, horno rotativo, o de lecho fluidizado), gasificación (con turbina a vapor y turbina a gas), gasificación por plasma, pirólisis y digestión anaeróbica como complemento para tratar la fracción orgánica de los RSD.

Las características principales de las tecnologías de conversión son:

**Combustión de Parrilla:** Proceso de oxidación total de los residuos, altamente exotérmico, y no requiere ningún tipo de pre-tratamiento para el uso de los RSD, salvo la separación residuos voluminosos.

Los residuos son dispuestos sobre una parrilla inclinada ubicada en el fondo de la cámara de combustión, que permite el avance y mezcla de los residuos dentro de la cámara, donde la temperatura de combustión es de ~850°C.

La recuperación de energía se lleva a cabo a través de una caldera e intercambiadores de calor y/o turbinas a vapor, según se requiera obtener calor, energía eléctrica o ambas.

Tiene un alto costo de inversión, pero un bajo costo de operación, con un comportamiento confiable en término de cumplimiento ambiental y confiabilidad operacional.

**Combustión de Horno Rotatorio:** Proceso de oxidación total de los residuos, donde se utiliza una tecnología similar a la de la industria del cemento.

Los residuos no requieren de pre-tratamiento y son dispuestos en la parte superior de una cámara de combustión cilíndrica, inclinada en su eje horizontal, con el fin de generar el flujo de material mientras el cilindro gira.

Al igual que la combustión de parilla, la recuperación de energía se lleva a cabo a través de una caldera e intercambiadores de calor y/o turbinas a vapor, según se requiera.

Tiene un alto costo de inversión y de operación, con un comportamiento confiable en términos de cumplimiento ambiental y confiabilidad operacional. Además, tiene muy

buenas prestaciones para el tratamiento de otros tipos de residuos como residuos hospitalarios y residuos peligrosos, debido a que la destrucción de estos es realizada por una combustión a alta temperatura, con un sistema de inyección de combustible adicional para asegurar la temperatura de combustión sin importar el poder calorífico del residuo procesado.

**Combustión de Lecho Fluidizado:** Proceso de oxidación total de los residuos, donde se disponen los residuos sobre una superficie de arena o cal en constante movimiento. Esto se logra por la inyección de aire de forma continua por debajo de la arena o cal, con una velocidad tal que logre levantarla del fondo de la cámara.

Los residuos requieren ser pretratados, para alcanzar el tamaño medio de la superficie fluidizada (1 a 5 mm). Luego son dispuestos sobre esta superficie, donde el aire y el calor presente logran la combustión completa de los residuos.

Al igual que la combustión de parilla la recuperación de energía se lleva a cabo a través de una caldera e intercambiadores de calor y/o turbinas a vapor, según se requiera.

**Gasificación Convencional con Turbina a Vapor:** Proceso de gasificación donde se busca la descomposición de los residuos en un gas combustible. Para ello se aplica calor a los residuos, en un ambiente de bajo oxígeno, por lo que no se puede generar combustión. Libera un gas llamado gas de síntesis o syngas, el cual ingresa a una caldera de vapor donde es combustionado para generar calor. La recuperación de energía se lleva a cabo a través de una caldera e intercambiadores de calor y/o turbinas a vapor, según se requiera.

**Gasificación Convencional con Turbina a Gas:** Proceso de gasificación similar a la gasificación con turbina a vapor. La diferencia radica en el uso del syngas. En este caso, se envía por una serie de procesos de tratamiento y purificación para lograr un gas de buena calidad, y poder utilizarlo en una turbina a gas o en un motor a gas.

**Gasificación con Plasma:** Proceso de gasificación, donde a diferencia de las anteriores gasificaciones, se pasan los residuos por el centro de un gas ionizado, a través de un arco eléctrico a alta temperatura (> 5.000°C). De igual manera, se libera syngas, que es enviado por una serie de procesos de tratamiento y purificación para lograr un gas de buena calidad.

La recuperación de energía se puede llevar a cabo por cualquiera de las tecnologías antes mencionadas (caldera a vapor, turbina a gas o motor a gas). Sin embargo, el arco eléctrico consume gran parte de la energía generada.

**Pirólisis:** Proceso que se basa en la descomposición de los residuos a altas temperaturas en un ambiente libre de oxígeno. De este proceso se pueden obtener tres subproductos dependiendo de la composición de los residuos y de la temperatura del proceso: syngas, aceites, y elementos carbonizados. La temperatura de trabajo varía entre 300°C y 800°C.

La recuperación de energía se lleva a cabo a través de un conjunto entre una turbina y un generador a gas o un motor a gas.

**Digestión Anaeróbica:** Consiste en la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en un reactor, en ausencia de oxígeno, donde por acción de distintas familias de microorganismos es posible lograr la descomposición de los residuos. De este proceso se obtienen dos productos principales: biogás (gas rico en metano) y digestato (material rico en nutrientes, que puede ser utilizado como fertilizante). Normalmente solo se tratan los RSD separados en origen o ya seleccionados en un sistema de pre-tratamiento de otra

planta de WTE, como tecnología complementaria para el tratamiento de la fracción orgánica. Por lo anterior, la digestión anaeróbica no será considerada en la comparación cualitativa con las otras tecnologías.

A continuación se presenta una tabla comparativa de las principales tecnologías WTE.

Tabla 0-1: Resumen de características principales de las tecnologías WTE para residuos sólidos domiciliarios

Descripción	Combustión			Gasificación			Pirólisis
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluidizado	Convencional		Plasma	
				Turbina Vapor	Turbina a Gas		
<b>N° de plantas operativas</b>	<b>1.264 (~80%)</b>	<b>13 (~1%)</b>	<b>176 (~11%)</b>	<b>129 (~8%)</b>	<b>0 (~0%)</b>	<b>4 (~0%)</b>	<b>5 (~0%)</b>
<b>Pretratamiento mínimo</b>	Separación residuos voluminosos	Separación residuos voluminosos	Separación residuos voluminosos, trituración hasta tamaño de partícula < 5mm	Separación residuos voluminosos, trituración hasta tamaño de partícula < 5mm, y clasificación automática para el retiro de elementos inertes, reciclables y con alto contenido orgánico			
<b>Madurez de tecnología</b>	Alta	Alta	Alta	Insuficiente experiencia fuera de Japón	En desarrollo	Solo operación comercial en Japón y Sur Corea	Demonstración, en proceso de implementación
<b>CAPEX (USD/ton)</b>	425 ~ 767	2.667 ~ 24.000	710 ~ 1.000	Insuficiente información	*(1)	*(1)	*(1)
<b>OPEX</b>	Bajo	Alto	Bajo	Insuficiente información	*(1)	*(1)	*(1)
<b>Costo por Tonelada Tratada (USD/ton)<sup>2</sup></b>	12 ~ 69	34 ~ 1.230	17 ~ 80	Insuficiente información	*(1)	*(1)	*(1)
<b>Ventajas</b>	Tecnología simple y robusta. No requiere pre-tratamiento, solo separación de voluminosos. Bajo OPEX.	Tecnología robusta. No requiere pre-tratamiento, solo separación de voluminosos. Puede recibir residuos peligrosos.	Alta eficiencia energética. Recupera materiales valorizable.	Reputación (no es incineración). Alto rendimiento eléctrico.	Reputación (no es incineración). Alto rendimiento eléctrico teórico en turbina a gas.	Buena reputación. Menor cantidad de residuo final. Puede recibir residuos peligrosos.	Mayor recuperación de reciclables. <sup>(3)</sup>
<b>Desventajas</b>	Eficiencia limitada. Baja reputación. No recupera materiales valorizables sin pre-tratamiento adicional.	Capacidad limitada. Mayor CAPEX y OPEX.	Requiere pre-tratamiento. Mayor porcentaje de ceniza volante.	Alto OPEX por costo de pre-tratamiento.	Dificultad para mantener calidad del syngas. Altas emisiones de NOx.	Incierto CAPEX y OPEX. Requiere pre-tratamiento. Lograr disponibilidad puede ser complejo.	Alto costo de pre-tratamiento y selección de los residuos. Alto costo de tratamiento del syngas.

Nota 1: Plantas construidas no han logrado alcanzar operación comercial por lo que no se cuenta con datos de referencia, o la información es insuficiente para ser confiable.

Nota 2: El costo por tonelada tratada, fue calculado en base a una proyección lineal de los costos de operación y mantenimiento y de la inversión a través de 20 años, divididos por la capacidad anual de la planta, traídos a valor presente.

Nota 3: Considerando el pre-tratamiento estrictamente requeridos por la tecnología.

Como parte del estudio se construyó una base de datos de las plantas WTE a nivel mundial que utilizan RSD como combustible y que se encuentran en operación comercial, de la cual se extrajeron los siguientes resultados:

- Las tecnologías de conversión más desarrolladas y conocidas son las de combustión de parrilla y combustión por lecho fluidizado, con una distribución a nivel mundial predominante, representando el 80% y 11% respectivamente.
- Respecto a la combustión de parrilla, la mayor parte de las plantas son de capacidades entre 100.000 y 400.000 ton/año, alcanzando niveles de potencia entre los 15 MW y los 40 MW, dependiendo del poder calorífico de los RSD entregados en la planta.
- La tecnología de combustión de horno rotatorio está ligada a la industria de elaboración del cemento. A pesar de que se han encontrado 13 plantas de combustión con horno rotatorio para RSD, son más usadas para el tratamiento de residuos peligrosos y residuos clínicos. Esta tecnología normalmente es un sistema secundario para el tratamiento de una fracción de los residuos dentro de un sistema integral de tratamiento de residuos junto con otras tecnologías de WTE.
- La gasificación con turbina a vapor cuenta con experiencia concentrada en Japón de la cual no se ha podido obtener mucha información y la acotada experiencia occidental muestra varios fracasos que no permiten concluir su madurez.
- Las tecnologías de gasificación con turbina a gas y pirólisis se encuentran desarrolladas para su uso con combustibles fósiles y biomasa, sin embargo, su aplicación con RSD todavía se considera en etapa de demostración e implementación a nivel industrial.

A continuación se presenta una tabla resumen de la aplicación de los criterios de evaluación a las tecnologías.

Criterios	Combustión			Gasificación			Pirólisis	DA
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
				Turbina a Vapor	Turbina a Gas			
<b>Análisis de la Aplicación</b>	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa	Pasa
<b>Análisis de Combustible</b>	Pasa	Pasa	Pasa	N/A	N/A	N/A	N/A	Pasa
<b>Cumplimiento Ambiental</b>	30	11	25.4	N/A	N/A	N/A	N/A	15
<b>Disponibilidad</b>	4.7	4.7	4.7	N/A	N/A	N/A	N/A	5
<b>Costos Operacionales</b>	30	0	28.2	N/A	N/A	N/A	N/A	30
<b>Costos de Inversiones</b>	24.3	0	21	N/A	N/A	N/A	N/A	30
<b>Vida Útil</b>	4.8	4.8	5	N/A	N/A	N/A	N/A	0.5
<b>Total</b>	93.8	20.5	84.3	0	0	0	0	80.5
<b>Ranking</b>	1	4	3					(2)

**Tabla 0-2: Resumen aplicación de criterios de evaluación de tecnologías.**

Como se observa en la evaluación en la Tabla 0-2, la combustión de parrilla resultó ser la tecnología mejor evaluada para implementar en la RM, debido a que obtiene el mayor puntaje en todos los ítems analizados, a excepción de disponibilidad y vida útil.

Esta tecnología es la que cuenta con un mayor nivel de desarrollo internacional, pues tiene más de 1.264 plantas operando en todo el mundo (véase Anexo F, listado de plantas)

y además posee la mayor experiencia en ingeniería y operación. En Europa, aproximadamente el 90% de las plantas de tratamiento de RSD operan con esta tecnología. En América Latina existe una planta por iniciar su construcción en Ciudad de México, con una capacidad de alrededor de 1.600.000 ton/año. En los últimos 10 a 15 años se han construido más de 100 nuevas plantas con esta tecnología, y sigue siendo la principal tecnología desarrollada globalmente.

Cabe destacar que todos los países que cuentan con tecnologías WTE han desarrollado principalmente proyectos con tecnología de combustión de parrilla, la cual ha podido cumplir con los requerimientos técnicos y ambientales exigidos localmente.

Por otra parte, la tecnología de gasificación con turbina a vapor, a pesar de no ser priorizada de acuerdo al criterio de madurez tecnológica, se considera que está al borde de madurez. La escasa información de costos recopilada proyecta que podría ser una alternativa competitiva. Es por esto que vale la pena evaluar esta tecnología como una opción para una futura planta WTE en Santiago.

### *Emisiones*

Al no existir una normativa de emisiones atmosféricas específica en Chile para plantas WTE, el Decreto Supremo 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente aplica a todas las instalaciones de incineración que utilicen combustibles distintos a los tradicionales.

Sin embargo, al comparar los límites dispuestos en la norma europea de emisión de plantas de WTE, existe una diferencia importante en las magnitudes aceptadas para cada parámetro, siendo la norma europea más exigente que la norma nacional. Es importante considerar que la normativa europea es utilizada en los distintos países miembros como el criterio más amplio a cumplir. Varios países, e incluso localidades, tienen exigencias más estrictas para la implementación de este tipo de tecnologías, donde en general se busca exigir rangos cercanos a lo que es posible conseguir con la mejor tecnología disponible (BAT).

Cabe destacar que las mejores tecnologías WTE pueden cumplir con las normas más estrictas, siempre y cuando las plantas estén diseñadas y operadas de acuerdo a las buenas prácticas en la industria.

Además, el nuevo Plan de Descontaminación Atmosférica de la RM<sup>1</sup> requiere realizar la compensación de emisiones de material particulado. Por ejemplo, para una planta WTE de 330.000 ton anuales de RSD, la compensación de emisiones equivale al recambio de calefactores a leña en 670 hogares.

Por otra parte, los principales tipos de residuos finales en una planta WTE son ceniza de fondo y ceniza volante. Los porcentajes de cada subproducto dependen principalmente del tipo de RSD, la tecnología de combustión y el pre-tratamiento realizado.

La ceniza de fondo es el principal residuo generado por la combustión de RSD. Normalmente representa el 24,6% del peso total entrante de residuos, para el caso de combustión por parrilla, y el 15% para gasificación. De manera secundaria, la ceniza volante es emitida como producto del tratamiento de emisiones atmosféricas, la que

---

<sup>1</sup> Ministerio de Medio Ambiente, 2016, *Decreto 31: Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para la RM de Santiago.*

representa generalmente el 2,5% del peso de los RSD que entran al proceso de combustión de parrilla, y el 7% para gasificación. La ceniza de fondo debe ser depositada en rellenos sanitarios y la ceniza volante, por ser considerada un residuo peligroso, debe ser depositada en rellenos de seguridad.

Las otras emisiones como ruido y olores deben ser consideradas en el proceso de evaluación de un futuro proyecto, pero como tecnología, estas se encuentran debidamente resueltas con el diseño de las obras civiles y los sistemas de aire.

Los residuos líquidos generados dentro de una planta con tecnología moderna son reutilizados íntegramente, sin existir RILes.

### ***Evaluación económica***

Se evaluó la factibilidad económica de una planta de combustión de parrilla con las siguientes características:

- Capacidad de tratamiento de RSD de: 330.000 ton/año (10% de los RSD de la RM el 2015).
- Potencia eléctrica entre 20 MWe, para el caso de comercializar vapor/calor y electricidad y 29 MWe para el caso en que se comercialice solo energía eléctrica.
- Superficie: 8 hectáreas.
- Pre-tratamiento mínimo, solo se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta.
- Sistema de tratamiento de gases de combustión que cumple con los límites de emisión más exigentes entre el Decreto Supremo 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente, el Plan de Descontaminación de la RM y la norma europea para plantas WTE.
- Turbina de vapor de alta presión.
- Rango de inversión entre 191,3 a 202,9 millones de dólares americanos, incluyendo contingencias, según el modelo de contrato.

Se evaluaron cuatro escenarios que consideran distintos modelos de negocios, opciones con respecto a la propiedad y la forma de financiamiento del proyecto: Público, Concesión, Privado con Transferencia (o BOOT, por sus siglas en inglés) y Privado (o BOO, por sus siglas en inglés), presentándose los tres principales en este Resumen Ejecutivo. Se modelaron los resultados para obtener la tarifa por disposición final (o *gate fee*) por tonelada de residuos que asegure una rentabilidad dada para los distintos escenarios.

En la Tabla 0-3 se resumen los escenarios evaluados con los respectivos porcentajes de financiamiento. El escenario de concesión representa el caso base en el análisis.

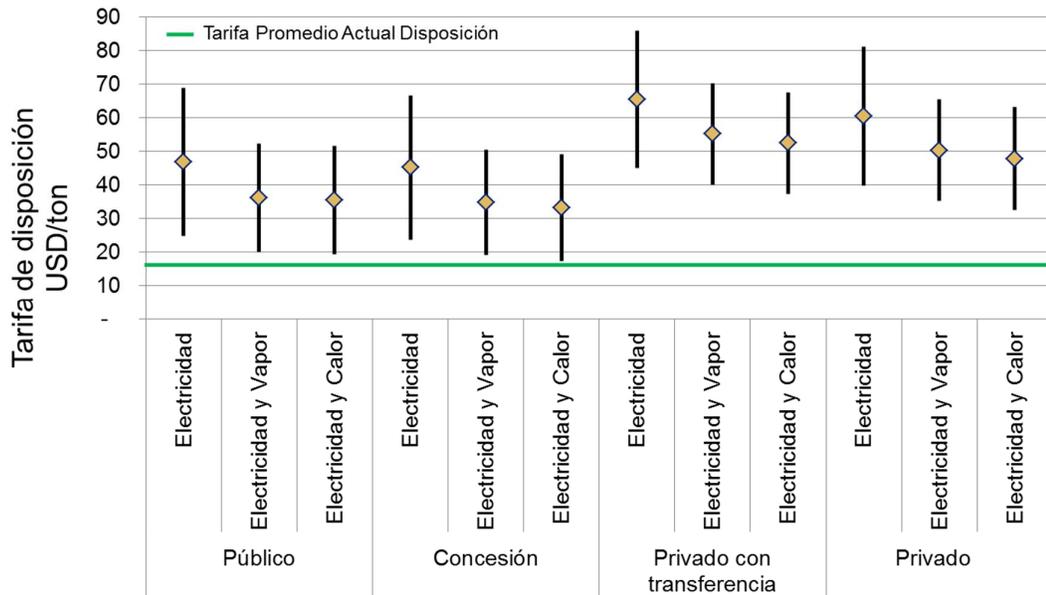
Tabla 0-3: Resumen de escenarios de análisis

Escenario	Propietario		Financiamiento %			TIR %	Terreno	RSD
	Público	Privado	Público	Préstamo	Capital Propio	Rentabilidad de accionista	Provisto por Estado	Contratos garantizados por Estado
<b>Público</b>	<b>X</b>		<b>100</b>			<b>6</b>	<b>Si</b>	<b>Si</b>
<b>Concesión</b>		<b>X</b>		<b>70</b>	<b>30</b>	<b>8</b>	<b>Si</b>	<b>Si</b>
<b>Privado</b>		<b>X</b>		<b>70</b>	<b>30</b>	<b>8+5*</b>	<b>No</b>	<b>No</b>

\*Se calcula la tarifa de disposición para asegurar al operador una utilidad de 8% más un 5% de riesgo

- **Escenario Público:** Una empresa pública es propietaria del proyecto, con financiamiento estatal del 100% y se hace cargo de su operación y mantenimiento. La tarifa de disposición se determina considerando una utilidad mínima de 6% y un nivel de ingresos que siempre permite cubrir los gastos de operación durante toda la vida útil del proyecto.
- **Escenario Concesión:** El Estado licita una concesión por el tratamiento de residuos en un terreno de propiedad del Estado, asegurando una rentabilidad del 8% independiente del flujo de residuos. El privado hace la inversión. El CAPEX no considera el costo de la contraparte de la licitación, quien tiene que preparar el proyecto hasta la licitación, ni el costo del terreno, ya que éste se entrega al concesionario. El privado se hace cargo de la construcción y operación de la obra, generando ganancias de eficiencia. Se calcula la tarifa de disposición para asegurar al concesionario una utilidad de 8%. El plazo de concesión será de 25 años.
- **Escenario Privado (BOO en inglés Build-Own-Operate):** Una entidad privada desarrolla el proyecto con financiamiento privado. El privado tiene que desarrollar el proyecto completo, buscar y adquirir el terreno y asegurar el suministro de los residuos. Se calcula la tarifa de disposición para asegurar al operador una utilidad de 8% más un 5% por riesgo. El periodo de operación no está limitado. En este escenario se tiene un CAPEX mayor (~4 MM USD adicionales<sup>2</sup>) debido a la adquisición de terreno por parte del privado.

<sup>2</sup> Valor del terreno depende del lugar en que se ubique la planta.



**Figura 0-3: Resultados de la evaluación económica por escenario - Rangos de Tarifas de Disposición (Gate Fee) [USD/ton]**

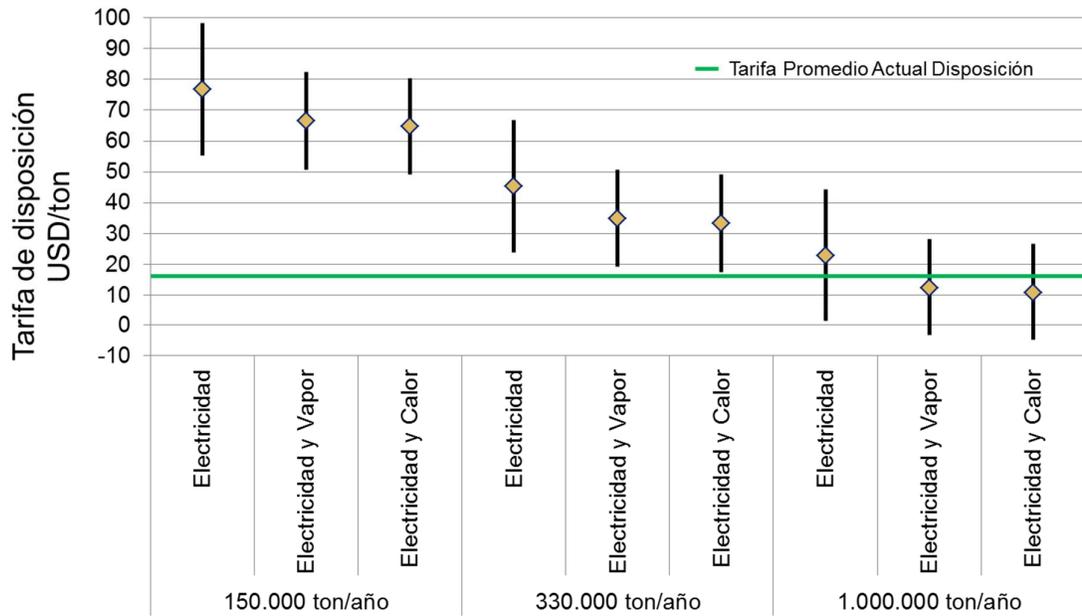
Como resultado se obtuvo que para una planta de 330.000 ton/año de capacidad de tratamiento de residuos, todos los escenarios evaluados requieren una tarifa de disposición más alta que el costo actual de disposición en relleno sanitario.

El modelo de negocio más conveniente a implementar sería el de Concesión. Con una inversión de 195 MM USD, se obtuvo una tarifa de disposición en un rango de 17,31 USD/ton a 66,68 USD/ton. Para un escenario de precio medio de venta de electricidad se obtuvo una tarifa de disposición 43,9 USD/ton, lo que corresponde a 2,5 veces más que el costo promedio del servicio de disposición final en la RM.

Es importante mencionar que bajo el modelo de Concesión, se requiere una inversión estatal de 8,2 MM USD por costos de desarrollo y precio del terreno. Por otra parte, se aprecia que en el escenario en que se considera la venta de electricidad y calor, las tarifas de disposición del escenario de Concesión son los más bajos.

Para evaluar el efecto de la economía de escala, en la Figura 0-4 se evaluó el escenario de Concesión con tres tamaños de planta: 150.000, 330.000 y 1.000.000 ton/año. Para una planta de 1 millón de ton/año que comercializa electricidad, para un escenario de venta de energía media y poder calorífico medio de los residuos, la tarifa de disposición sería de 21,53 US\$/ton, más cercana a la tarifa actual de disposición en relleno sanitario. Esta planta también podría ser rentable bajo las condiciones definidas si comercializa además de electricidad, vapor o calor.

A su vez, se obtuvo como resultado que la economía de escala con respecto a la capacidad de diseño de la planta, tiene un mayor impacto que el modelo de contratación o la forma de financiamiento.



**Figura 0-4: Rango de Tarifa de disposición y economía de escala por tamaño de planta en Escenario de Concesión, considerando precios de energía bajo, medio y alto simulados por el software BID-3 y distintas combinaciones de proyección de PIB y reciclaje en la RM. [USD/ton]**

En los análisis de sensibilidad desarrollados se mostró que la comercialización de energía eléctrica por sí sola es menos rentable. Por lo tanto, es importante que futuros proyectos puedan ser ubicados cerca de consumidores de vapor o calor, de manera que se permita comercializar estos productos a una tarifa competitiva. Cabe mencionar que las evaluaciones no consideran la inversión en infraestructura para distribuir el calor.

Los escenarios de crecimiento poblacional y la penetración del reciclaje con la modificación en el poder calorífico, tiene bajo impacto en la evaluación económica, debido a que la cantidad de residuos tratada en la planta corresponde al 10% de todos los RSD generados en la RM.

Otro de los parámetros importantes a considerar en la evaluación económica de un proyecto es el precio de venta de energía eléctrica, debido a que afecta la rentabilidad y las condiciones de financiamiento del mismo. En la experiencia del consultor, se visualiza mayor riesgo al financiar un proyecto sin un contrato de venta de energía garantizada, por lo tanto, se estima crucial para este tipo de proyectos firmar algún contrato de compra - PPA (*Power Purchase Agreement*), idealmente con una entidad pública, para poder incorporar este PPA dentro de las condiciones de un eventual proceso de licitación de una planta WTE, y que esto pueda ser considerado dentro del modelo financiero de los oferentes.

### **Comentarios finales**

Este estudio corresponde a la contribución más reciente en Chile que aborda la implementación de una planta de valorización energética de residuos domiciliarios a través de una evaluación técnica y económica.

Tal como se aprecia en los resultados del estudio, la disposición de residuos mediante una planta WTE de 330.000 ton/año de RSD requeriría una tarifa de disposición mayor que la actual. Sin embargo, estos resultados no deben desincentivar el desarrollo de estos proyectos, debido a que una planta de este tipo en una ubicación estratégica podría tener costos de transporte y disposición menores a los actuales. Asimismo, podría mitigar el problema que tendrá la Región Metropolitana cuando los rellenos sanitarios Santa Marta y Santiago Poniente, que manejan el 46% de los RSD de la región, cumplan su vida útil de acuerdo a la autorización sanitaria que les aplica, correspondiente al año 2022 y 2024, respectivamente.

Cabe destacar que actualmente el costo por transporte de residuos en la Región Metropolitana es más alto que el costo por disposición final, debido principalmente a la lejanía de los rellenos sanitarios con respecto a los centros urbanos. Una ubicación estratégica de una planta WTE en la Región Metropolitana podría disminuir las distancias con las comunas que dispongan sus residuos en ella, logrando ahorros significativos por concepto de transporte. Lo anterior podría permitir que los costos de transporte y disposición de los residuos sean menores que los actuales, generando un ahorro a los municipios.

Por otro lado, los beneficios indirectos de esta tecnología son variados, y principalmente se traducen en una reducción del impacto ambiental del sistema actual de disposición de residuos, al disminuir las emisiones por transporte y tratamiento, y además, al hacerse cargo de externalidades negativas de los rellenos sanitarios, como por ejemplo, los problemas de olores y líquidos percolados.

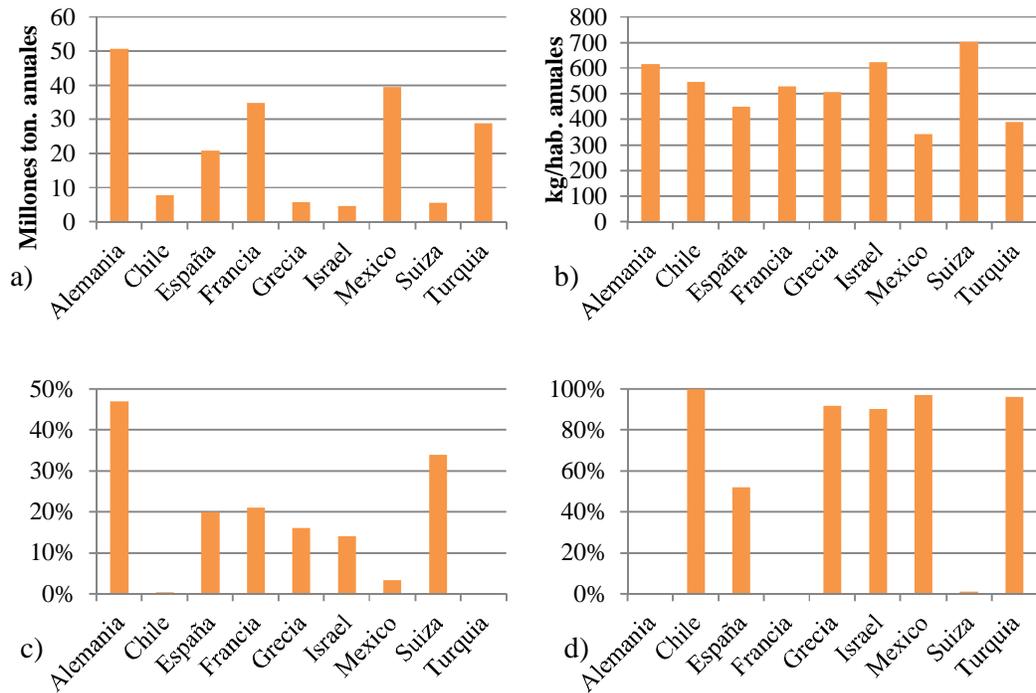
Los últimos proyectos de disposición de residuos en Chile indican que la población no está dispuesta a recibir en las cercanías de su comunidad la basura de otros. La ciudadanía entonces tendrá que decidir si se persiste con un modelo de rellenos sanitario o está dispuesta a integrar nuevas tecnologías de procesamiento y aprovechamiento energético de los residuos dentro de su comunidad.

Finalmente, aún queda por definir aspectos fundamentales que permitan viabilizar un proyecto de este tipo, considerando acuerdos con comunidades, modelos de negocio, ubicación estratégica, además de recalcar la posibilidad de establecer una metodología de desarrollo en conjunto entre entidades públicas y privadas, tratando idealmente de aprovechar la experiencia tecnológica del privado.

**1 OBJETIVOS Y ALCANCES**

**1.1 Introducción**

Chile es el país que más envía basura per cápita a rellenos sanitarios entre los 34 países que integran la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), después de Turquía. Le siguen en la lista México e Israel y Grecia. En el otro extremo, figuran Suiza, Alemania y Suecia, países donde los rellenos son reemplazados por incineración (con y sin producción de energía o calefacción), reciclaje y compostaje. En Suiza<sup>3</sup>, por ejemplo, en 2016 se generaron 5.457 GWh de energía desde plantas WTE, de los cuales 3.602 GWh fueron usados para calefacción distrital, 1.855 GWh en energía eléctrica y el resto para el autoconsumo de las mismas plantas. Las gráficas siguientes representan las estadísticas de Chile, Alemania y Suiza con respecto a su gestión y generación de RSD.



**Figura 1-1: Comparación de estadísticas para Chile, Alemania, España, Francia, Grecia, Israel, México, Suiza y Turquía<sup>4</sup> con respecto a: a) generación de RSD, b) Generación de RSD per cápita, c) porcentaje de reciclaje y d) porcentaje dispuesto en relleno sanitario/vertedero<sup>5</sup>**

En la figura es posible observar que la generación per cápita de residuos en Chile es similar a otros países OCDE con mayor desarrollo en políticas de reciclaje. Sin embargo, el porcentaje de reciclaje es marginal y casi el 100% de los residuos terminan en un relleno sanitario o vertedero autorizado.

<sup>3</sup> Asociación de Operadores de aprovechamiento de residuos en Suiza, <http://vbsa.ch/fakten/abfallverwertung/>

<sup>4</sup> D-Waste, 2017, *Waste Atlas*, <http://www.atlas.d-waste.com/>

<sup>5</sup> The World Bank, 2012, *What a Waste, a global review of solid waste management*.

La Región Metropolitana (RM) genera más de 3 millones de toneladas al año de residuos sólidos domiciliarios (RSD). De ellos, el 98% se dispone en tres rellenos sanitarios: Santa Marta, Santiago Poniente, y Lomas Los Colorados, y el 2% restante en el vertedero "Popeta", que cuenta con autorización sanitaria.

Existe un gran desconocimiento sobre el costo, manejo y posibilidad de que la Región Metropolitana cuente con algún tipo de industria de generación de energía a partir de los residuos. Debido a esto, se requiere tener mayor información, modelos técnicos y económicos, factibilidad y finalmente opciones que entreguen una vía de manejo de RSD más sustentable.

De esta forma, el Gobierno Regional Metropolitano junto con el Ministerio de Energía se han propuesto realizar un estudio de factibilidad para una planta Waste-to-Energy (WTE) en la Región Metropolitana, que permita explotar de mejor manera la generación de RSD, mediante la posibilidad de generación de energía sustentable. Esto significará analizar las opciones tecnológicas de aprovechamiento energético de los RSD, y los posibles incentivos que puedan aumentar el nivel de reciclaje en Santiago.

El estudio profundizará el análisis comparativo de las alternativas tecnológicas y determinará la factibilidad técnico-económica de la mejor alternativa para su implementación en la Región Metropolitana, considerando aspectos como la capacidad de la planta, montos de inversión y tarifas de entrada de los residuos, para viabilizar un proyecto de este tipo bajo la realidad regional y nacional. Además, se generará un proceso participativo que involucrará a distintos expertos en la materia y a representantes de la sociedad civil, a fin de evaluar la pertinencia y aceptación de las alternativas analizadas.

## **1.2 Objetivo general**

El objetivo general del estudio es determinar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de una planta de generación de energía a partir de residuos sólidos domiciliarios (Waste-to-Energy) en la Región Metropolitana.

## **1.3 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos del estudio incluyen los siguientes:

1. Objetivo 1: Caracterizar el entorno y estado actual de la generación RSD en la Región Metropolitana para el desarrollo adecuado del estudio.
2. Objetivo 2: Desarrollar un análisis comparativo de las diferentes tecnologías existentes para generación de energía a partir de RSD para la RM.
3. Objetivo 3: Identificar y analizar los requisitos ambientales que debe cumplir una planta de WTE para ser implementada en la RM.
4. Objetivo 4: Realizar un estudio de factibilidad de la(s) solución(es) tecnológica(s) seleccionada(s) para implementar en la RM y proponer distintos escenarios y sus modelos de negocio.
5. Objetivo 5: Evaluar la percepción de implementar una planta WTE en la RM, en comparación con otras alternativas de disposición de residuos.
6. Objetivo 6: Formular una estrategia y plan de acción en función de los intereses regionales (Gobierno Regional de Santiago y municipios) para implementar una planta de WTE en la RM de una manera integral e informada.

#### 1.4 Actividades realizadas

El estudio tiene una duración total de 140 días calendario y se ha dividido en 3 etapas principales y en las tareas siguientes:



Figura 1-2: Cronograma resumido del estudio

Además, se ha realizado las siguientes actividades de coordinación, recopilación y revisión:

- Reunión de inicio con Contraparte Técnica (30.06.2017);
- Reunión con IASA (11.07.2017)
- Reunión con el Área de Residuos de I.M. de Peñalolén (19.07.2017)
- Reunión de trabajo con Contraparte Técnica 1 (27.07.2017)
- Reunión con el Área de Residuos de I.M. de Providencia (10.08.2017)
- Reunión de trabajo con Contraparte Técnica 2 (22.08.2017)
- Reunión Área de Residuos del Ministerio de Medioambiente (23.08.2017)
- Reunión de presentación con Intendente Metropolitano (05.09.2017)
- Reunión de trabajo con Contraparte Técnica (07.11.2017)
- Reunión de revisión Objetivo 4, con Contraparte Técnica (15.11.2017)
- Reunión de revisión modelos de negocios con Contraparte Técnica (22.11.2017)
- Reunión de revisión Objetivo 3, con Contraparte Técnica (11.11.2017)
- Reunión de revisión Objetivo 4, con Contraparte Técnica (12.11.2017)
- Reunión de revisión modelos de negocios con Ministerio de Energía (14.11.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con Babcock & Wilcox (04.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con WTE Latam (05.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con CRE Investment (05.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con KDM Energía (05.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con Seremi Medio Ambiente (06.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con TECHINT (07.12.2017)

- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con USACH (11.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con Alianza Basura Cero (13.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con Fundación Basura (13.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con GIZ (14.12.2017)
- Reunión Entrevista Objetivo 5 y 6, con Municipalidad de Renca (15.12.2017)
- Reunión de trabajo de metodología para compensación de emisiones, con SEREMI de Medio Ambiente (07.02.2018)
- Reunión de revisión de metodología para compensación de emisiones, con SEREMI de Medio Ambiente (12.02.2018)

## 1.5 Limitaciones del estudio

El presente estudio considera una evaluación de factibilidad técnico-económica para la implementación de una o varias plantas con tecnología WTE, para el aprovechamiento energético de los RSD en la Región Metropolitana. Considerando lo complejo e innovador de la aplicación de este tipo de tecnologías en la región, es necesario mencionar las limitaciones del presente estudio:

- El horizonte de análisis para la proyección de los residuos es el año 2050. Cualquier análisis económico posterior a esa fecha, se realizará con una proyección lineal.
- No se incluyen en este estudio investigaciones in situ, análisis de terreno, toma de muestras, análisis de laboratorio, estudios de títulos, tasaciones, ingenierías básicas de mejoras de suelos eventualmente requeridas para la implementación de los proyectos en un terreno particular.
- No se incluyen análisis ambientales, consultas ciudadanas, levantamientos de líneas base, permisos sectoriales, preparación de declaraciones de impacto ambiental o estudios de impacto ambiental.
- No se incluye la tramitación de ningún permiso o licencia eventualmente requerido para la ejecución de un proyecto.
- No se incluye ningún tipo de diseño de detalle de equipos, partes, piezas, obras civiles, canalizaciones, tuberías, líneas de transmisión, ni ninguna otra obra de ingeniería requerida para la implementación de esta tecnología.

Cabe mencionar que algunas de las cifras entregadas en este informe corresponden a fuentes externas, bases de datos internas del consultor, información pública e información bajo restricciones de confidencialidad que no permiten explicitar la fuente. Las proyecciones establecidas se encuentran realizadas conforme a la metodología que se indica, y deben ser usadas como valores referenciales.

## 2 ETAPA 1 – OBJETIVO ESPECÍFICO 1

### 2.1 Cuantificar y caracterizar la generación residuos sólidos en la Región Metropolitana

#### 2.1.1 Alcance del tipo de residuos considerados en el estudio

Los residuos sólidos se pueden clasificar en base a diferentes criterios, entre ellos el estado de agregación, la composición química, el método de recolección y/o el origen. El presente estudio se concentra en la cuantificación de aquellos residuos de origen domiciliario o asimilables a domiciliario que están siendo recolectados por los municipios y depositados en algún lugar de disposición final autorizado (sea relleno sanitario o vertedero).

En este contexto, el Decreto Supremo N° 189/2005 del MINSAL que “Regula Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios”, contiene las siguientes definiciones:

Residuos sólidos domiciliarios (RSD): residuos sólidos, basuras, desechos o desperdicios generados en viviendas y en establecimientos tales como edificios habitacionales, locales comerciales, locales de expendio de alimentos, hoteles, establecimientos educacionales y cárceles.

Residuos sólidos asimilables (RSAD): residuos sólidos, basuras, desechos o desperdicios generados en procesos industriales u otras actividades, que no son considerados residuos peligrosos de acuerdo a la reglamentación sanitaria vigente y que, además, por su cantidad composición y características físicas, químicas y bacteriológicas, pueden ser dispuestos en un Relleno Sanitario sin interferir con su normal operación.

#### 2.1.2 Cuantificación de los residuos sólidos generados en la Región Metropolitana

La cuantificación de los RSD se realizó en base al registro de estadísticas de rellenos sanitarios para el año 2015<sup>6</sup>. En dicho documento se detalla la cantidad anual de residuos domiciliarios totales dispuestos por comuna, segmentados de acuerdo a su lugar de disposición final.

Para el año 2015, los RSD totales dispuestos por municipios en la Región Metropolitana alcanzaron 3.272.387 ton.

Cabe destacar que este número no contempla los residuos de carácter particular dispuestos en los rellenos sanitarios de la RM (mayormente RSAD), los que para el año 2015 alcanzaron un total aproximado de 813.000 ton<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Información provista por el Ministerio de Medio Ambiente en reunión del 09.08.2017

<sup>7</sup> 279.264 ton en Relleno Sanitario Santa Marta, 220.766 ton en Relleno Sanitario Santiago Poniente, 132.971 ton en Relleno Sanitario Lomas Los Colorados

**Tabla 2-1: Cantidad total de residuos recolectados por comuna**

Comuna	Residuos [ton/año] 2015	Comuna	Residuos [ton/año] 2015
Alhué <sup>8</sup>	1.024	María Pinto <sup>9</sup>	3.552
Buín	35.206	Melipilla	44.275
Calera de Tango	12.146	Ñuñoa	79.329
Cerrillos	44.204	Padre Hurtado	24.903
Cerro Navía	60.595	Paine	23.449
Colina <sup>10</sup>	47.861	Pedro Aguirre Cerdea	50.654
Conchalí	64.342	Peñaflor	31.621
Curacaví	9.376	Peñalolén	122.825
El Bosque	79.951	Pirque	9.116
El Monte	11.561	Providencia	77.534
Estación Central	73.695	Pudahuel	107.756
Huechuraba	52.841	Puente Alto	231.359
Independencia	42.577	Quilicura	97.264
Isla de Maipo	11.724	Quinta Normal	59.153
La Cisterna	44.276	Recoleta	81.663
La Florida	191.735	Renca	73.067
La Granja	63.733	San Bernardo	165.882
La Pintana	79.518	San Joaquín	55.400
La Reina	46.521	San José de Maipo	7.705
Lampa	34.005	San Miguel	42.807
Las Condes	118.855	San Pedro <sup>11</sup>	1.405
Lo Barnechea	62.736	San Ramón	42.639
Lo Espejo	52.520	Santiago	184.706
Lo Prado	40.777	Talagante	26.365
Macul	52.141	Tiltil	5.562
Maipú	240.387	Vitacura	48.087
<b>Total</b>		<b>3.272.387</b>	

A partir de la información anterior, se pueden ordenar las comunas de mayor a menor cantidad de residuos recolectados por año, como lo muestran los gráficos presentados en la Figura 2-1 y Figura 2-2.

<sup>8</sup> Dato en base a información año 2013 (Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la RM)

<sup>9</sup> Dato en base a Catastro de sitios de disposición final de residuos sólidos domiciliarios, en la Región Metropolitana Circular Intendente Metropolitano N° 14 del 15 de mayo de 2015

<sup>10</sup> Dato en base a Catastro de sitios de disposición final de residuos sólidos domiciliarios, en la Región Metropolitana Circular Intendente Metropolitano N° 14 del 15 de mayo de 2015

<sup>11</sup> Dato en base a información año 2013 (Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la RM)

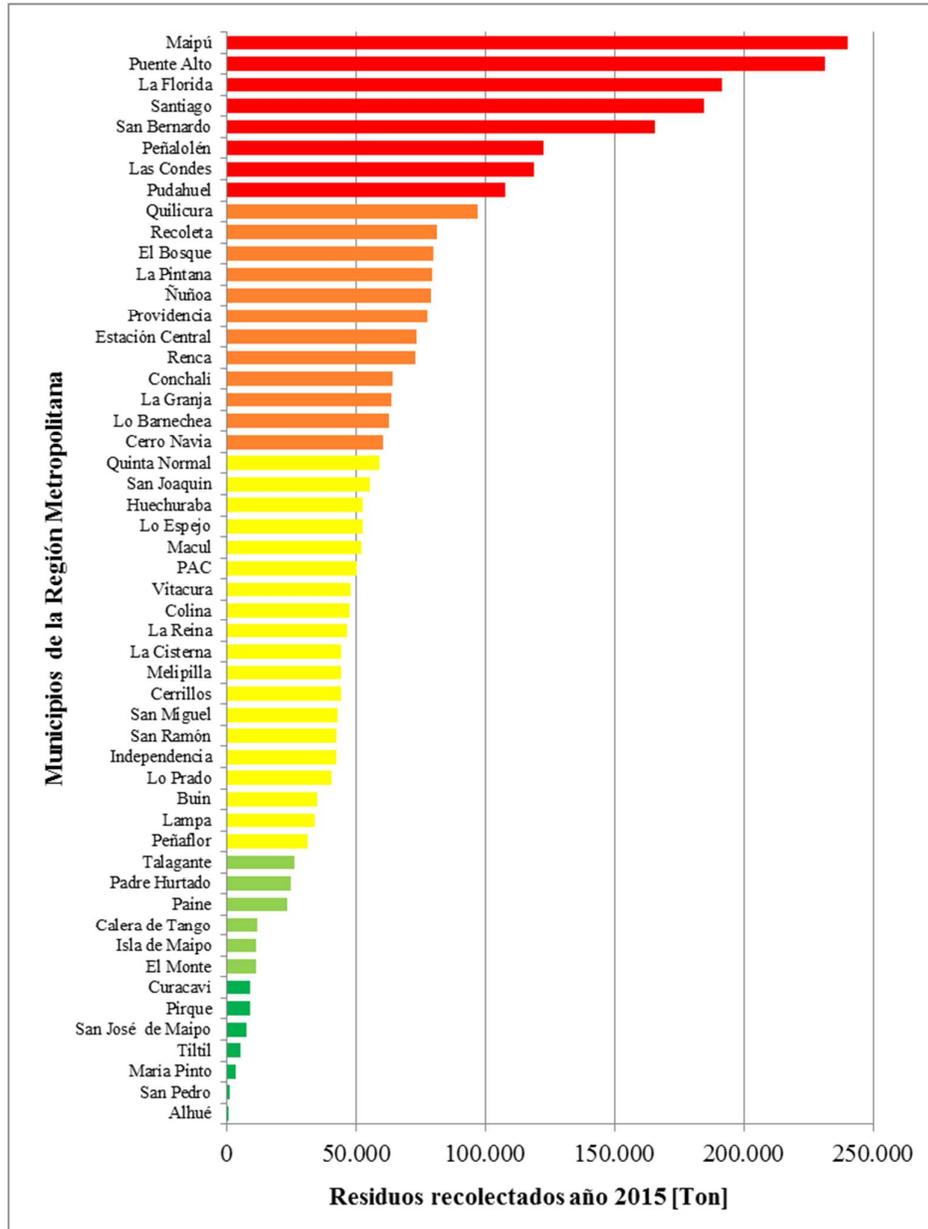


Figura 2-1: Cantidad de residuos recolectados en el año 2015<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Registro de estadísticas de rellenos sanitarios para el año 2015, Información provista por el Ministerio de Medio Ambiente en reunión del 09.08.2017.

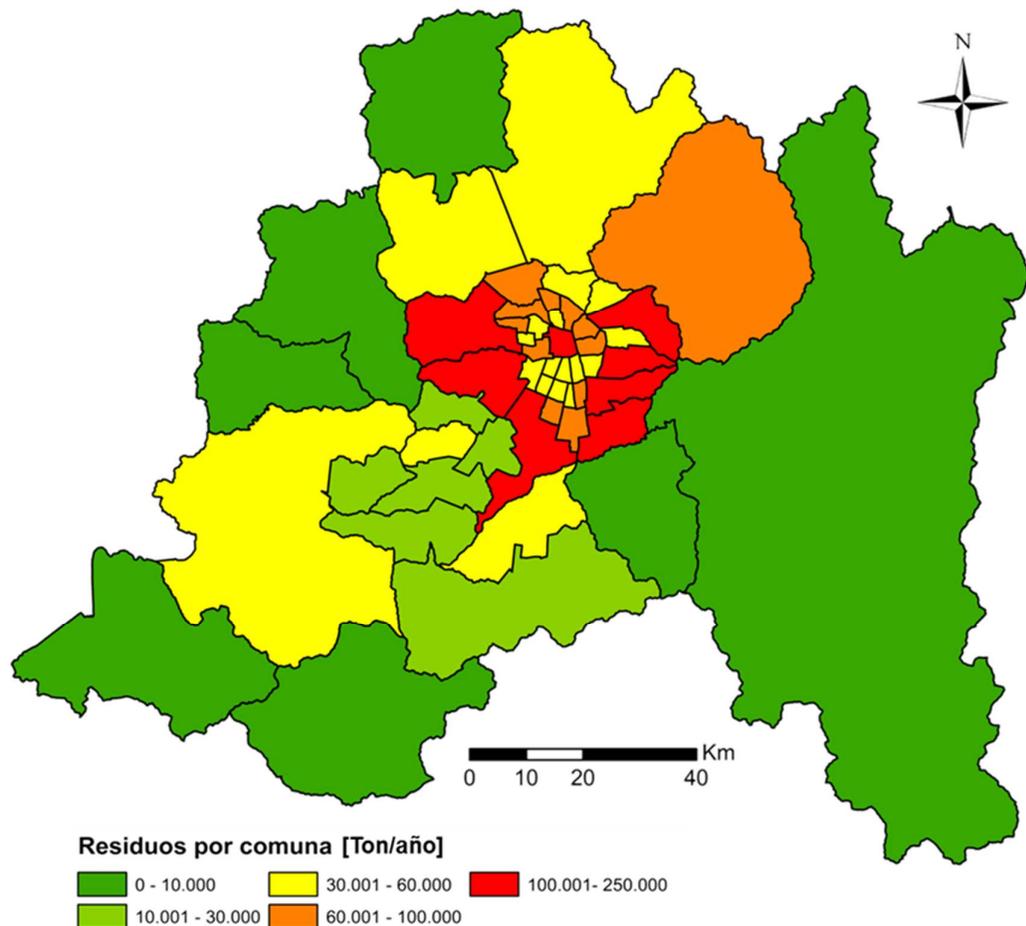


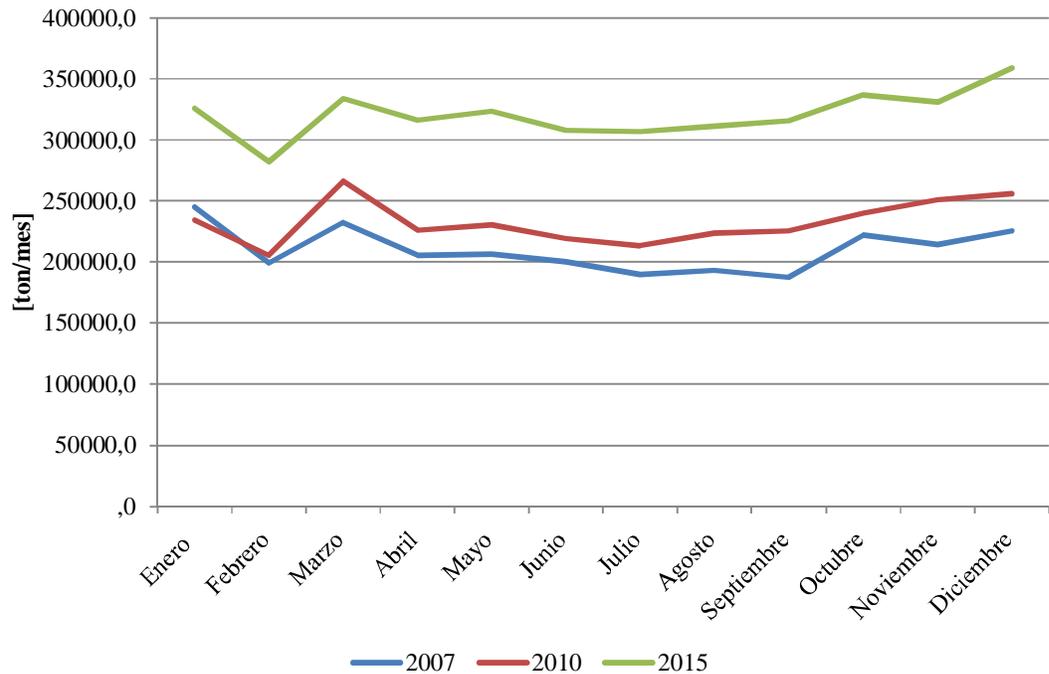
Figura 2-2: Mapa de cantidad de residuos recolectados en el año 2015<sup>13</sup>

### 2.1.3 Estacionalidad de la recolección de residuos

Un factor relevante al planificar el desarrollo de una planta de Waste-to-Energy corresponde a la disponibilidad temporal de los residuos. Se espera una disponibilidad que permita un régimen de operación continuo. La Figura 2-3 muestra la recolección mensual de residuos en los años 2007, 2010 y 2015, posibilitando la apreciación de la estacionalidad<sup>14</sup>. Dichos datos se presentan a continuación:

<sup>13</sup> Registro de estadísticas de rellenos sanitarios para el año 2015, Información provista por el Ministerio de Medio Ambiente en reunión del 09.08.2017.

<sup>14</sup> Estadísticas Rellenos Sanitarios, información provista por el Ministerio de Medio Ambiente en reunión del 09.08.2017



**Figura 2-3: Cantidad residuos recolectado mensualmente en la Región Metropolitana entre los años 2007, 2010 y 2015 (Elaboración propia)**

De acuerdo a la figura anterior, se puede concluir que:

- La generación anual de residuos ha ido en constante incremento.
- Existe una disminución en la generación de residuos durante el mes de febrero. Este efecto se debe probablemente a que un porcentaje importante de la población de la Región Metropolitana toma vacaciones en este periodo, migrando temporalmente fuera de la región.
- Durante el mes de Marzo aumenta la generación de residuos, atribuible al periodo de vuelta de vacaciones.
- Entre Abril y Junio la cantidad de residuos recolectado es relativamente más baja y estable.
- A partir del mes de Junio y hasta Diciembre, hay un aumento constante en la generación de residuos.
- Diciembre y Marzo corresponden, en la mayoría de los casos, a los meses con mayor generación de residuos. Esto se atribuye a la celebración de las fiestas de Navidad y año nuevo, y al comienzo de un nuevo periodo escolar, respectivamente.

## 2.1.4 Caracterización de los residuos sólidos en la Región Metropolitana

En términos generales, los RSD pueden ser clasificados en las siguientes categorías:

- Orgánicos
- Papel
- Cartón
- Plásticos
- Metales
- Vidrio
- Inertes (cerámicas, cenizas, piedras<sup>15</sup>)
- Especiales (pañales, celulosas, gomas y material textil, entre otros)
- Otros (residuos que no clasifican en ninguna de las categorías)

De estos, los con mayor potencial energético corresponden a plásticos, especiales, cartón y papel respectivamente, los con menor potencial son los vidrios, metales y orgánicos, mientras que los inertes no tienen potencial. En el uso de las tecnologías Waste-to-Energy, los residuos corresponden a la materia energética primaria, por lo que su correcta caracterización resulta fundamental para poder estimar de forma precisa la energía a generar por una planta. Para efectos del presente estudio, los RSD generados en cada comuna serán clasificados en 2 categorías:

- Residuos residenciales
- Residuos comerciales

En el caso de los residuos residenciales, el principal factor que incide en la generación y composición de los residuos es el nivel socioeconómico de la población. A mayor estrato socioeconómico, mayor es la producción de residuos y mayor es la valorización de estos debido a su composición. En términos generales, a mayor nivel socioeconómico la generación porcentual de plásticos, papeles, cartones, tetra pack, especiales y vidrios es mayor, mientras que se reduce la generación de residuos orgánicos.

**Tabla 2-2: Tipos de residuos generados según categoría socioeconómica<sup>15</sup>**

Categorías	ABC1	C2	C3	D – E
Orgánicos	55,7%	54,1%	59,0%	58,0%
Papel	10,0%	10,8%	9,4%	6,1%
Cartón	4,0%	3,4%	3,8%	2,4%
Plásticos	12,8%	12,3%	10,7%	10,0%
Metales	1,1%	1,4%	1,1%	0,9%
Vidrio	4,4%	3,5%	2,6%	3,2%
Inertes	2,6%	4,1%	2,8%	1,9%
Tetra Pack	0,8%	0,7%	0,7%	0,4%
Especiales	1,4%	0,9%	1,0%	1,1%
Otros	7,1%	8,6%	9,0%	16,0%

<sup>15</sup> Ingeniería Alemana, 2011, *Estudio de factibilidad técnico ambiental, social y económica para la implementación del plan de acción "Santiago Recicla, Santiago, Chile*

En cuanto a los residuos comerciales, a mayor estrato socioeconómico aumenta la producción de compuestos con un alto valor energético tales como papeles, cartón, plásticos y especiales, mientras que disminuye considerablemente su composición orgánica.

**Tabla 2-3: Repartición típica de generación de residuos por tipo en el sector comercial<sup>16</sup>**

Residuos sector comercial	
Orgánicos	39,4%
Papel	11,0%
Cartón	14,2%
Plásticos	15,3%
Metales	2,8%
Vidrio	2,2%
Inertes	0,7%
Tetra Pack	2,0%
Especiales	11,1%
Otros	1,3%

#### 2.1.4.1 Cuantificación de residuos residenciales y comerciales en la Región Metropolitana

En primera instancia, se descuentan del total de residuos dispuestos a nivel municipal aquellos de origen vegetal correspondientes a podas y ferias libres, que equivalen en promedio al 6,5% del total<sup>17</sup>. Posteriormente, y considerando los datos de población y residuos totales dispuestos de la comuna, se estima un valor de PPC (producción per cápita) global. Luego, se analiza la distribución socioeconómica de cada comuna, obteniendo de esta forma un PPC exclusivo para la componente residencial. Finalmente, la fracción de residuos comerciales se obtiene de la diferencia entre los residuos totales y los residuos de origen residencial<sup>18</sup>, según la fórmula propuesta a continuación.

$$R_{COMERCIAL} = (RRS - RV) - \frac{(PPC_{NSE} \times Pob \times 365)}{1.000}$$

Dónde:

RRS = Residuos reportados como dispuestos en Relleno Sanitario

RV = Residuos vegetales (6,5% de RRS)

PPC<sub>NSE</sub> = índice per cápita de residuos por nivel socioeconómico de la comuna [kg/hab/día]

Pob. = Población al año 2015

Finalmente, para el año 2015 se obtiene que de los residuos totales dispuestos por comunas de la RM, 2.280.103 ton corresponden a residuos del tipo residencial y 998.891 ton del tipo comercial recolectados por servicios municipales.

<sup>16</sup> Starco, 2013, *Caracterización de residuos sólidos comuna de Providencia*, Santiago Chile

<sup>17</sup> Ingeniería Alemana, 2011, *Estudio de factibilidad técnico ambiental, social y económica para la implementación del plan de acción "Santiago Recicla"*, Santiago, Chile

<sup>18</sup> Para más detalle del cálculo, ver Anexo C.

Es necesario señalar que en algunas comunas se ha obtenido una proporción de residuos de carácter comercial superior a lo esperado, esto debido a que la metodología considera como dato de población al 2015 la proyección en base al censo de 2002 (metodología MAPS), y pierde de vista las tendencias de crecimiento acelerado en algunas comunas debido al alto desarrollo inmobiliario. En particular, esto se hace presente en las comunas de Lampa, Colina, Quilicura, Huechuraba. Lo Barnechea y Padre Hurtado.

#### 2.1.4.2 Metodología para la valorización energética

Una vez obtenida la composición de los residuos tanto para los de origen residencial como comercial, se obtuvo la composición química y humedad de cada una de las categorías.

**Tabla 2-4: Composición química y humedad de las categorías de residuos<sup>19</sup> [% peso, base seca]**

	C	H	O	N	S	Cenizas	Humedad
Orgánicos	48	6	38	3	0	5	59
Papel	44	6	44	0	0	6	7
Cartón	44	6	45	0	1	5	6
Plásticos	60	7	23	0	0	10	2
Metales	5	1	4	0	0	91	3
Vidrio	1	0	0	0	0	99	3
Inertes	0	0	0	0	0	0	3
Tetra Pack	39	5	36	0	0	17	5
Especiales	55	7	31	4	0	4	15
Otros	26	3	2	1	0	68	12

Posteriormente, se calculó el poder calorífico inferior (PCI) de cada una de las categorías de acuerdo a 4 metodologías (Lloyd & Daveport, Boie, Wilson, Meraz). Los resultados para cada uno fueron similares, por lo que se optó por utilizar el promedio de ellos.

**Tabla 2-5: Cálculos de los poderes caloríficos inferiores de las categorías de residuos según diferentes métodos**

	Lloyd & Daveport	Boie	Wilson	Meraz	Promedio
	PCI [kWh/kg]				
Orgánicos	2,07	1,94	1,83	1,97	1,95
Papel	4,48	4,15	3,82	3,99	4,11
Cartón	4,55	4,21	3,85	4,05	4,17
Plásticos	7,12	6,91	6,90	6,95	6,97
Metales	0,48	0,45	0,42	0,43	0,45
Vidrio	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Inertes	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tetra Pack	4,23	3,95	3,70	3,82	3,92
Especiales	5,43	5,21	5,04	5,39	5,27
Otros	2,93	2,90	2,98	3,00	2,95

<sup>19</sup> Moratorio, D.; Rocco, I.; Castelli, M., 2012, *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, num 10: Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía*, Montevideo, Uruguay

Finalmente, se ponderó el valor del poder calorífico de cada categoría de residuo con la composición, obteniendo el poder calorífico total por comuna. El promedio de todas las comunas para el año 2015, incluyendo la fracción comercial, corresponde a 3,04 [kWh/kg] o 10,94 [MJ/kg].

## **2.2 Proyección de la generación de residuos sólidos en la Región Metropolitana**

### **2.2.1 Antecedentes para la proyección**

Con el objetivo de estimar la disponibilidad en el tiempo de los RSD que permitirían operar una planta de Waste-to-Energy, se realiza una proyección hasta el año 2050.

Para ello, se debe tomar en cuenta que la generación de residuos varía de acuerdo a una serie de factores, entre los cuales se encuentran los hábitos culturales y de consumo, el nivel de ingreso, estándares de calidad de vida y desarrollo tecnológico. Tomando en consideración que los hábitos culturales y desarrollo tecnológico son semejantes para toda la población de la RM, la generación de residuos per cápita se reduce a los hábitos de consumo, nivel de ingresos y estándares de calidad de vida, todos ellos determinados por el nivel socioeconómico y el crecimiento de la economía nacional.

A modo de antecedente, desde la década de los 60 la generación de residuos ha aumentado cerca de un 400%. Resulta importante recalcar que a mayor nivel de ingresos, mayor es la generación de residuos per cápita y mayor el valor energético incorporado en ellos, como se ha mencionado en la sección anterior. Bajo este contexto, la proyección de generación de residuos considera los siguientes parámetros:

- Proyección de la población: En base al Censo 2002 y proyecciones de MAPS<sup>20</sup>.
- Proyección del Producto Interno Bruto (PIB) para tres escenarios.
- Iniciativas de reciclaje y su influencia en la generación de residuos para tres escenarios.

La metodología utilizada para evaluar el impacto de los parámetros de aumento de población y aumento del PIB se detallan en el Anexo A. Los escenarios de reciclaje se describen en el capítulo 2.4.

### **2.2.2 Proyección de residuos hasta 2050**

A partir de los parámetros de crecimiento demográfico, ingresos y el efecto de las iniciativas de reciclaje, se ha proyectado la cantidad anual de residuos generados por comuna en un horizonte de 33 años (al 2050). En general, las proyecciones relacionadas al tratamiento y disposición final de los residuos son realizadas a 15 años, debido a las posibles desviaciones que se pueden presentar por cambios, por ejemplo, relacionados a la expansión urbana de la ciudad o a crisis económicas. Por ello, a pesar de que las proyecciones se han realizado rigurosamente, se recomienda realizar un procedimiento de actualización al menos cada 5 años.

---

<sup>20</sup> <http://www.mapschile.cl/>

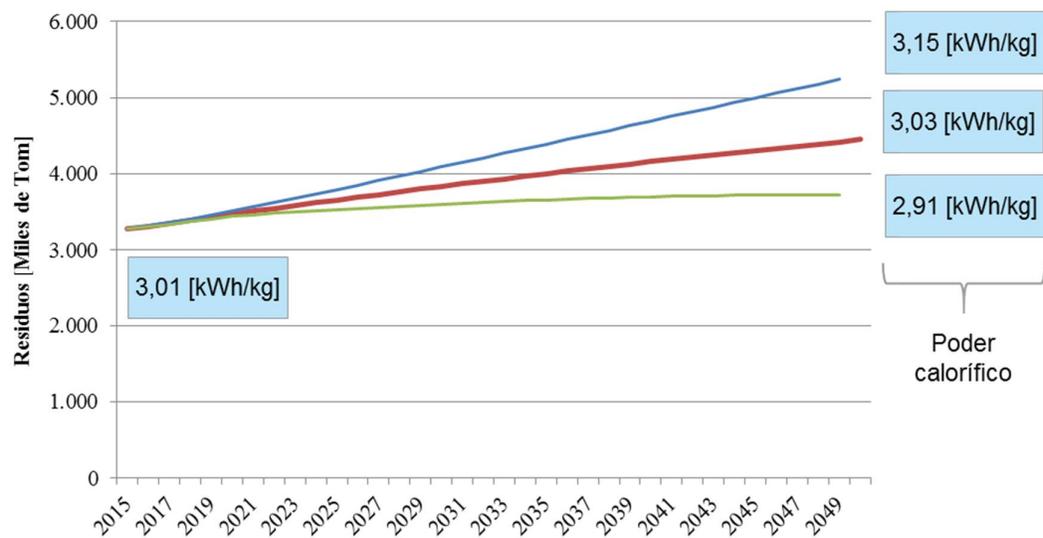
Finalmente, y en función de las posibles combinaciones de escenarios en cuanto a crecimiento económico y penetración del reciclaje, se considera como el escenario más probable la condición de crecimiento económico medio y reciclaje medio, que para el año 2050 proyecta una disposición total de residuos de 4.455.991 ton. Este valor se limita a los RSD y no considera la proyección de residuos sólidos asimilables a domiciliarios.

La siguiente tabla muestra la cantidad de RSD esperados al año 2050 para las distintas combinaciones de escenarios:

**Tabla 2-6: RSD esperados al año 2050 para los 3 escenarios, unidades en [ton/año]**

RSD al 2050		Escenario Crecimiento Económico		
		Bajo	Medio	Alto
Escenario de reciclaje	Pesimista	4.347.318	4.806.194	5.313.941
	Medio	4.048.691	4.455.991	4.907.013
	Optimista	3.750.064	4.105.787	4.500.085

Un escenario de bajo crecimiento económico y alta penetración del reciclaje generaría el mínimo de residuos esperado al años 2015, correspondiente a 3.750.064 ton al año 2050. Por el contrario, un escenario de alto crecimiento económico y baja penetración del reciclaje generaría el máximo esperado de residuos generados al 2050, 5.313.941 ton por año.



**Figura 2-4: Proyección de residuos año 2050, para los 3 escenarios principales (Elaboración propia)**

Como se aprecia en la figura anterior, los distintos escenarios de proyección también afectan en el poder calorífico ponderado de los RSD. Esto se debe a que, a mayor tasa de reciclaje, menor es la disponibilidad de materiales de alto valor calorífico (exceptuando el vidrio), provocando una reducción en el poder calorífico ponderado total de los RSD. Por ello es que, en teoría, un escenario de alto reciclaje es desfavorable para la implementación de una planta de WTE. Sin embargo, las diferencias observadas son leves, por lo que no existirán implicancias reales en el desarrollo de un proyecto.

## 2.3 Levantamiento y análisis de la situación contractual en la Región Metropolitana

### 2.3.1 Metodología de levantamiento de información

En primera instancia, se utilizó como fuente de información la página web de Mercado Público, con su base de datos de licitaciones históricas<sup>21</sup>. Junto con seleccionar el comprador (“Municipalidad”), se identificaron los contratos utilizando las siguientes palabras claves:

- Recolección de residuos
- Disposición final de residuos
- Transporte de residuos
- Gestión integrada de residuos sólidos

Otra manera de obtener información respecto a la situación contractual fue mediante los sitios de Transparencia Activa de las comunas de la Región Metropolitana. En las categorías de “Compras y contrataciones” o “Actas y resolución” es posible encontrar algunos contratos entre las municipalidades y los proveedores de servicio de recolección, transporte y disposición de residuos. A través del mismo portal, se consideraron adicionalmente las cuentas públicas del periodo 2015 – 2016, lo que permitió el desglose del gasto anual en servicios de aseo comunal.

Finalmente, se solicitó a 37 comunas a través de Transparencia la siguiente información:

- El contrato de recolección, transporte y disposición de residuos sólidos domiciliarios vigente.
- Los gastos mensuales asociados a la disposición final de los residuos sólidos.
- El año de finalización del contrato con la empresa encargada de la disposición final.

Entre el 20 de agosto de 2017, fecha de la solicitud, y el 04 de septiembre del mismo año, se recibieron 14 respuestas<sup>22</sup>. En el caso de las comunas que no respondieron, se utilizó solo la información secundaria disponible.

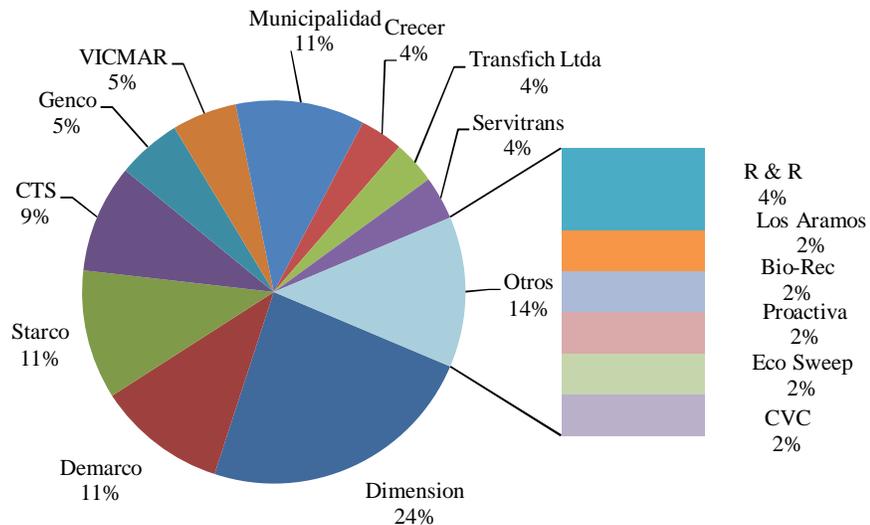
### 2.3.2 Recolección y transporte de residuos sólidos

Actualmente en la Región Metropolitana la recolección y transporte de RSD está a cargo de 15 empresas, cuya participación en el mercado se detalla en la Figura 2-5:

<sup>21</sup> Recuperada el 10.08.2017 desde

<http://www.mercadopublico.cl/Portal/Modules/Site/Busquedas/BuscadorAvanzado.aspx?q=1>,

<sup>22</sup> Comunas que respondieron: Colina, El Bosque, Estación Central, La Cisterna, La Florida, La Granja, Lampa, Lo Espejo, Lo Prado, Ñuñoa, Pedro Aguirre Cerda, Providencia, Til-Til.



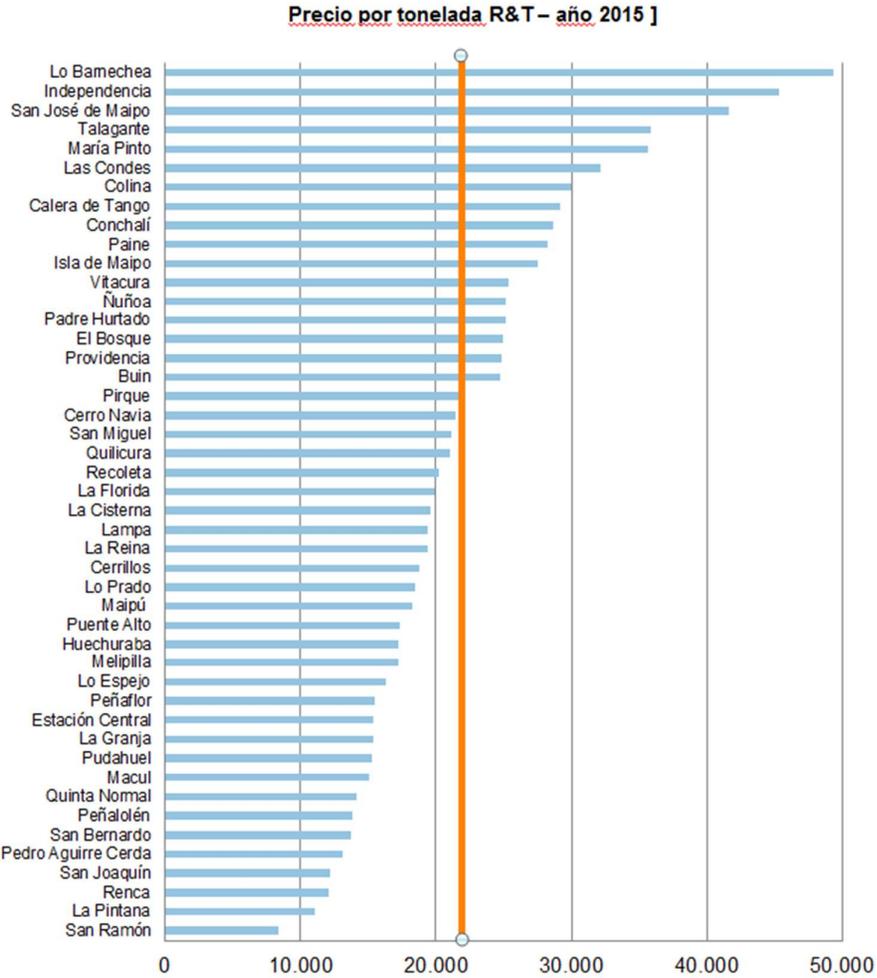
**Figura 2-5: Participación en el mercado de las empresas de recolección y transporte de RSD en la Región Metropolitana (Elaboración propia)**

De acuerdo con la gráfica anterior, el 46% de los contratos han sido adjudicado por dos empresas: Dimensión y Starco-Demarco, esta última perteneciente al consorcio KDM. Secundariamente destaca la empresa CTS, que cuenta con cinco contratos en comunas del sector sur-poniente de la Región Metropolitana. Finalmente, seis son las comunas que realizan el servicio de recolección y transporte con recursos propios.

La mayoría de los contratos involucran un costo mensual fijo, que fluctúa entre los \$16 a \$350 millones de pesos (Ver Figura 2-6) a excepción de los suscritos por Quilicura y Maipú con las empresas Dimensión y Starco-Demarco respectivamente, donde se aplica un costo por tonelada recogida. Por otro lado, la comuna de Maipú se encuentra sectorizada en cuanto a la recolección y el transporte de los RSD, al igual que las comunas de La Reina y La Florida, donde operan dos empresas distintas.

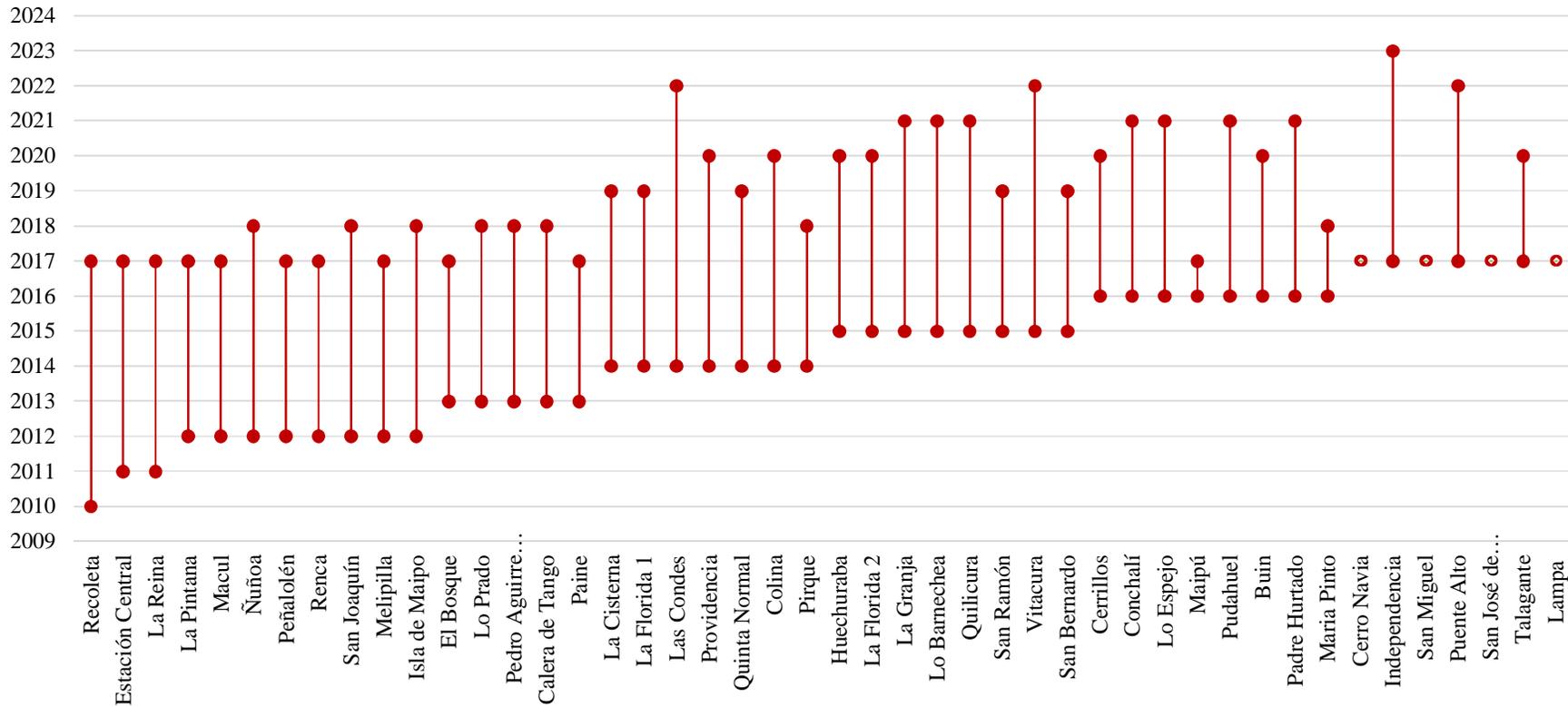
El costo total de los contratos de recolección y transporte está relacionado principalmente con el tonelaje recolectado. La Florida, Puente Alto y Maipú tienen una generación mayor de residuos debido a su alta población, por lo tanto el costo de sus contratos supera los \$300 millones de pesos mensuales. Sin embargo, es necesario señalar que existen otros factores asociados al servicio de recolección y transporte de residuos, que generan distorsiones en la relación entre el costo del contrato y la cantidad de residuos generados, como por ejemplo la extensión territorial de la comuna, el tipo de tecnología de camiones utilizados, las características de los residuos recolectados, aspectos de recolección diferenciada o reciclaje, entre otros.

En cuanto a la extensión de los contratos de recolección y transporte, su duración promedio es de cinco (5) años. Actualmente, cerca del 10% de las comunas mantiene un contrato temporal y prorrogable a la espera de una licitación: Cerro Navia, San Miguel, San José de Maipo y Lampa.



**Figura 2-6: Costo del servicio de recolección y transporte mensual por comunas en la RM, precio en pesos<sup>23</sup> (Elaboración propia)**

<sup>23</sup> Curacaví, Alhue, El Monte, San Pedro, Santiago y Til-Til cuentan con servicio propio de recolección y transporte de residuos, desconociéndose el costo total del mismo

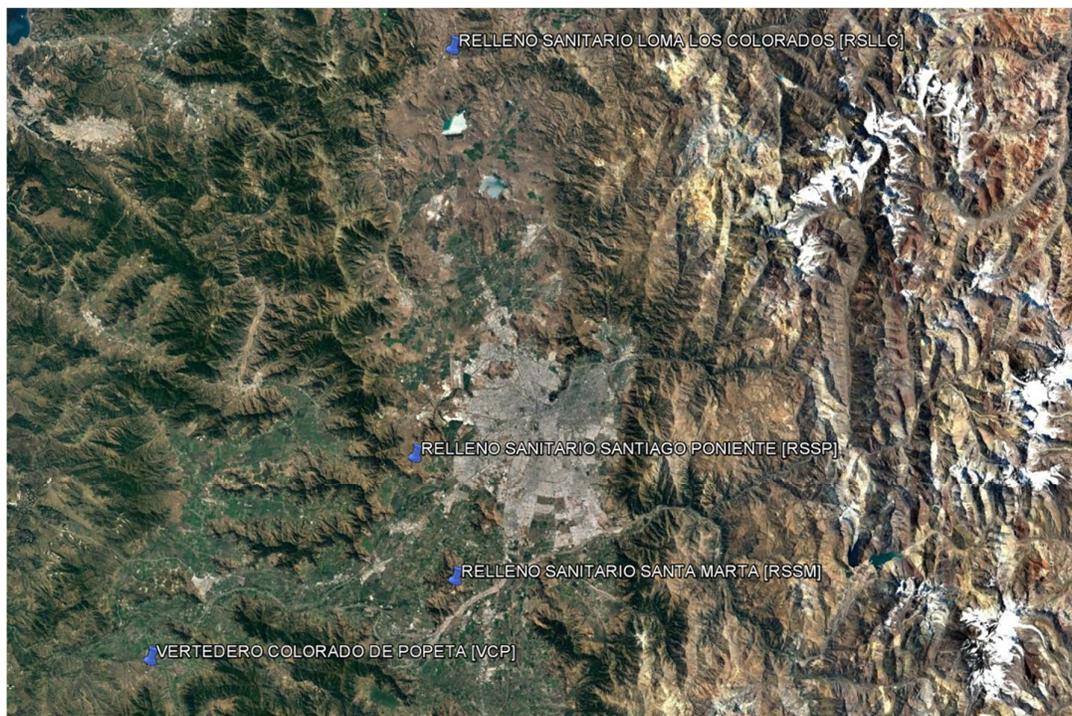


**Figura 2-7: Duración de los contratos de recolección y transporte de RSD en la RM<sup>24</sup> (Elaboración propia en base la situación contractual de los municipios, Anexo D)**

<sup>24</sup> Los municipios que solo cuentan con un punto son aquellos que están en proceso de licitación del servicio de recolección y transporte de residuos

### 2.3.3 Disposición final de residuos sólidos domiciliarios

Los RSD recolectados en la Región Metropolitana son dispuestos regularmente en tres rellenos sanitarios, Santa Marta, Santiago Poniente, Loma los Colorados y un vertedero controlado, Popeta. Dichos lugares de disposición se encuentran concentrados en la zona sur poniente (3) y norponiente (1) de la región (ver Figura 2-8). El Relleno Sanitario Cerro la Leona, en operación desde el año 2013, actualmente recibe los residuos de la comuna de Tiltil.



**Figura 2-8: Localización de los sitios de disposición final en la Región Metropolitana<sup>25</sup>**

A continuación se muestra la información de los lugares de disposición identificados:

**Tabla 2-7: Características de los sitios de disposición final<sup>26</sup>**

Nombre de Instalación	Tipo de Instalación	Comuna	Vida útil prevista	Total Municipal <sup>27</sup> (ton/año) 2015
Santa Marta	Relleno Sanitario	Talagante	2022	1.275.808
Santiago Poniente	Relleno Sanitario	Maipú	2024	224.244
Popeta	Vertedero controlado	Melipilla	Cumplida	50.256
Loma Los Colorados	Relleno Sanitario	Til-Til	2046	1.722.079

<sup>25</sup> Seremi de Medio Ambiente, 2014, *Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la RM*, Santiago, Chile

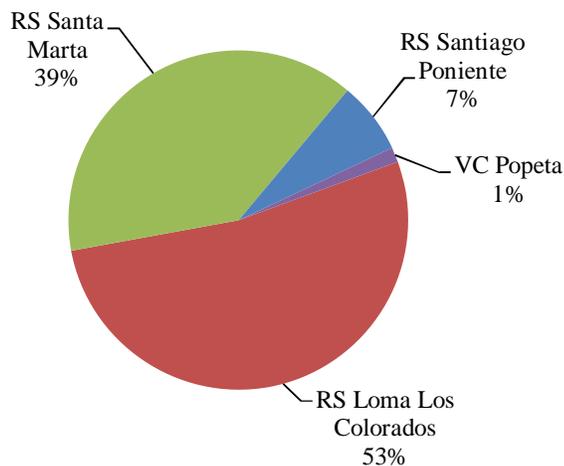
<sup>26</sup> Elaboración propia a partir de estadística de rellenos sanitarios, año 2015

<sup>27</sup> Comprende los residuos sólidos domiciliarios menores a 60 litros de los territorios comunales.

Respecto de la vida útil prevista, en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) se establece un cierto número de años de vida útil a partir del inicio de la operación del relleno, considerando la proyección de generación de residuos y el volumen disponible para la disposición. Un relleno puede solicitar al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) una revisión de este plazo, según la cantidad de residuos reales que haya recepcionado.

El caso del vertedero controlado Popeta es particular dentro de la Región Metropolitana, dado que a pesar de haber cumplido su vida útil, aún continúa en operación. Esto se debe a que no existe otra alternativa más económica para las comunas que disponen sus residuos en este sitio y su cierre significaría declarar una alerta sanitaria en la provincia de Melipilla.

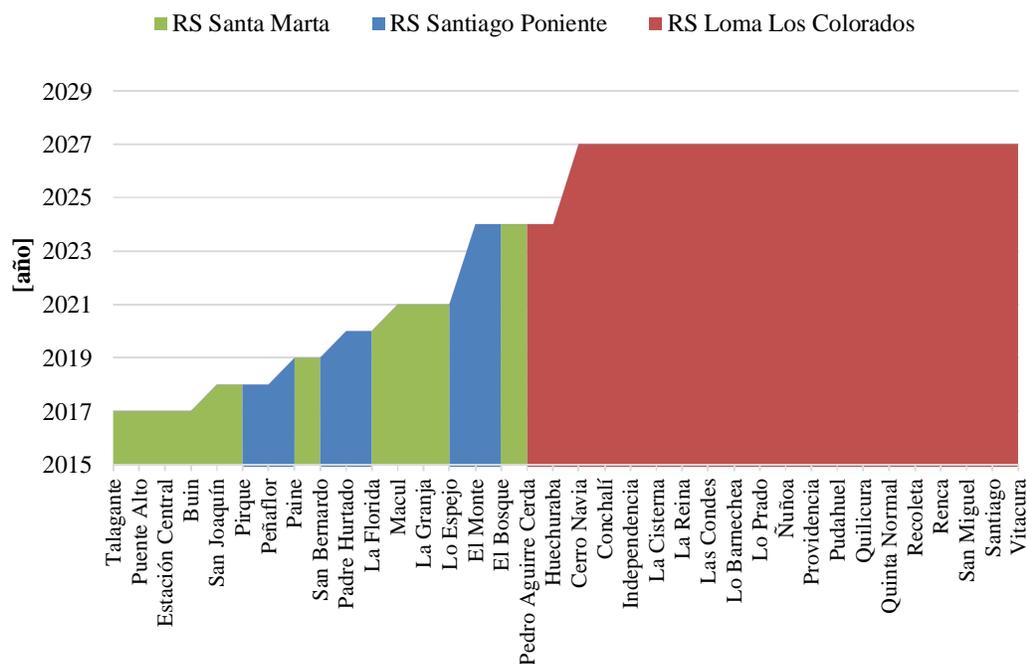
Mediante la cuantificación total de RSD recibida según sitio de disposición, se puede determinar la participación de cada sitio en la disposición total de residuos en la RM (ver Figura 2-9):



**Figura 2-9: Participación de los sitios de disposición en la recepción de residuos en la RM, año 2015 (cantidad)**

**Tabla 2-8: Comunas que disponen en cada sitio de disposición final<sup>28</sup>**

Nombre de Instalación	Comunas que Disponen
Santa Marta	Lo Espejo, San Joaquín, Pirque, Macul, Paine, San José de Maipo, La Granja, Pedro Aguirre Cerda , La Pintana, La Florida, Talagante, Buin, San Bernardo, San Ramón, El Bosque, Estación Central, Calera de Tanto, Puente Alto
Santiago Poniente	Padre Hurtado, Peñalolén, El Monte, Cerrillos, Peñaflor, Isla de Maipo,
Popeta	San Pedro, Alhué, Melipilla, María Pinto
Loma Los Colorados	Recoleta, San Miguel, Independencia, Ñuñoa, Lo Barnechea, Vitacura, Pudahuel, Santiago, Providencia, Quilicura, Las Condes, La Reina, Quinta Normal, Colina, Conchalí, Curacaví, La Cisterna, Lampa, Til Til, Cerro Navia, Huechuraba, Renca, Lo Prado, Maipú



**Figura 2-10: Término de contratos de disposición final<sup>29</sup>, (Elaboración propia)**

<sup>28</sup> Elaboración propia a partir de estadística de rellenos sanitarios, año 2015

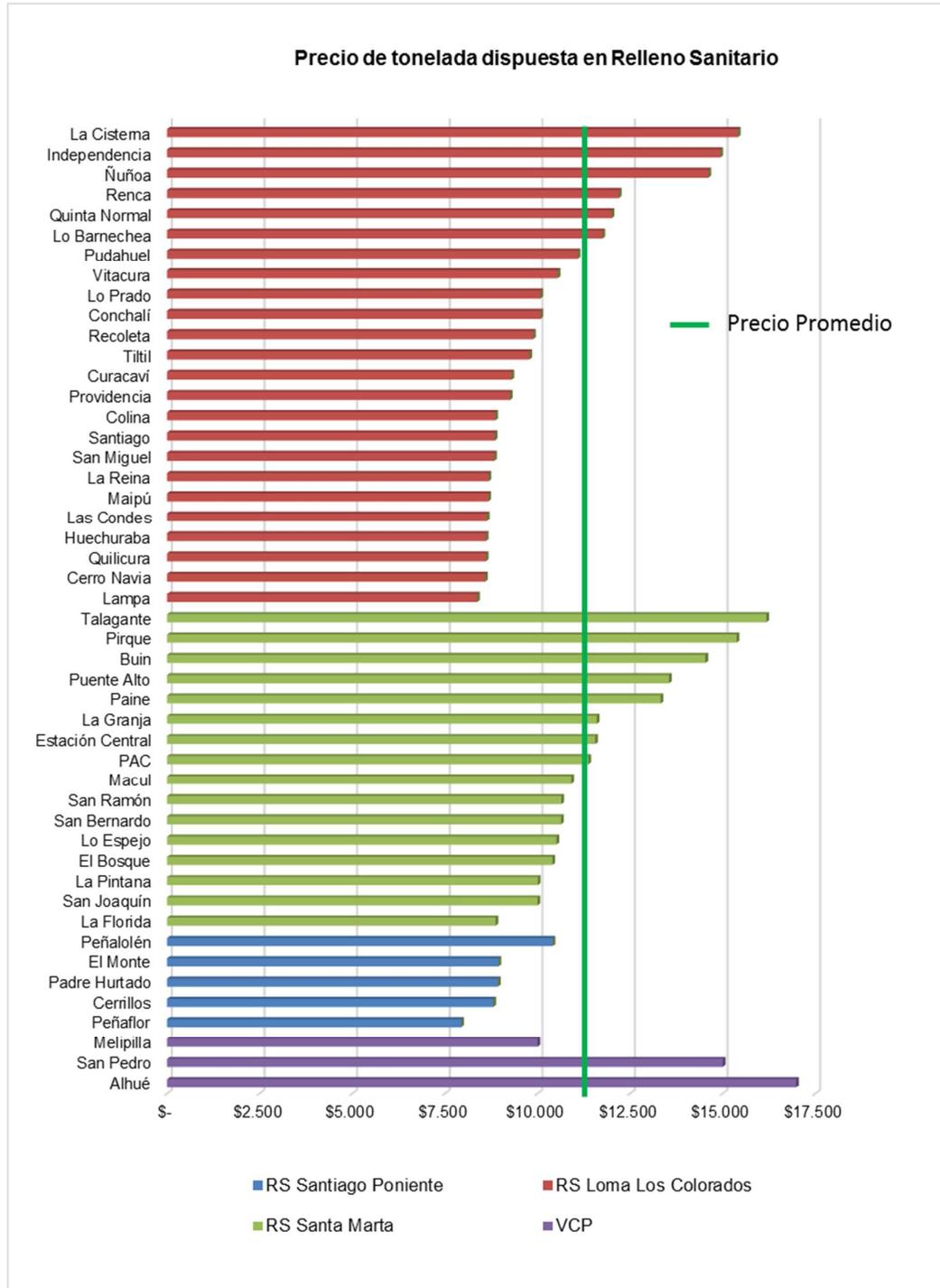
<sup>29</sup> No se cuenta con información referente a los contratos de disposición final para VCP

En la Figura 2-10 se observa el año en que terminan los contratos de disposición de residuos de los municipios con los rellenos sanitarios. El relleno Santa Marta cuenta con vida útil hasta el año 2022, sin embargo, establece contratos hasta el año 2024 con las comunas de El Bosque y Pedro Aguirre Cerda. El relleno Santiago Poniente mantiene contratos hasta el año 2024. Por otra parte, destacan los contratos de 21 municipalidades con el relleno Lomas los Colorados, que se extienden hasta el año 2027.

El caso del relleno Loma los Colorados se debe principalmente a una cláusula en los contratos suscritos por KDM y El Consejo de Alcaldes Cerros de Renca, que permite la renovación automática del contrato de operación del relleno sanitario por periodos de 16 años. En el año 2011 estalló la polémica por este contrato donde 22 municipalidades fueron cuestionadas por no realizar una licitación pública y aceptar esta cláusula. La Fiscalía Nacional Económica impugnó el contrato ante el Tribunal de Defensa de la Libre Competencia por considerar que establece barreras de entradas a un mercado donde KDM tiene 52% de participación. Finalmente, todos los municipios aceptaron la renovación del contrato a excepción de la comuna de Huechuraba, quien re-licitó (de igual forma adjudicó KDM con plazo de contrato hasta el año 2024).

Respecto de los costos de disposición (Figura 2-11), estos generalmente son desglosados en dos conceptos: la disposición intermedia y la disposición final. La disposición intermedia es el pago por la entrada y operaciones en la estación de transferencia donde el precio promedio es de \$2.300 pesos por tonelada de residuos, siendo poco variable de una empresa a otra. Por otro lado, el precio de disposición final es lo costado por el ingreso de los residuos al relleno sanitario, también determinado por tonelada recibida.

El precio más bajo por el concepto de disposición final lo consigue la comuna de Peñaflor, con un valor de \$ 7.940 por tonelada. El valor más alto lo paga Alhué con \$ 16.980 por tonelada. El precio promedio de todas las comunas es de \$ 10.918 por tonelada, lo que equivale aproximadamente a 17 dólares.



**Figura 2-11: Precio tonelada de residuos dispuesta en relleno sanitario<sup>30</sup>, (Elaboración propia)**

<sup>30</sup> No se obtuvo información para las comunas de Isla de Maipo, María Pinto, Calera de Tango y San José de Maipo

**2.4 Efecto de las políticas e iniciativas de reciclaje en la generación de residuos en la RM**

**2.4.1 Alcances y proyección de efectos de la ley REP**

**2.4.1.1 Descripción general de la ley**

El 17 de mayo de 2016 se promulgó la Ley Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley N° 20.920), la cual establece una serie de instrumentos siendo uno de los principales y más relevante para este estudio, la Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Este principio obliga a los productores de ciertos productos a organizar y financiar la gestión de los residuos que generan en el mercado.

Este marco legislativo busca disminuir la generación de residuos, fomentar su reutilización, reciclaje o valoración, disminuyendo significativamente la disposición final en vertederos o rellenos sanitarios. El modelo anteriormente descrito se basa en la estrategia de jerarquía en el manejo de residuos (ver Figura 2-12 ), donde la valorización energética es considerada una alternativa viable dentro de la aplicación de la ley y el manejo actual de residuos.

El Ministerio del Medio Ambiente es el encargado de establecer los productos prioritarios y metas de reciclaje o valorización de residuos. Los productos prioritarios se eligen por aspectos vinculados a su cantidad, tamaño, toxicidad y factibilidad de valorización. En esta primera etapa son: aceites lubricantes, aparatos eléctricos y electrónicos, baterías, pilas, neumáticos, envases y embalajes.



**Figura 2-12: Estrategia jerarquizada en el manejo de residuos**

Actualmente la Ley atraviesa una fase de implementación donde los productores tienen la obligación de declarar el volumen generado para los productos prioritarios, estos son: aceites lubricantes, aparatos eléctricos y electrónicos, baterías, pilas, neumáticos, envases y embalajes, diarios, periódicos y revistas<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Diarios, periódicos y revistas productos prioritarios exentos de cumplir metas de reciclaje, no obstante sus volúmenes de generación deben ser declarados.

En cuanto a la tramitación legislativa, la ley cuenta con 3 reglamentos<sup>32</sup> a espera de la ratificación de Contraloría General de la Republica para su promulgación. Uno de ellos corresponde al Reglamento de Procedimiento, el cual establecerá el procedimiento para la elaboración de los decretos supremos que definirán los instrumentos de prevención y valorización de residuos, así como las metas de recolección y valorización de los productos prioritarios, por ende, su retraso pone en riesgo la entrada en vigencia de la ley.

#### 2.4.1.2 Alcances para efectos del estudio

Para efectos del presente estudio, se estimará el posible impacto de la aplicación de la ley en la categoría de Envases y Embalajes (EyE), que es la que posee mayor vinculación con los residuos municipales de tipo domiciliario y comercial. En particular, se analizará como la aplicación de esta ley en otros países ha producido una disminución en la disposición final de Envases y Embalajes, con foco en las sub-categorías de mayor valor energético indicadas en la siguiente tabla:

**Tabla 2-9: Categoría y sub-categorías de Envases y Embalajes<sup>33</sup>**

Sub-Categoría	Sub-Sub-categoría	Poder calorífico [MJ/kg] <sup>34</sup>
Metales	Aluminio, hojalatería	1,73
Plásticos	PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, Otros	26,62 <sup>35</sup>
Vidrio	Retornable reutilizable y de un solo uso	0,24
Cartón	N/A	16,25
Papel	N/A	16,06
Cartón para bebidas	N/A	15,28
Madera	N/A	16,7

#### 2.4.1.3 Análisis internacional sobre efectos de la ley REP

La implementación de acciones de responsabilidad extendida del productor comenzó en Europa a principios de los 90<sup>36</sup>. Desde esa fecha a la actualidad, las tasas de reciclaje

<sup>32</sup> Reglamento de Procedimiento de la Ley de Reciclaje, Reglamento del Fondo para el Reciclaje y Reglamento que Regula el Movimiento Transfronterizo de Residuos.

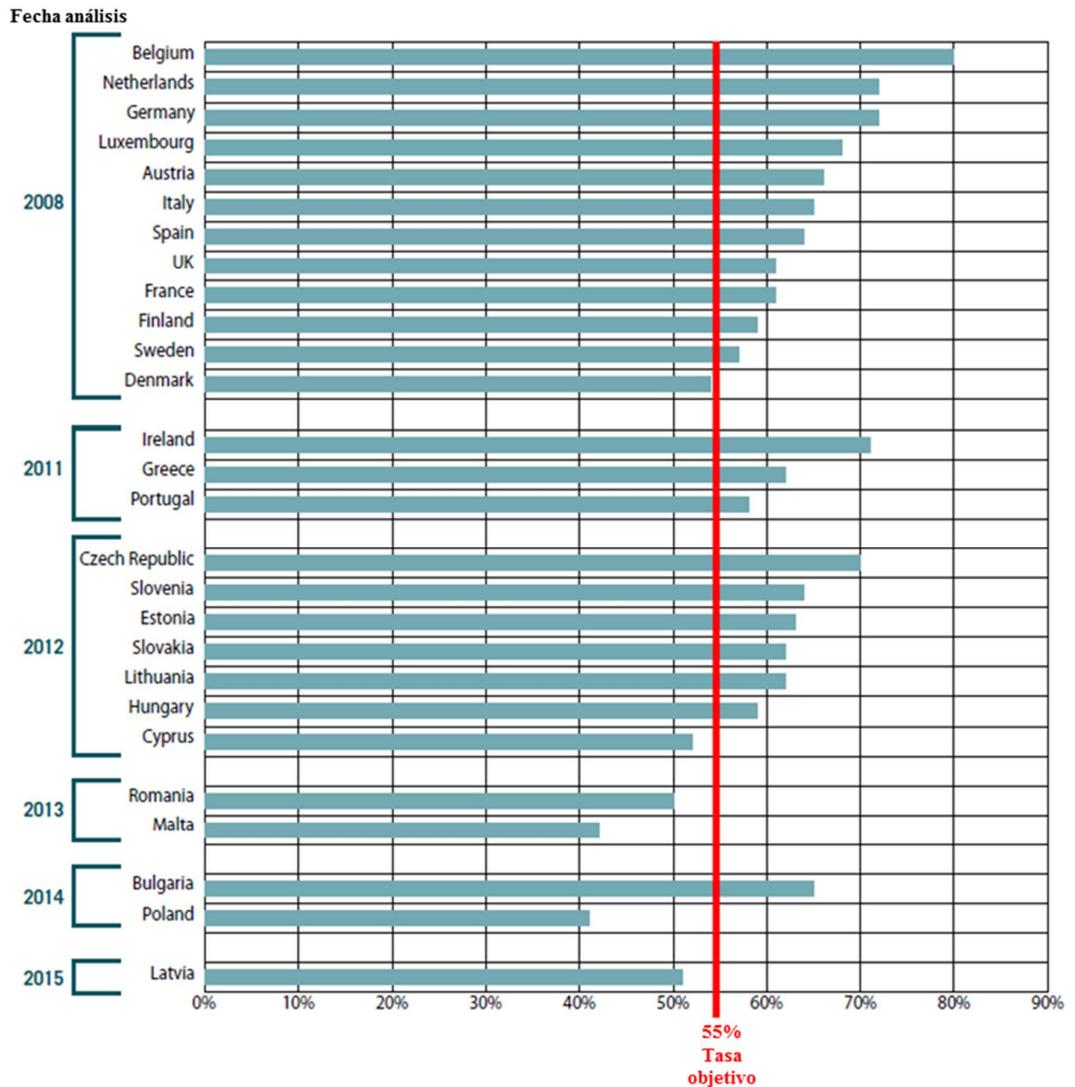
<sup>33</sup> Ministerio de Medio Ambiente, 2017, Formulario REP Envases y embalajes, Santiago, Chile

<sup>34</sup> Elaboración propia en base a cálculos presentados en Tabla 2-5

<sup>35</sup> Valor promedio para distintos tipo de plásticos

prácticamente se han cuadruplicado<sup>37</sup>. Por ejemplo en Francia, la tasa de reciclaje de Envases y Embalajes era de un 18% en 1992, y actualmente alcanza un 68%<sup>38</sup>.

Para el año 2011, la tasa de reciclaje objetivo para Envases y Embalajes en Europa fue de 55%, siendo alcanzada por la mayoría de los países incluso con anterioridad a esa fecha, tal como se indica en la siguiente figura.



**Figura 2-13: Tasas de reciclaje EyE alcanzada por países miembros UE, fuente: EUROPEN, 2014**

Si se analizan las distintas sub-categorías que componen los Envases y Embalajes, las tasas de reciclaje alcanzadas son distintas, incluso muchos países definen metas diferenciadas. Bélgica, por ejemplo, al año 2004 había definido una meta de 60% para

<sup>36</sup> La directiva 94/62/EC fue una de las primeras iniciativas consensuadas a nivel europeo.

<sup>37</sup> EUROPEN, 2014, *Packaging and Packaging Waste Statics 2998-2011*, Bruselas, Bélgica

<sup>38</sup> De los Llanos, C., 2017, *El sistema EPR para envases y embalajes en Francia*, Bogotá, Colombia

vidrios, papel, cartón y cartón para bebidas, de 50% para metales, de 30% para plásticos y de 15% para madera<sup>39</sup>.

En España, que representa un caso superior al promedio de Europa, se alcanzan rangos de reciclaje de entre un 60% y 75% para vidrio, metal, papel y cartón. Para plásticos alcanza cerca de un 40%, pero este porcentaje incluye los residuos industriales y comerciales que son típicamente de mejor calidad<sup>40</sup>.

A continuación, se presentan estadísticas de porcentaje de reciclaje de distintos países de la UE para las subcategorías de mayor valor energético: papel y cartón, madera y plásticos<sup>41</sup>.

Ítem	Alemania	España	Francia	Italia	Suecia	Reino Unido
Residuo generado (kg)	7.148.400	3.625.270	4.471.656	4.619.000	686.000	3.801.000
Generación PCC (kg/hab año)	86,84	81,51	70,54	78,11	75,27	62,50
Reciclaje (kg)	5.735.900	2.200.494	3.979.959	3.281.000	504.000	3.014.256
Reciclaje (%)	80%	61%	89%	70%	73%	79%
Valorización energética (kg)	1.298.480	177.158	354.599	376.000	0	286.262
Valorización energética (%)	18%	5%	8%	8%	0%	8%
Residuo no recuperado (%)	2%	34%	3%	22%	27%	13%

**Figura 2-14: Recuperación y reciclaje de sub-categorías papel y cartón en Europa<sup>42</sup>**

Ítem	Alemania	España	Francia	Italia	Suecia	Reino Unido
Residuo generado (kg)	2.620.100	943.657	2.387.966	2.860.000	300.790	1.192.000
Generación PCC (kg/hab año)	31,83	21,22	37,67	48,37	33,01	19,60
Reciclaje (kg)	790.000	575.286	500.000	1.539.000	50.000	911.617
Reciclaje (%)	30%	61%	21%	54%	17%	76%
Valorización energética (kg)	1.758.091	57.393	290.004	199.600	250.000	0
Valorización energética (%)	67%	6%	12%	7%	83%	0%
Residuo no recuperado (%)	3%	33%	67%	39%	0%	24%

**Figura 2-15: Recuperación y reciclaje de sub-categoría madera en Europa**

Ítem	Alemania	España	Francia	Italia	Suecia	Reino Unido
Residuo generado (kg)	2.643.800	1.679.000	2.113.930	2.270.000	191.316	2.121.000
Generación PCC (kg/hab año)	32,12	37,75	33,35	38,39	20,99	34,88
Reciclaje (kg)	1.129.400	391.553	445.900	642.000	79.803	476.567
Reciclaje (%)	43%	23%	21%	28%	42%	22%
Valorización energética (kg)	1.390.157	248.000	683.109	687.000	69.937	190.841
Valorización energética (%)	53%	15%	32%	30%	37%	9%
Residuo no recuperado (%)	5%	62%	47%	41%	22%	69%

**Figura 2-16: Recuperación y reciclaje de sub-categoría plástico en Europa**

<sup>39</sup> Claus S., 2017, *Successful PRO's in OECD countries*, Bogotá, Colombia

<sup>40</sup> Eurostat, recuperado el 27.10.2017 desde <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste>

<sup>41</sup> CyV Medioambiente, 2010, *Diagnóstico producción, importación y distribución de envases y embalajes y el manejo de los residuos de envases y embalajes*, Santiago, Chile

<sup>42</sup> Figuras 2-12 a 2-14 referencia Eurostat, Packaging Waste, Data 2007

## 2.4.2 Análisis de iniciativas de reciclaje en la RM

### 2.4.2.1 Iniciativas en ejecución en la Región Metropolitana

A nivel nacional operan dos instrumentos de gestión para impulsar el reciclaje, estos son: la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos (2005), y la Ley N° 20.920 sobre la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (2016). Estas promueven la Estrategia Jerarquizada en el Manejo de Residuos, marco donde la valorización energética es considerada una mejor alternativa de manejo de residuos que la disposición en rellenos sanitarios.

Por su parte, la materialización de estos instrumentos opera a nivel de región e incluso a nivel comunal. Un ejemplo claro de lo anterior es la iniciativa Santiago Recicla lidera por la SEREMI de Medio Ambiente. Esta iniciativa se compone de tres líneas de acción:

- Establecer sistemas de recolección segregada de residuos y centros de valorización de residuos para su reciclaje e implementación de infraestructura distribuida de manera estratégica en el territorio regional.
- Promover la participación de los recicladores de base y la formalización de su actividad.
- Educar y sensibilizar a la ciudadanía para disminuir la generación de residuos y fomentar una participación activa en el proceso del reciclaje.

Actualmente se está materializando el primer eje de trabajo con la construcción de la red de puntos limpios.

**Plan de Acción Santiago Recicla:** Esta iniciativa propone la construcción y operación de un nuevo modelo de gestión de residuos sólidos, en ella cada actor cumple un rol clave, vinculando a representantes de diversos sectores de la sociedad: servicios públicos, municipios, recicladores de base, empresas y ONGs.

**Red de Reciclaje de la Región Metropolitana:** En el marco del programa Santiago Recicla, se busca ampliar la red de reciclaje con 24 nuevos Puntos Limpios.

**Iniciativa Regional de Reciclaje Inclusivo:** La Iniciativa Regional para el Reciclaje Inclusivo (IRR) surge con el objetivo de mejorar el acceso de los recicladores al mercado formal de reciclaje en América Latina y el Caribe.

**Proyecto Reciclaje Inclusivo Comunal:** Construcción de Modelos comunales de Reciclaje inclusivo, donde los recicladores de base sean incorporados formalmente en la gestión de residuos municipales y en la cadena de valor del reciclaje.

En términos de cómo los programas de reciclaje vigentes en la RM influyen en la generación de RSD, no existe una contabilidad o meta oficial en cuanto a alcanzar una tasa de reducción deseable. En el informe ejecutivo del plan de acción Santiago Recicla se señala que la “meta principal es Lograr Reciclar un 25% de los residuos sólidos asimilables a domiciliarios en la Región Metropolitana al año 2020”<sup>43</sup>.

En el Anexo B se listan las principales iniciativas de reciclaje en la región, indicando su alcance, cobertura, fecha de implementación y estado actual.

---

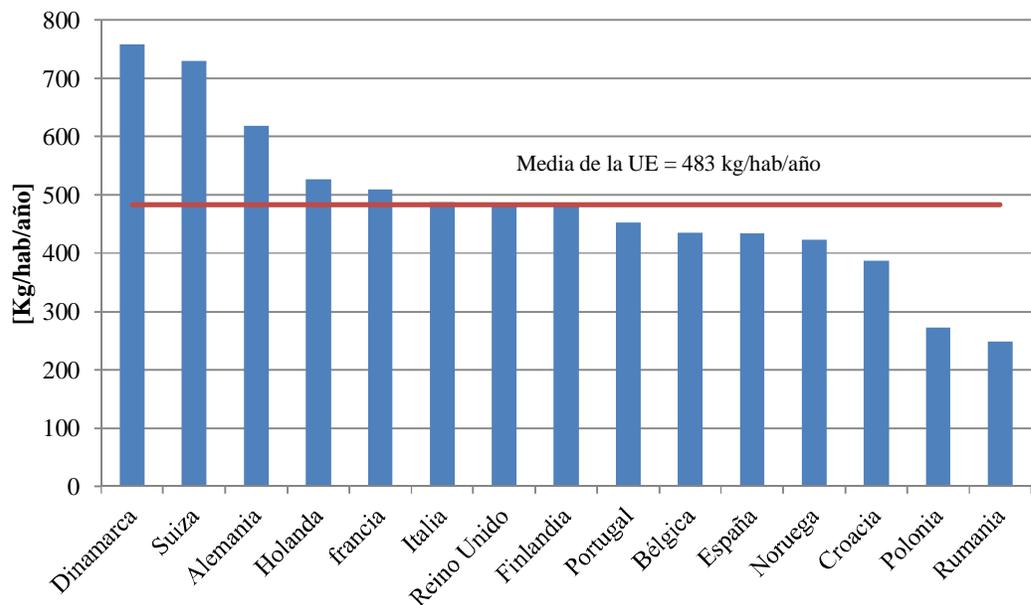
<sup>43</sup> Ingeniería Alemana, 2011, *Estudio de factibilidad técnico ambiental, social y económica para la implementación del plan de acción “Santiago recicla”*, Santiago, Chile

**2.4.2.2 Análisis internacional sobre reciclaje a nivel municipal**

El análisis contextual de Chile contra otros países desarrollados se justifica en el supuesto de que existe una tendencia a lograr resultados de largo plazo similares a éstos y las evidentes diferencias actuales que se deben subsanar bajo un marco regulatorio con objetivos similares.

Chile está situado como un país con un nivel desarrollo relevante dentro de la región Latinoamericana, pero notablemente rezagado dentro de la OECD, de la cual es parte, por ello, se hace pertinente considerar como *benchmark* a países del bloque, pero que presentan un cumplimiento de metas muy dispar dentro del contexto Europeo.

En cuanto a la cantidad de residuos de origen municipal generados, el promedio en Europa es cercano a los 480 kg/hab/año, casi un 50% superior a los 320 kg/hab/año generados por la Región Metropolitana.

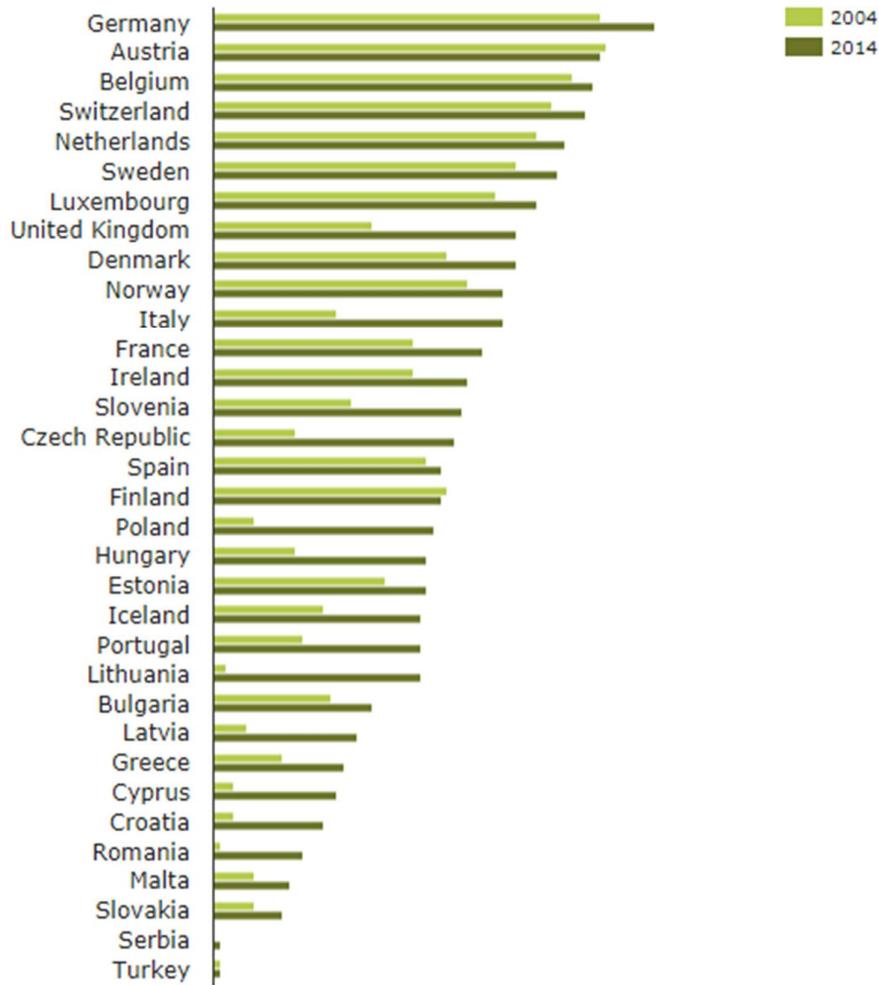


**Figura 2-17: Cantidad de residuos per cápita en Europa el año 2015 [kg/ha/año]<sup>44</sup>**

En cuanto a las tasas de reciclaje alcanzadas en cada país (considerando el total de los residuos municipales), se ha alcanzado en el año 2014 un porcentaje promedio de 33%, superior al 23% alcanzado al año 2004.

La siguiente figura, muestra el detalle para algunos países europeos:

<sup>44</sup> European Environment Agency. recuperado el 27.10.2017 desde <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste/municipal-waste-management-across-european-countries>



**Figura 2-18: Tasa de reciclaje de residuos municipales en Europa entre los años 2004 y 2014<sup>45</sup>**

Se observa de la figura anterior que los países con bajas tasas de reciclaje al 2004 han incrementado significativamente sus valores al 2014, por lo que se aprecia un efecto positivo de la aplicación de las políticas de reciclaje. Una de las iniciativas con mejores resultados ha sido la vinculada al esquema de cobros por disposición al usuario final.

<sup>45</sup> European Environment Agency. recuperado el 27.10.2017 desde <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste/municipal-waste-management-across-european-countries>

### 2.4.3 Definición de escenarios de reciclaje para el estudio

En base a la información de los capítulos precedentes, se puede observar que actualmente en Chile las iniciativas de reciclaje son limitadas, tanto en alcance como en impacto real sobre la disposición de residuos. Al año 2017, la Región Metropolitana posee a escala municipal un nivel de reciclaje bajo, sin embargo, hay un número importante de iniciativas que pretenden cambiar este escenario (ver anexo B). Además, con la entrada en vigencia de la ley REP se espera alcanzar trayectorias en las tasas de reutilización y reciclaje similares a las de los países OCDE que ya han implementado esta ley con larga data.

En primer lugar, se proyecta un aumento en la cantidad de residuos generados, pasando de 0,88 kg/hab/día en 2015 a 1,12 kg/hab/día al 2050. Este valor es similar a países europeos como España y Bélgica. En cuanto al reciclaje, se considerará que los efectos impactarán principalmente en la categoría de envases y embalajes, siguiendo una tendencia similar a la de los países europeos.

Se proyecta, por ende, un escenario de reducción al 2050 de un 60% sobre el total de residuos reciclables valorables (a excepción del plástico, debido a que, a pesar de ser un residuo valorizable, posee mucho volumen en relación a su peso, forzando a una logística de recolección más compleja). Además, se considera como supuesto que la composición orgánica de los RSD se mantiene constante en cantidad, y solo varía porcentualmente debido al aumento de la producción per cápita de residuos.

Las cuotas de reciclaje de materiales como vidrio, papel, metales, aluminio alcanzan rangos de 80 a 90%, las cuales parecen ser la cuota máxima alcanzable considerando que Alemania es uno de los países que más recicla dentro de Europa, por lo que el escenario optimista se fija en 90%. El escenario pesimista se fija en 30%, siendo comparable con países europeos con bajas tasas de reciclaje como Polonia<sup>46</sup>. Para el caso de los plásticos, se proyecta un escenario medio de 10%, un optimista de 15% y un pesimista del 5%.

De esta forma, se tiene para los RSD residenciales, la siguiente composición esperada al año 2050:

**Tabla 2-10: Variación en la composición de RSD residencial para el año 2050**

Componente	2015 <sup>47</sup>	2050	Componente	2015	2050
Orgánicos	57,24%	44,8%	Vidrio	3,25%	4,2%
Papel	8,25%	10,7%	Inertes	2,61%	3,4%
Cartón	3,12%	4,0%	Tetra Pack	0,58%	0,7%
Plásticos	10,93%	14,1%	Especiales	1,07%	1,4%
Metales	1,07%	1,4%	Otros	11,84%	15,3%

Con esta información, es posible estimar el porcentaje neto de residuos valorables reciclados y los que aún quedarían disponibles al 2050 (cuyo poder calorífico debe ser considerado para efectos de la planificación de la planta WTE).

<sup>46</sup> Environmental protection Agency, 2013, CSO pg. 562

<sup>47</sup> Considerado como año base del estudio

**Tabla 2-11: Porcentaje de residuos reciclados al 2050 para los distintos escenarios**

Residuos valorables							
Escenario		Porcentaje reciclado			Aún disponible al 2050		
		Pesimista	Medio	Optimista	Pesimista	Medio	Optimista
		30%	60%	90%	30%	60%	90%
Vidrio	<b>4,2%</b>	1,3%	2,5%	3,8%	2,9%	1,7%	0,4%
Cartón	<b>4,0%</b>	1,2%	2,4%	3,6%	2,8%	1,6%	0,4%
Papel	<b>10,7%</b>	3,2%	6,4%	9,6%	7,5%	4,3%	1,1%
Metales	<b>1,4%</b>	0,4%	0,8%	1,2%	1,0%	0,6%	0,1%
Plásticos <sup>48</sup>	<b>14,1%</b>	0,7%	1,4%	2,1%	13,4%	12,7%	12,0%
<b>Totales</b>		<b>6,8%</b>	<b>13,6%</b>	<b>20,4%</b>	<b>27,6%</b>	<b>20,8%</b>	<b>14,0%</b>

Se concluye de esta forma, que en un escenario donde se espera alcanzar niveles de reciclaje del 30% de los residuos reciclables valorizables, estos representan solo un 6,8% del total de RSD generados a nivel residencial.

En un escenario medio, donde se espera alcanzar niveles de reciclaje del 60% de los residuos reciclables valorizables, los RSD se reducen en un 13,6%.

Finalmente, en un escenario optimista donde se espera alcanzar niveles de reciclaje de los residuos reciclables valorizables del 90%, los RSD residenciales se reducen en un 20,4%.

En cuanto al poder calorífico medio asociado a los distintos escenarios de reciclaje se puede concluir lo siguiente:

- En el caso de un escenario pesimista, el poder calorífico aumenta con el tiempo a una tasa aproximada del 0,4% anual.
- En el caso de un escenario medio, el poder calorífico aumenta con el tiempo a una tasa aproximada del 0,1% anual.
- En el caso de un escenario optimista, el poder calorífico disminuye con el tiempo a una tasa aproximada del 0,25% anual.

<sup>48</sup> Para los plásticos se considera un reciclaje pesimista, medio y optimista de 5, 10 y 15% respectivamente.

## 2.5 Levantamiento y análisis de información sobre rellenos sanitarios de la Región Metropolitana<sup>49</sup>

En la Región Metropolitana existen cuatro rellenos sanitarios y un vertedero controlado.

El principal relleno es Loma Los Colorados, cuyo dueño es KDM S.A. Este recibe residuos provenientes de 23 comunas en Santiago. La planta, ubicada en Til Til, inició sus operaciones en el año 1996.

Otro de los rellenos es Santa Marta, propiedad del consorcio con el mismo nombre. Éste se encuentra en la comuna de Talagante y fue inaugurado en el año 2002. Actualmente recibe la basura de 18 comunas de la Región Metropolitana.

Por su parte, la empresa Veolia (ex -Proactiva) es dueña del Relleno Santiago Poniente, ubicado en Maipú. Inaugurado en 2001, recibe la basura de 6 comunas del área metropolitana.

El cuarto relleno sanitario en la capital es Cerro La Leona, inaugurado el año 2013, ubicado en Tiltil y perteneciente a la empresa Gersa. Este recibe principalmente residuos sólidos industriales asimilables. Además, recibe los residuos domiciliarios de la comuna de Tiltil.

Finalmente, se debe considerar el vertedero controlado Popeta, que corresponde al sitio de disposición final de residuos de las comunas de Melipilla, San Pedro, María Pinto y Alhué.

A continuación se presentan las fichas descriptivas de cada uno de los rellenos sanitarios y el vertedero localizado en la Región Metropolitana, así como sus correspondientes resoluciones de calificación ambiental.

La información presentada a continuación utiliza como base el documento *Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la Región Metropolitana*, actualizado con información de la minuta de infraestructura sanitaria para el manejo de RSD en la Región Metropolitana, del Ministerio del Medio Ambiente, en abril de 2017<sup>50</sup>.

---

<sup>49</sup> Seremi del Medio Ambiente, 2014, *Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la RM*, Santiago, Chile

<sup>50</sup> Información provista por el Ministerio de Medio Ambiente en reunión del 09.08.2017

### 2.5.1 Relleno Sanitario Loma Los Colorados

**Tabla 2-12: Ficha técnica Relleno Sanitario Loma Los Colorados**

Característica	Detalle
Propietario	KDM S.A.
Ubicación	Fundo Las Bateas, kilómetro 63.5 de la Ruta 5 Norte, Til Til.
EIA	“Construcción de Sistema de Tratamiento Intermedio y Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos para la Región Metropolitana” RCA N° 990/1996, que calificó ambientalmente favorable el proyecto.
Promedio Tasa de ingreso de residuos	154.307 (ton/mes), año 2015
Vida útil	50 años (hasta 2046), según Proyecto de Ingeniería, aprobado mediante Resolución del ex SESMA N° 9979/96
Superficie del predio del proyecto	800 hectáreas aproximadamente.
Sistema de impermeabilización	Sistema compuesto por capa de arcilla; Geomembrana de HDPE de 1.5 mm; Geotextiles y sistemas drenantes.
Planta de Tratamiento de Lixiviados	700 (m <sup>3</sup> /día) 2014. Su efluente debe dar cumplimiento al D.S. N° 609/98 del MOP “Norma de Emisión Para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado” de acuerdo a la RCA N° 060/2006
Generación de Biogás	9.500 (m <sup>3</sup> /h) 2014

**Tabla 2-13: Resoluciones de Calificación Ambiental de KDM S.A. (favorables)**

RCA	Nombre Proyecto
990/1995	Construcción de Sistema de Tratamiento Interno y Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos para la Región Metropolitana
060/2005	Mejora al sistema de tratamiento RILES Relleno Sanitario Loma Los Colorados y desarrollo alternativa del tratamiento terciario
391/2006	Ampliación del sistema de abatimiento de biogás; sistema de captación, termo-degradación y utilización energética, en el marco del mecanismo para un desarrollo limpio, en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados
262/2008	Planta de Compostaje de Residuos orgánicos KDM S.A.
263/2008	Cancha de secado y mono-relleno de lodos en Loma Los Colorados
706/2008	Planta Recuperadora de Reciclables Relleno Sanitario Loma Los Colorados
344/2010	Central Loma Los Colorados

### 2.5.2 Relleno Sanitario Santa Marta

**Tabla 2-14: Ficha técnica Relleno Sanitario Santa Marta**

Característica	Detalle
Propietario	Consortio Santa Marta S.A.
Ubicación	Predio Rústico Santa Elena de Lonquén s/n°, Talagante.
EIA	“Relleno Sanitario Santa Marta”. RCA N° 433/01, que calificó ambientalmente favorable el proyecto.
Promedio Tasa de ingreso de residuos	129.589 (ton/mes), año 2015
Vida útil	20 años ( hasta 2022), considerando N° 3.2 de RCA 433/01; hasta el año 2035 según RCA N° 076/2012 que calificó el proyecto “Ajuste de Tasa de Ingreso de Residuos y Modificación de Capacidad de Recepción”
Superficie zona depósito de residuos	77 hectáreas.
Sistema de impermeabilización	Suelo natural perfilado compactado; Bentonita (G.C.L.); HDPE 1.5 mm; Geomalla polimérica de drenaje; Geotextil; Carpeta operativa
Planta de Tratamiento de Lixiviados	Operativa procesando del orden de 437 m <sup>3</sup> /mes de percolados
Generación de Biogás	7.898 (m <sup>3</sup> N/hora) ; a partir del mes de agosto de 2013, la operación de la central de generación eléctrica en base a biogás del RSSM

**Tabla 2-15: Resoluciones de Calificación Ambiental Consortio Santa Marta S.A. (favorables)**

RCA	Nombre del Proyecto
433/2001	Relleno Sanitario Santa Marta
212/2001	Estación de Transferencia Puerta Sur
417/2005	Plan de Manejo Hídrico y Manejo de Suelos del Área de Disposición del Efluente
5009/2005	Manejo de Biogás del Relleno Sanitario Santa Marta
1025/2009	Implementación de Acceso Definitivo
1024/2009	Plan de Seguimiento, Mitigación y/o Reparación Ambiental
966/2009	Ampliación Sistema de Manejo de Biogás del Relleno Sanitario Santa Marta
982/2008	Planta de Separación Fracción Inorgánica de Residuos
069/2010	Extensión de Plazo del Sistema de Tratamiento Terciario
076/2012	Ajuste de Tasa de Ingreso de Residuos y Modificación de Capacidad de Recepción
529/2011	Central ERNC Santa Marta
408/2013	Modificación de Tramo Subterráneo y Conexión al Sistema Interconectado Central

### 2.5.3 Relleno Sanitario Santiago Poniente

**Tabla 2-16: Ficha técnica Relleno Sanitario Santiago Poniente**

Característica	Detalle
Propietario	Proactiva Servicios Urbanos S.A.
Ubicación	Fundo La Ovejería s/n°, Rinconada Lo Vial, Maipú.
EIA	“Relleno Sanitario Santiago Poniente”. RCA N° 479/01, que calificó ambientalmente favorable el proyecto
Promedio Tasa de ingreso de residuos	37.084 (ton/mes), año 2015
Vida útil	22 años (hasta 2024), considerando N° 3.3 de la RCA N° 479/01.
Superficie zona depósito de residuos	67 hectáreas, distribuidas en dos zonas, Alvéolo N° 1 de 15 hectáreas. En etapa de cierre y Alvéolo N° 2 (subdividido en 7 subetapas).
Sistema de impermeabilización	Ajustado al D.S 189/05 “Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios”, aprobado a través de la RCA N° 413/09.
Planta de Tratamiento de Lixiviados	No operativa a la fecha.
Planta de Biogás	Operativa (3000 m <sup>3</sup> /h)

**Tabla 2-17: Resoluciones de Calificación Ambiental Proactiva Servicios Urbanos S.A. (favorables)**

RCA	Nombre Proyecto
479/2001	Relleno Sanitario Santiago Poniente”
206/2003	“Incorporación de Sistema Integral de Manejo de Líquidos Lixiviados y Biogás – Construcción y Operación Planta de Tratamiento de Lixiviados”
059/2005	“Adaptación del Sistema de Manejo de Lixiviados”
001/2007	“Modificación de Tecnología Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Santiago Poniente 057”
266/2008	“Captura y Quema de Biogás del Relleno Sanitario Santiago Poniente”.
413/2009	“Adecuación del Sistema de Impermeabilización del Relleno Sanitario Santiago Poniente, al D.S. 189/05 del MINSAL”,

## 2.5.4 Relleno Sanitario Cerros La Leona

**Tabla 2-18: Ficha técnica Relleno Sanitario Cerros La Leona**

Característica	Detalle
Propietario	Gestión Ecológica de Residuos S.A
Ubicación	Comuna de Til Til, aproximadamente a 3.5 kilómetros al Oriente de la Carretera Panamericana Norte a la altura del kilómetro 52.
EIA	“Planta de Tratamiento Integral de Residuos Sólidos Cerros la Leona”. RCA N° 516/02 que calificó ambientalmente favorable el proyecto.
Promedio Tasa de ingreso de residuos	15.000 (ton/mes), año 2015
Superficie zona depósito de residuos	Capacidad de residuos primera etapa correspondiente a 500.000 [m <sup>3</sup> ]
Vida útil	37 años (hasta 2050)
Tasa autorizada de recepción de residuos	45.000 (ton/mes)
Sistema de impermeabilización, basal y de talud	Capa de arcilla de 50 cm. de espesor con un coeficiente de permeabilidad de 10 <sup>-7</sup> cm/s, por sobre la cual deberá disponerse una impermeabilización de HDPE de 1,5 cm. de espesor, geomembrana para el drenaje y geomalla que evita posible punzonamiento.
Planta de Tratamiento de Lixiviados	Sin información.
Planta de Quema de Biogás	A la fecha se realiza extracción pasiva de biogás conforme a lo informado por el titular.

**Tabla 2-19: Resoluciones de Calificación Ambiental Gersa S.A. (favorables)**

RCA	Nombre proyecto
168/2002	Planta de Tratamiento Integral de Residuos Sólidos Cerro La Leona
516/2002	Estación de Transferencia de Residuos Sólidos Santiago Sur

### 2.5.5 Vertedero Controlado de Popeta

Tabla 2-20: Ficha técnica Vertedero Controlado Popeta

Característica	Detalle
Propietario	Municipalidad de Melipilla
Ubicación	Altos de Popeta s/n Melipilla
Resolución Sanitaria	Resolución N° 34.332 /10 que calificó proyecto “Plan de Adecuación del Vertedero de Popeta”
Promedio Tasa de ingreso de residuos	4.859 (ton/mes), año 2015
Vida útil	Cumplida
Superficie zona depósito de residuos	4,4 hectáreas
Sistema de impermeabilización	No tiene
Planta de Tratamiento de Lixiviados	No tiene
Planta de Quema de Biogás	No tiene, quema in situ sobre pozos de extracción.

### 2.5.6 Fiscalizaciones y procesos sancionatorios asociados a rellenos en la RM

Utilizando como fuente de información la plataforma del Sistema nacional de información de fiscalización ambiental (SNIFA)<sup>51</sup>, se consultó en primer lugar la cantidad de fiscalizaciones vinculadas a la categoría de saneamiento ambiental, sub-categoría relleno sanitario, además de los procedimientos sancionatorios asociados a la misma categoría.

Los resultados de la consulta muestran un total 34 expedientes de fiscalización (0,2% del total nacional), 24 correspondientes a normas de emisión y 10 correspondientes a resoluciones de calificación ambiental. En cuanto a su emplazamiento, 27 fueron realizados en la comuna de Talagante (Relleno Sanitario Santa Marta), cinco (5) en Til til (Relleno Sanitario Loma Los Colorados o Relleno Sanitario Cerros La Leona) y dos (2) en la comuna de Maipú (Vertedero Controlado Popeta).

En cuanto a los procesos sancionatorios, estos ascienden a cuatro, dos en la comuna de Til Til, uno en Maipú y uno en Talagante. Todos estos se encuentran con programa de cumplimiento en ejecución.

No se registran sanciones asociadas a la categoría de saneamiento ambiental en la Región Metropolitana. El único expediente de medidas previsionales encontrado corresponde al Relleno Sanitario Santa Marta, con fecha de inicio del 09.02.2016.

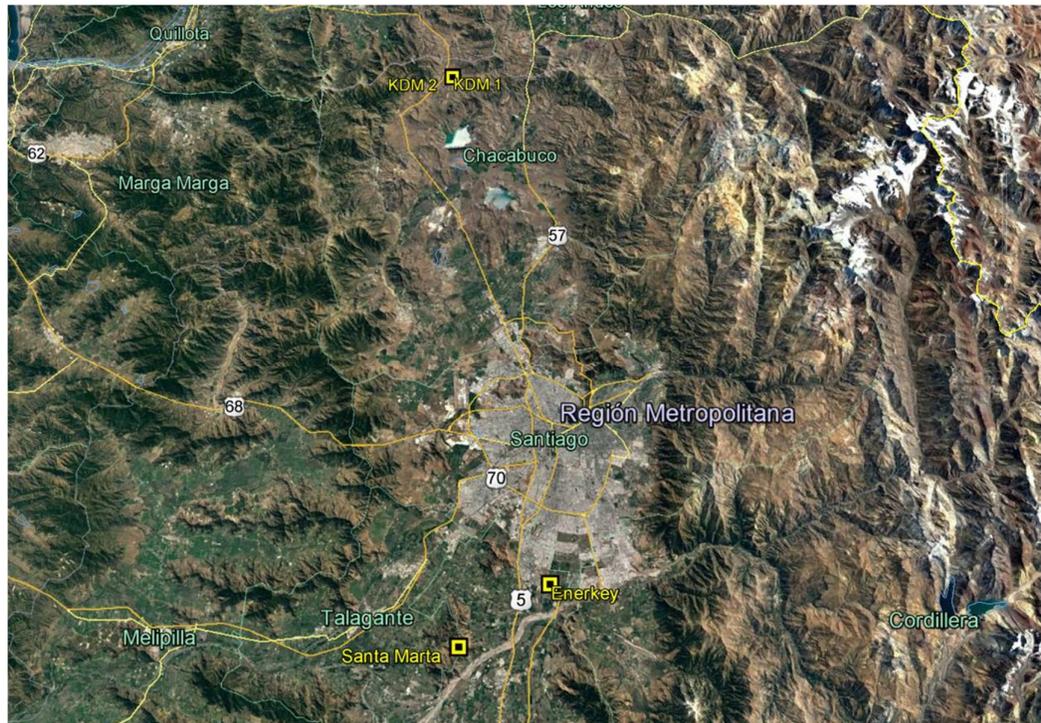
<sup>51</sup> Superintendencia del Medio Ambiente, *Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental, SNIFA*

**2.6 Caracterización de las iniciativas de generación energética a partir de residuos sólidos en la Región Metropolitana**

Se identifican tres industrias generadoras de energía en base a residuos en la Región Metropolitana, con una capacidad instalada superior a los 40 MW:

**Tabla 2-21: Industrias de generación energética a partir de RSD en la RM**

Propietario	Sitio disposición asociado	Capacidad instalada (MW)
KDM Energía S.A.	Relleno Sanitario Loma los Colorados	20,2
Consortio Santa Marta S.A.	Relleno Sanitario Santa Marta	19,7
Enerkey SpA	Ex vertedero Lepanto	2,0
<b>Total</b>		<b>41,9</b>



**Figura 2-19: Localización de las plantas generadoras de energía en base a RSD**

A continuación se presenta una descripción a nivel individual de cada una de ellas, así como el perfil anual de generación. Para los casos de Santa Marta y Loma Las Coloradas (KDM Energía), se cuenta con dos centrales de generación dentro de la misma planta. Es necesario señalar que la planta Enerkey se encuentra en el sitio del ex vertedero Lepanto.

**2.6.1 KDM Energía**

La central Loma Los Colorados, asociada al vertedero del mismo nombre, consiste en una red y planta de captación de biogás que alimenta dos equipos de generación de 2 y 18,2 MW respectivamente.

**Potencia instalada y sistema de generación:** La primera etapa corresponde al proyecto de pilotaje de la planta, y está basada en una tecnología de combustión de mezcla pobre, con el objeto de minimizar las emisiones. La potencia instalada es de 2 MW, en base a dos generadores de 1.000 kW de potencia nominal y una tensión de generación de 400 V. Este proceso permite una eficiencia eléctrica del 42%.

La segunda etapa corresponde al escalamiento operacional, replicando la tecnología de combustión. La potencia instalada es de 18,2 MW, en base a equipos de potencia nominal de 1.413 kW, con la misma tensión de generación y eficiencia eléctrica que en la primera etapa.

**Aprovisionamiento y acondicionamiento del gas:** el gas proviene de una red de más de 300 pozos distribuidos en una superficie aproximada de 70 ha, siendo transportado por una matriz con capacidad de 35.000 m<sup>3</sup>/hora. En ambos casos se utiliza un sistema de acondicionamiento y limpieza del biogás, consistente en la compresión del biogás a 10 psi, el filtrado de partículas (0,9 micras), secado por condensación y filtrado de siloxanos (mediante carbón activado).

**Sistemas de abatimiento:** Se han incorporado sistemas de filtros de oxidación catalítica y un reductor catalítico selectivo (SCR) para el abatimiento del 85% CO y 83% NO<sub>x</sub> respectivamente, logrando cumplir con las normativas vigentes.

**Conexión al SIC:** El sistema de conexión al SIC consiste en una línea de transmisión simple de 110 kV de 21 km. Ambas etapas pasan por subestaciones independientes modulares de tensión primaria de 23 kV y secundaria de 110 kV.

**Tabla 2-22: Características de las centrales de generación de KDM Energía<sup>52</sup>**

Razón Social Propietario	KDM Energía S.A.
Comuna	Til Til
Año Puesta en Servicio	2010 (LLC I) / 2011 (LLC II)
Punto de Conexión	S/E Loma Los Colorados, 23 kV
Potencia Neta [MW]	2 (LLC I) / 18,2 (LLC II)
Inyecciones Energía SIC 2015 [MWh]	120.163

## 2.6.2 Consorcio Santa Marta

El proyecto de generación asociado al relleno Santa Marta inició sus operaciones en el año 2013 y está basado en un sistema de generación que cuenta con 10 unidades de generación eléctrica, capaces de utilizar biogás como combustible.

### **Potencia instalada y sistema de generación:**

La potencia total instalada actual es de 19,66 MW, correspondiente a 10 generadores G3520C de marca Caterpillar, los cuales alcanzan un 40 % de eficiencia en la conversión térmica.

<sup>52</sup> Comisión Nacional de Energía. 2017. *Capacidad Instalada Generación SIC, SING y Sistemas Medianos*

Los generadores y equipos auxiliares están confinados en una nave, con la excepción de los transformadores de cada moto-generador

**Aprovisionamiento y acondicionamiento del gas:** Cuenta con un sistema de captación distribuido sobre la plataforma del Relleno Sanitario con más de 300 pozos de extracción, cuyo flujo es conducido a la Planta de Tratamiento de Gases (PTG). La PTG es la primera instalación de la Central, recibe la tubería de alimentación de biogás del relleno.

Los equipos de la planta de acondicionamiento consiste en Sopladores, Condensador, Filtros de Absorción Térmica Regenerativo – BGAK PPTEK, Filtros de Separación y Remoción de Condensado y Partículas – KELBURN, Analizador de Gases, Medición de flujo y presión.

La planta de acondicionamiento preparara el biogás para ser utilizado como combustible, retirando del gas elementos que afecten su calidad, además de equipos compresores y un sistema de monitoreo que permite controlar los parámetros del proceso. La planta de acondicionamiento de gas mediante el sistema BGAK (Bio Gas Automatic Kleen) retirara los siloxanos que son perjudiciales, para posteriormente suministrara un flujo de biogás apto a los Moto-Generadores y las unidades de tratamiento de emisiones.

**Sistema de Abatimiento:**

Se cuenta con un sistema de tratamiento de gases de escape, el cual, permite remover los contaminantes e impedir ser liberados a la atmosfera. Este sistema llamado E-POD™ de Caterpillar Clean Air Systems, combina la reducción catalítica selectiva y oxidación, con un sistema de filtros, permitiendo retirar los principales contaminantes asociados a la combustión interna (NOx, CO, PM10), con una alta eficiencia. El sistema de abatimiento de gases de escape, consiste en una serie de catalizadores con tecnología SCR, acoplados a cada motogenerador, que a través de inyección de urea permiten la reacción con el NOX, abatiéndolo cerca de un 90%.

**Conexión a SIC:** El sistema de transmisión está compuesto por una barra y línea de 23 kV, la cual se transporta la energía producida hasta una Subestación Elevadora, que transforma el potencial de 23 a 220 kV, y una línea de transmisión de Alta Tensión adicional de 2 km de longitud, que une la Subestación Elevadora a la Subestación Tap-off Santa Marta. Esta última subestación permite la conexión al Sistema Interconectado Central, en la Línea Troncal Alto Jahuel – Chena 220 kV.

**Tabla 2-23: Características de las centrales de generación de Santa Marta<sup>53</sup>**

Razón Social Propietario	Consortio Santa Marta S.A.
Comuna	Talagante
Año Puesta en Servicio	2014 (primera Planta) / 2016 (ampliación)
Punto de Conexión	Tap Santa Marta 220 KV
Potencia Neta [MW]	13 (primera planta) / 15 (ampliación)
Inyecciones Energía SIC 2015 [MWh]	93.581

<sup>53</sup> Comisión Nacional de Energía, 2017, *Capacidad Instalada Generación SIC, SING y Sistemas Medianos*

### 2.6.3 Enerkey

Luego del cierre del vertedero de Lepanto en el año 2002, las empresas Aconcagua y Mitsui realizaron una inversión de 8 millones de USD para reconvertir los residuos acumulados en una fuente de biogás, para su quemado y reducción de emisiones. Para ello cubrieron los desechos con dos capas de geomembrana y sobre ello se dispuso de una capa de tierra, la que, con el debido tratamiento, impide la salida de malos olores.

En el año 2017, la empresa ABR Enerkey puso en marcha el proyecto de aprovechamiento de este gas para la generación eléctrica. Potencia instalada de 1.560 kWe, motor Caterpillar, origen alemán. Vida útil aproximada de 7 años.

**Tabla 2-24: Características de la central de generación de Enerkey<sup>54</sup>**

Razón Social Propietario	Enerkey SpA
Comuna	San Bernardo (ex vertedero Lepanto)
Año Puesta en Servicio	En pruebas
Punto de Conexión	n/a
Potencia Neta [MW]	2
Inyecciones Energía SIC 2016 [MWh]	No aplica

Al cierre de este informe Enerkey no ha atendido las solicitudes de información realizadas por el consultor a cargo de la ejecución del estudio ni el cliente.

<sup>54</sup> Comisión Nacional de Energía, 2017, *Capacidad Instalada Generación SIC, SING y Sistemas Medianos*

## 2.7 Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones sobre el objetivo 1 del estudio, en cuanto al entorno y estado actual de la generación de RSD en la Región Metropolitana.

La cantidad de RSD o asimilables a domiciliario que están siendo recolectados por los municipios y depositados en algún sitio autorizado de disposición final en la RM, es superior a los 3 millones de toneladas, cantidad que proyecta una alta disponibilidad para una futura planta de WTE. Además, la estacionalidad es bastante regular, solo mostrando un leve descenso en el mes de febrero (ver Figura 2-3).

De los RSD generados, aproximadamente el 75% corresponden a los del tipo residencial y un 25% a los del tipo comercial, siendo la comuna de Santiago las que más aporta a la componente comercial, con un 11,9%.

En cuanto a la composición de los RSD, los residuos residenciales cuentan con una composición similar independiente del grupo socioeconómico de origen, donde el 57,2% corresponde a orgánicos, un 24,0% a materiales de alto contenido energético (papel, cartón, plásticos, tetra pack y especiales), mientras que el 18,8% restante corresponde a metales, vidrio, otros inertes y otros residuos no clasificados. En el caso de los residuos comerciales, un 39,4% corresponden a orgánicos, un 53,6% a residuos de alto contenido energético, mientras que el 7% restante corresponde a metales, vidrio, otros inertes y otros residuos no clasificados. Debido a lo anterior, los RSD de origen comercial cuentan con un valor energético medio de 3,59 kWh/kg, superior a los 2,78 kWh/kg de los RSD de origen residencial. El poder calorífico promedio de los RSD en la RM es de 3,01 kWh/kg o 10,94 MJ/kg.

La situación contractual de los municipios en cuanto a la recolección y transporte de RSD está a cargo de 15 empresas, sin embargo, el 46% de los contratos ha sido adjudicado por dos empresas: Dimensión y Starco-Demarco, esta última perteneciente al consorcio KDM. El costo promedio del servicio de recolección y transporte es de \$22.111/ton (USD 34,56 por tonelada), y la duración promedio de los contratos es de 5 años. Los factores que influyen en el costo de recolección y transporte por tonelada corresponden a la extensión territorial de la comuna, densidad poblacional, el tipo de tecnología de camiones utilizados, los tipos de residuos recolectados y aspectos de recolección diferenciada para reciclaje, principalmente.

Por otra parte, en la disposición final el costo promedio es de \$10.918/ton (USD 17,06 por tonelada). De la situación contractual de los municipios en cuanto a la disposición de RSD en la región, se observa que el 47% de los residuos son dispuestos en rellenos con una vida útil inferior a 6 años (casos de relleno sanitario Santa Marta, relleno sanitario Santiago Poniente y vertedero Popeta). El otro 53% de los residuos es dispuesto mayoritariamente en el relleno sanitario Loma Los Colorados, y gran parte de las comunas que ahí disponen sus residuos cuentan con contratos vigentes hasta el año 2027.

En cuanto a la proyección de posibles escenarios de generación de residuos para el año 2050, las principales variables incidentes corresponden al crecimiento de la población, al crecimiento económico del país y a la implementación de políticas de reciclaje como la ley REP, promulgada en el año 2016. La experiencia de países de la OECD que han implementado un sistema de gestión de residuos de responsabilidad extendida del productor hace más de 20 años, permiten proyectar un escenario medio de reciclaje de 60% para la categoría de envases y embalajes. Por otro lado, y considerando escenarios

medios de crecimiento económico y reciclaje, se proyecta para el año 2050 una disposición total de 4.455.991 ton de RSD en la RM.

### 3 ETAPA 1 – OBJETIVO ESPECÍFICO 2

#### 3.1 Introducción

En el objetivo específico 2 del estudio serán analizadas las siguientes tecnologías existentes en cuanto a su funcionamiento, en general, con una descripción explicativa:

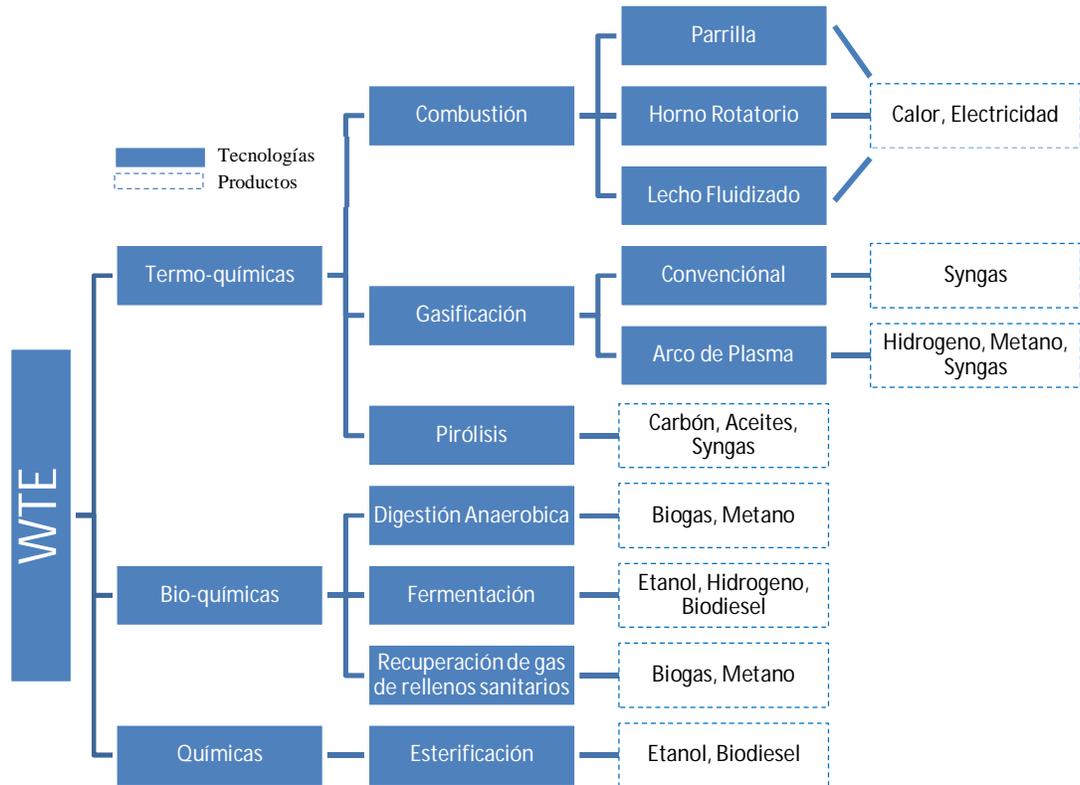
- Incineración o Combustión
  - de parilla
  - horno rotatorio
  - de lecho fluidizado
- Gasificación
  - para generación eléctrica o cogeneración con turbina a vapor
  - para generación eléctrica con turbina a gas
  - por plasma
- Pirólisis
- Digestión anaeróbica de fracción orgánica de los RSD
- Rellenos sanitarios convencionales y con recuperación energética

Además se hace una revisión de los antecedentes con respecto a los estudios principales ya ejecutados con enfoque de su relevancia al mercado chileno y en particular a la ciudad de Santiago. Posteriormente se definen los criterios de evaluación para comparar las diferentes tecnologías. Se presenta una comparación cualitativa de las características principales con indicaciones de rangos típicos por tecnología donde aplica y está disponible.

#### *Generalidades*

La conversión de los residuos en energía puede obtenerse con diferentes tecnologías, cada una de las cuales tiene diferentes características. La factibilidad de cada tecnología depende de una gran cantidad de parámetros, lo que hace que la idoneidad de cada una deba ser analizada caso a caso. Entre estos factores se incluyen la cantidad, tipo y composición de los residuos, su contenido energético, la forma final de energía requerida, las condiciones climáticas y los requerimientos ambientales de cada lugar.

En la Figura 3-1 se muestra un esquema general de las tecnologías disponibles y sus productos correspondientes, incluyendo tecnologías en desarrollo en etapa de piloto o primeros proyectos comerciales y tecnologías maduras con varios años de operación en el mercado.



**Figura 3-1: Tecnologías disponibles<sup>55</sup>, (Elaboración propia)**

En la Tabla 3-1 se muestra un resumen general y simplificado de las tecnologías WTE en evaluación. En esta tabla se observa que las tecnologías de combustión tienen un alto nivel de desarrollo e implementación, habiendo resuelto sus problemas operacionales del pasado y ajustándose a las últimas regulaciones ambientales con éxito. Las tecnologías de gasificación y pirólisis se encuentran en distintos niveles de desarrollo para su uso comercial con RSD existiendo plantas en operación comercial en algunos mercados específicos (Japón, Corea del Sur).

De las tecnologías bioquímicas, solo la digestión anaeróbica será analizada, considerando que esta cuenta con un gran número de plantas de diversos tamaños y distintas fuentes de residuos, incluidos los RSD.

Las tecnologías químicas no serán analizadas en este estudio en mayor detalle.

<sup>55</sup> Elaboración propia en base de: Lo Re, Piamonti & Tarhini, 2013, *World Energy Resources: Waste to Energy*

**Tabla 3-1: Resumen de características principales tecnologías WTE**

Descripción	Combustión			Gasificación			Pirólisis
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluidizado	Convencional		Plasma	
				Turbina Vapor	Turbina a Gas		
<b>Plantas operativas</b>	<b>1.264 (~80%)</b>	<b>13(~1%)</b>	<b>176 (~11%)</b>	<b>129 (~8%)</b>	<b>0(~0%)</b>	<b>4(~0%)</b>	<b>5(~0%)</b>
<b>Pretratamiento mínimo</b>	Separación residuos voluminosos	Separación residuos voluminosos	Separación residuos voluminosos, trituración hasta tamaño de partícula < 5mm	Separación residuos voluminosos, trituración hasta tamaño de partícula < 5mm, y clasificación automática para el retiro de elementos inertes, reciclables y con alto contenido orgánico			
<b>Madurez de tecnología</b>	Alta	Alta	Alta	Insuficiente experiencia fuera de Japón	En desarrollo	Solo operación comercial en Japón y Sur Corea	Demonstración, en proceso de implementación
<b>CAPEX (USD/ton)</b>	425 ~ 767	2.667 ~ 24.000	1.000 ~ 710	Insuficiente información	*(1)	*(1)	*(1)
<b>OPEX</b>	Bajo	Alto	Bajo	Insuficiente información	*(1)	*(1)	*(1)
<b>Costo por Tonelada Tratada (USD/ton)<sup>2</sup></b>	12 ~ 69	34 ~ 1.230	17 ~ 80	Insuficiente información	*(1)	*(1)	*(1)
<b>Ventajas</b>	Tecnología simple y robusta No requiere pre-tratamiento, solo separación de voluminosos. Bajo OPEX	Tecnología robusta No requiere pre-tratamiento, solo separación de voluminosos. Puede recibir residuos peligrosos	Alta eficiencia energética Recupera materiales valorizable	Reputación (no es incineración) Alto rendimiento eléctrico	Reputación (no es incineración) Alto rendimiento eléctrico teórico en turbina a gas	Buena reputación Menor cantidad de residuo final Puede recibir residuos peligrosos	Mayor recuperación de reciclables <sup>(3)</sup>
<b>Desventajas</b>	Eficiencia limitada Baja reputación No recupera materiales valorizables sin pre-tratamiento adicional	Capacidad limitada Mayor CAPEX y OPEX	Requiere pre-tratamiento Mayor porcentaje de ceniza volátil	Alto OPEX por costo de pre-tratamiento	Dificultad para mantener calidad del syngas Altas emisiones de NOx	Incierto CAPEX y OPEX Requiere pre-tratamiento Lograr disponibilidad puede ser complejo	Alto costo de pre-tratamiento y selección de los residuos Alto costo de tratamiento del syngas

Nota 1: Plantas construidas no han logrado alcanzar operación comercial, por lo que no se cuenta con datos de referencia, siendo información insuficiente para ser confiable.

Nota 2: El costo por tonelada tratada fue calculado en base a una proyección lineal de los costos de operación y mantenimiento y de la inversión a 20 años, divididos por la capacidad anual de la planta, traído a valor presente.

Nota 3: Considerando el pre-tratamiento estrictamente requeridos por la tecnología.

Nota 4: no es factible cuantificar por gran cantidad en el mundo e información atomizada.

### 3.2 Descripción de las tecnologías

#### 3.2.1 General

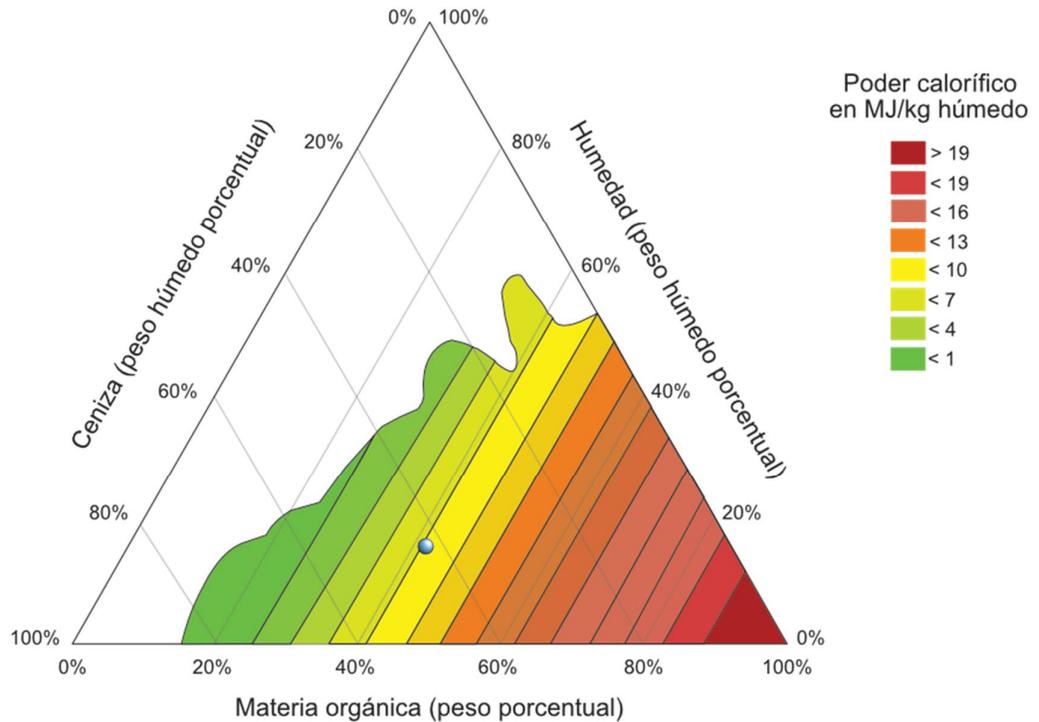
En este capítulo se describen las diferentes tecnologías de recuperación energética o Waste to Energy (WTE). En las plantas WTE es posible identificar al menos cinco etapas principales: **Pre-tratamiento**, donde se realiza la clasificación y homogenización de los residuos; **Conversión**, donde se realiza la transformación de los residuos en calor o gas combustible; **Recuperación energética**, donde el calor se convierte en agua caliente, vapor de agua para su distribución, o el vapor de agua o el gas se transforman en energía eléctrica y **Distribución de energía final** donde se entrega el agua caliente para distribución, vapor para uso industrial, energía eléctrica al sistema de transmisión, o gas a la red de gas, o combinaciones de estas y **Tratamiento de emisiones**.



**Figura 3-2: Etapas principales tecnologías WTE, (Elaboración propia)**

A su vez, será necesaria la disposición de residuos producto de la separación de los residuos voluminosos, así como también la posible gestión de materiales reciclables. También será necesaria la gestión y disposición de cenizas.

Los RSD disponibles en la RM presentan una composición principalmente orgánica entre un 54% a 59%, con una humedad del 59%. Aplicando el diagrama de Tanner (Figura 3-3) se obtiene un poder calorífico de 10,94 MJ/kg. Además, es posible apreciar la influencia de la humedad en el poder calorífico de la fracción orgánica, que es la más significativa en términos de la humedad total de los RSD.



**Figura 3-3: Diagrama de Tanner, materia orgánica v/s humedad, ceniza y poder calorífico<sup>56</sup>**

La evaluación de los pre-tratamientos de secado corresponde a una evaluación económica para evaluar la conveniencia de la inversión versus el mayor retorno en energía generada, considerando que en general los procesos de combustión incluyen por defecto una primera etapa de secado de los residuos mientras ingresan a la cámara de combustión.

<sup>56</sup> Dimitrios k. et al, 2013, *Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid waste.*

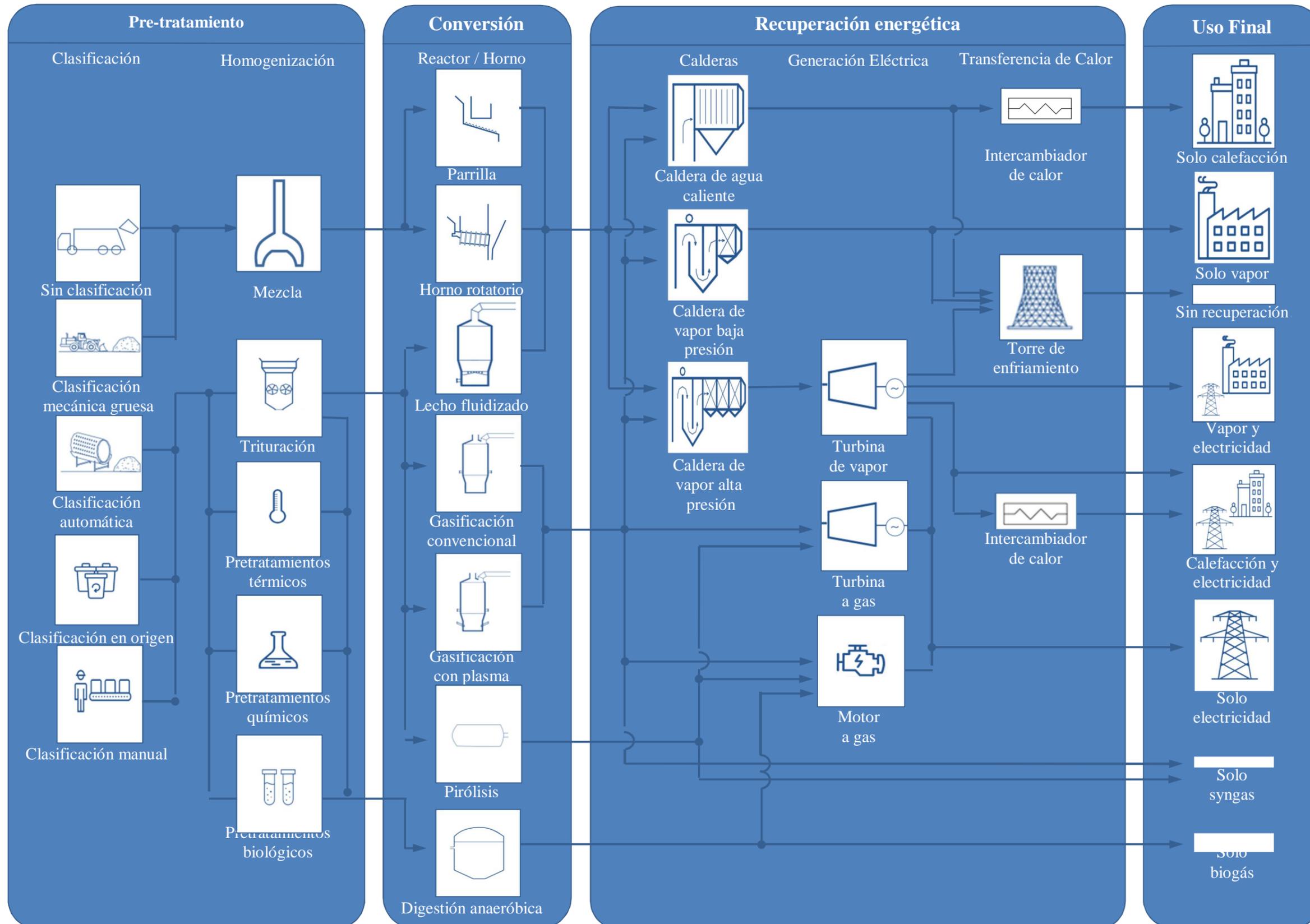


Figura 3-4: Esquema general de tecnologías de Waste to Energy (elaboración propia en base a esquema de World Bank Technical Report Municipal Solid Waste Incineration)

### 3.2.2 Pre-tratamiento

Las tecnologías de pre-tratamiento permiten realizar la clasificación y homogenización de los residuos antes de su utilización en una planta WTE. Las tecnologías WTE tienen distintos requerimientos para el residuo a utilizar, por lo que requieren específicas combinaciones de pre-tratamiento para conseguir estos requerimientos. Las principales tecnologías de pre-tratamiento son:

- Mecánico
- Térmico
- Biológico
- Químico

#### 3.2.2.1 Mecánico

Los pre-tratamientos mecánicos incluyen los procesos de clasificación en planta, de homogenización o mezcla, de trituración y densificación.

Dependiendo de la calidad del residuo y de los requerimientos propios de cada tecnología, puede ser necesario clasificar y homogenizar los residuos antes de su recuperación energética.

##### Clasificación

La clasificación permite dividir los diferentes elementos presentes en los residuos para su gestión eficiente separando los residuos adecuados para el reciclaje, para rellenos sanitarios y para revalorización energética.

La clasificación se puede realizar con diferentes métodos, incluyendo clasificación manual, automática y con maquinaria pesada o combinaciones de estos métodos.

- **Clasificación con maquinaria pesada:** incluye la separación con las grúas del bunker, y permite solo el retiro de materiales de grandes dimensiones, lo que es adecuado para mejorar el desempeño de la tecnología con combustión de parrilla y de los sistemas de trituración.
- **Clasificación manual:** permite separar los diferentes materiales reciclables, los residuos adecuados para rellenos sanitarios, y los residuos adecuados para revalorización energética con un alto nivel de segregación. La cantidad de categorías solo está limitada por el espacio físico y la cantidad de operarios requeridos, sin embargo, los procesos de clasificación manual requieren mucho espacio y medidas especiales para el cuidado de las condiciones sanitarias de los trabajadores.
- **Clasificación automática:** permite separar diferentes materiales reciclables. El costo y complejidad dependen de la cantidad de elementos que se deseen separar del proceso. Entre los procesos de clasificación automática se encuentran:
  - **Clasificación con aire:** permite separar materiales de diferente tamaño, densidad y forma, en una columna de aire. El objetivo es la separación de materiales livianos (como papeles y cartones) de materiales pesados

(metales y rocas en general) con la ayuda de aire, luego de pasar por un proceso de trituración de residuos.

- **Tamizado:** permite la clasificación de los residuos según tamaño. Los sistemas de tamizado más usados son el tambor rotatorio y la parrilla de discos, separando los residuos por uno o más tamaños. El tamizado ayuda a la reducción de la ceniza, de los vidrios y de las arenas.
- **Separación Magnética:** permite la separación y recuperación de metales férricos de los residuos, los metales obtenidos de estos procesos en general requieren de etapas adicionales de limpieza antes de ser adecuados para la venta. Existen varias tecnologías de separación magnética, como tambor magnético, correas magnéticas, poleas de cabecera magnéticas y sus combinaciones. La separación magnética ayuda a la reducción de la escoria presente en la ceniza de fondo.
- **Separación Eléctrica:** corresponde al separador de corriente de Eddy, que permite la separación y recuperación de metales no férricos, principalmente aluminio y envases tetra pack.
- **Clasificación por peso:** permite la separación por peso, retirando elementos como botellas de vidrio, cerámica y piedras.

### **Trituración**

Los procesos de trituración permiten la reducción del tamaño de los residuos, aumentando el área superficial específica y permitiendo un transporte adecuado de los residuos dentro de las distintas etapas de la planta.

Los procesos de trituración se pueden categorizar según el tamaño del residuo resultante como:

- Trituración primaria: normalmente con un residuo grueso < 15 cm.
- Trituración secundaria: normalmente con un residuo medio < 5 cm.
- Molienda: normalmente con un residuo fino, < 2 mm, adecuado para procesos con sistemas de transporte neumáticos.

Los efectos principales en el proceso de contar con un residuo con una mayor superficie específica, es la mejora la eficiencia de procesos termoquímicos y bioquímicos según la tecnología.

- En los procesos termoquímicos el aumento del área de contacto permite una mejor transferencia de calor y posterior oxidación/gasificación de los residuos, mejorando la eficiencia del proceso de combustión/gasificación según la tecnología.
- En los procesos bioquímicos, el aumento del área de contacto permite una mejor reacción entre los residuos y las bacterias, disminuyendo el tiempo requerido para el proceso de obtención del biogás.

### **Densificación y almacenamiento**

Los procesos de densificación permiten la disminución del volumen de los residuos, y el transporte desde una eventual planta de combustible derivado de residuos o RDF (por sus siglas en inglés, *refuse-derived fuel*) a una planta de WTE, o su almacenamiento dentro de una planta WTE para disminuir el tamaño del bunker principal sin comprometer la seguridad de la continuidad operacional.

#### **3.2.2.2 Térmico**

Los procesos de pre-tratamiento térmicos consisten en la exposición de los residuos a una fuente de calor por un periodo de tiempo, sin generar combustión, como la pasteurización e higienización, para conseguir la desintegración de las membranas celulares, logrando como resultado la desinfección de los residuos y la solubilización de los compuestos orgánicos.

Los pre-tratamientos térmicos son principalmente utilizados en las plantas de Digestión Anaeróbica, DA. Las metodologías principales en pre-tratamiento térmico son calefacción eléctrica con vapor y micro ondas. Estos procesos también son usados como post tratamiento de los residuos sólidos de la DA para su desinfección y valoración como fertilizante.

#### **3.2.2.3 Químico**

Los procesos de pre-tratamiento químicos consisten en la aplicación de ácidos y oxidantes para conseguir la destrucción de los compuestos orgánicos y mejorar la producción de biogás. Estos procesos son recomendados sobre residuos orgánicos ricos en compuestos resistentes a la degradación, tales como la lignina y la celulosa.

#### **3.2.2.4 Recuperación de elementos reciclables**

Como parte de algunos de los procesos de pre-tratamiento, se obtienen elementos que pueden ser revalorizados en el reciclaje o procesados por otra tecnología, como por ejemplo en el pre-tratamiento de una planta termoquímica, los residuos orgánicos pueden ser retirados para su envío a una planta bioquímica, y a su vez, los residuos inorgánicos combustibles en una planta bioquímica pueden ser enviados a una planta termoquímica.

El retiro de estos materiales tiene un impacto en la composición de la materia prima enviada a la recuperación energética, y por ende, distintos impactos en el poder calorífico y/o la producción y características de los residuos finales.

**Tabla 3-2: Efecto de eliminación de materiales reciclables<sup>57</sup>**

Material recuperado	Pre-tratamiento	Efecto(s) al combustible y proceso
Orgánicos	Clasificación manual Tamizado	Reducción de la humedad, aumento del poder calorífico (~10 %)*
Papel	Clasificación manual Clasificación con aire Tamizado	Reducción del poder calorífico (~2 a 3 %)
Cartón	Clasificación manual Tamizado	Reducción del poder calorífico (~1%)
Plásticos	Clasificación manual Clasificación con aire Tamizado	Reducción del poder calorífico (~7 a 12%)
Metales férricos	Separación magnética	Incremento del poder calorífico (~1%) , reducción de la escoria y contenido de metales recuperable en la ceniza de fondo
Vidrio	Tamizado Clasificación automática	Incremento del poder calorífico, reducción de la escoria y cenizas
Tetra Pack	Separación eléctrica	Sin efecto en poder calorífico, reducción de metales en cenizas
Especiales (Residuos Peligrosos)	Clasificación manual	Reducción de la ceniza, disminución de metales pesados en cenizas volantes (según tipo de residuo peligroso retirado)
Residuos voluminosos	Separación mecánica gruesa	Aumento disponibilidad y confiabilidad operacional (evita atascamientos en el sistema)

Nota \*, no es muy común la separación en planta, es más usual la separación en origen. El valor indicado asume una reducción de 50% de material orgánico. En teoría, si se lograra la reducción total de material orgánico, el poder calorífico aumentaría en un 30%.

<sup>57</sup> Elaboración propia

### 3.2.2.5 Combustibles Derivados de Residuos (RDF)

Los combustibles derivados de residuos o RDF por sus siglas en inglés (*refuse-derived fuel*) corresponden a cualquier tipo de material derivado de residuos sólidos que pueda ser incinerado. La clasificación de los RDF se realiza según el tipo de pre-tratamiento realizado y pueden ser producidos en un rango de especificaciones, según el tamaño de partícula, densidad, entre otros.

La norma ASTM define<sup>58</sup> los siguientes tipos de RDF según el nivel de pre-tratamiento y tamaño máximo de los elementos:

- **RDF – 1:** Residuos tal como fueron descartados, solo retirando elementos voluminosos.
- **RDF – 2:** Residuos triturados en elementos gruesos (<15 cm) con o sin separación de metales férricos.
- **RDF – 3:** Parte combustible de los residuos, procesados para el retiro de metales, vidrios y otros inorgánicos, triturados (95% de las partículas  $\leq 5$  cm).
- **RDF – 4:** Parte combustible de los residuos, procesados y pulverizados (95% de las partículas  $\leq 2$  mm).
- **RDF – 5:** Parte combustible de los residuos, procesados y compactados (en pellet, bloques, ladrillos, briquetas o similares).

También existen las categorías 6 y 7 que corresponden a RDF líquidos y gaseosos respectivamente, para los cuales aún no se ha desarrollado un estándar.

---

<sup>58</sup> ASTM STP 832, ASTM, 1983, p. 72

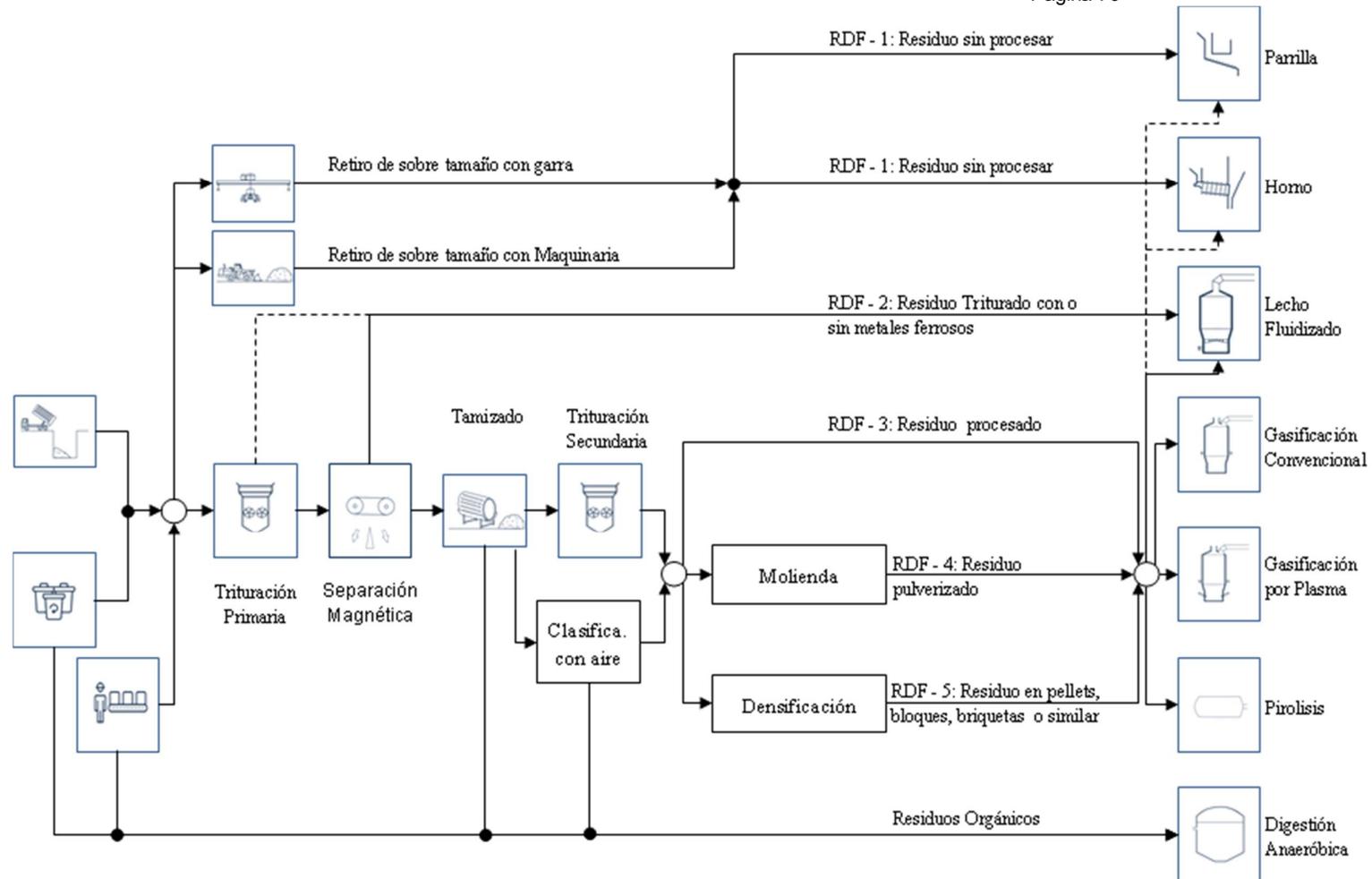


Figura 3-5: Combustibles derivados de residuos (RDF) según pre-tratamiento, (Elaboración propia)

### 3.2.3 Tecnologías Termo-químicas

Las tecnologías termo-químicas involucran altas temperaturas para la recuperación de energía desde los residuos. Estas tecnologías incluyen la oxidación térmica o combustión; gasificación convencional y gasificación con plasma (o asistida por plasma); y pirólisis.

En general, todas las tecnologías se basan en la oxidación de la parte combustible contenida en los residuos.

Las tecnologías termo-químicas se pueden clasificar en **combustión, gasificación y pirólisis**, según el proceso de transformación antes de la obtención de la energía.

#### 3.2.3.1 Combustión

Es la tecnología más común para tratar residuos sólidos. Ésta busca la completa oxidación de los materiales combustibles contenidos en los residuos. Para ello, se ingresan los residuos a la cámara de combustión, donde por el calor presente en la cámara se evapora el contenido de humedad, luego, a medida que aumenta la temperatura de los residuos se liberan gases volátiles inflamables, que al entrar en contacto con el oxígeno generan la combustión, liberando energía en forma de calor, gases y cenizas.

La energía liberada se irradia en toda la cámara de combustión, alcanzando los residuos que se encuentran ingresando a la cámara, evaporando su contenido de humedad y liberando los gases volátiles generando un ciclo auto-sostenido. Los gases de combustión contienen mucha energía térmica que es recuperada a través de una caldera de agua caliente o vapor.<sup>62</sup>

La energía recuperada puede ser utilizada de forma independiente o combinada para sistemas de vapor industrial, calefacción distribuida o generación eléctrica. Las cenizas, se recuperan del fondo de la cámara de combustión y de los distintos sistemas de control de emisiones. De ella es posible recuperar algunos metales, y según su composición, ésta puede ser utilizada como aditivo del cemento o para la fabricación de elementos prefabricados urbanos, tales como ladrillos y soleras<sup>59</sup>.

#### 3.2.3.2 Gasificación

La gasificación busca la descomposición de los residuos en un gas combustible llamado *syngas*. Para ello, se incorporan los residuos a la cámara de gasificación donde se evapora el contenido de humedad, luego, a medida que son calentados se liberan gases volátiles inflamables que por la ausencia de oxígeno no producen ignición, en cambio se producen transformaciones químicas que liberan un conjunto de gases combustibles denominado *syngas*. Este gas producido puede ser incinerado dentro de la misma cámara, produciéndose gases de combustión y calor, destinado para otros usos, como la combustión en una turbina o motor a gas, o destinado a la red de distribución de gas<sup>60</sup>. En el caso de ser combustionado dentro de la misma cámara, el calor resultante puede ser utilizado en una caldera de agua caliente o vapor para su aprovechamiento energético.

<sup>59</sup> Grosso, M. et al, 2011, *A quantitative estimate of potential aluminium recovery from incineration bottom ashes*, in Resources, Conservation and Recycling, p. 1178-1184.

<sup>60</sup> World Energy Council, 2016, *World Energy Resources – Waste to Energy*

### 3.2.3.3 Pirólisis

La tecnología de pirólisis consiste en la descomposición de térmica de cualquier elemento basado en carbono a altas temperaturas, por medio de distintas reacciones químicas en un ambiente sin oxígeno. De este proceso se pueden obtener tres subproductos, gas combustible *syngas*, aceites y carbón. La temperatura del proceso varía según la tecnología utilizada, el tipo de residuo, y el subproducto que se desee obtener<sup>61</sup>. En general, a mayor temperatura se genera un mayor contenido de gases, mientras que a menor temperatura se genera mayormente carbón. El proceso requiere una fuente externa de calor que puede provenir de la combustión de los subproductos o de otro combustible.

Al igual que para las tecnologías de gasificación, la naturaleza heterogénea de los RSD hace que los procesos de pirólisis y limpieza de los subproductos sean complejos de estabilizar, por lo que requieren un gran equipo de profesionales y constantes ajustes en la operación. Debido a esto, no se conocen proyectos de pirólisis para RSD de gran escala actualmente en operación.

La mayor diferencia entre las tecnologías de pre-tratamiento es la cantidad de oxígeno requerido y la temperatura del proceso de conversión que permite la generación de calor, energía, o productos que pueden ser transformados en energía posteriormente.

Los procesos de combustión requieren más oxígeno para asegurar la correcta combustión de los residuos y para que se lleve a cabo por completo. Estos procesos liberan mucho calor (muy exotérmicos), y al requerir más oxígeno que el que realmente es empleado en la combustión, el volumen de los gases resultantes es mayor.

**Tabla 3-3: Comparación del proceso de combustión entre tecnologías<sup>62</sup>**

	Combustión	Gasificación	Pirólisis	DA*
Oxígeno requerido	Mucho oxígeno adicional (o aire)	Algún oxígeno adicional (o aire)	Sin oxígeno adicional (solo calor)	Sin oxígeno
Reacción	Muy exotérmico	Exotérmico / Endotérmico	Exotérmico / Endotérmico	Exotérmico / Endotérmico
Volumen de gases generados	Alto	Menor	Menor	Muy Menor
Contaminantes generados en la oxidación / reducción	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> entre otros	H <sub>2</sub> S y COS	H <sub>2</sub> S y COS	N/A
Residuo sólidos del proceso	Ceniza de fondo	Carbón Escoria vitrificada	Carbón	Digestato
Capacidad 1 línea de proceso (ton/anales)	150.000 330.000 (actuales) 500.000 (teóricas)	10.000 100.000 (actuales)	~ 4.000 (actuales) 40.000 a 80.000 (teóricas)	10.000 100.000 (teóricas)

<sup>61</sup> C. Zhou, Q. Zhang et. Al, 2013, *A Study of the pyrolysis behaviors of palletized recovered municipal solid waste fuels. Applied energy* 107 173-182.

<sup>62</sup> World Energy Council, 2016, *World Energy Resources – Waste to Energy*.

Nota \*, se incorpora DA para facilitar comparación aunque no corresponde a procesos termoquímicos.

### 3.2.4 Tecnologías Bioquímicas

Las tecnologías bioquímicas utilizan micro-organismos para la descomposición de la fracción biodegradable de los residuos, como los restos de comida y restos de corte, roce y poda. De tal manera, la fracción orgánica de los RSD, los desechos agrícolas, residuos de tratamiento de aguas servidas, desechos de la industria ganadera, entre otros, corresponde a los residuos más apropiados para este tipo de tecnologías.<sup>62</sup>

#### 3.2.4.1 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica consiste en la descomposición y estabilización de material biodegradable por micro-organismos en ausencia de oxígeno, obteniendo como resultado la producción de biogás (gas rico en metano y dióxido de carbono)<sup>63</sup>, y digestato, que es una mezcla de materia sólida y líquido rico en nutrientes.

El proceso de degradación de la materia orgánica se divide en cuatro etapas: a) Hidrólisis; b) Etapa fermentativa o acidogénica; c) Etapa acetogénica; d) Etapa metanogénica.

El biogás creado es utilizado para generar energía eléctrica o calor. El digestato puede ser tratado para la obtención de bio-fertilizantes para su uso agrícola o en áreas verdes urbanas.<sup>64</sup>

#### 3.2.4.2 Captura de gas de rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios son una forma más común de disposición de residuos en el mundo<sup>65</sup> y fuente significativa de gases de efecto invernadero<sup>64</sup>. La descomposición de la materia orgánica presente en los RSD genera un gas llamado *landfill gas* (LFG) compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono (50% CH<sub>4</sub> y 45% CO<sub>2</sub>)<sup>66</sup>.

Los rellenos sanitarios son una fuente significativa de gases de efecto invernadero (GEI) debido principalmente a que el metano que emiten es entre 21 a 28 veces más nocivo que el dióxido de carbono<sup>67</sup>.

El proceso de captura de los gases incluye la cobertura parcial del relleno y la instalación de un sistema de recolección. Existen diversos sistemas de recolección que han probado su efectividad y la elección de cada uno depende de las condiciones específicas de cada sitio.

Las aplicaciones del gas capturado incluyen su uso directo para producción de energía térmica en calderas o en cualquier proceso de combustión, generación eléctrica mediante motores de combustión, turbinas o cogeneradores, y la quema sin valorización como

<sup>63</sup> Vögeli Y. Lorhri C. et al, 2014, *Anaerobic Digestion of Bio-waste in Developing Countries, Practical information and Case Studies*, Swiss Federal institute of Aquatic Science and Technology EAWAG,

<sup>64</sup> World Energy Council, 2016, *World Energy Resources – Waste to Energy*.

<sup>65</sup> Thomas H. Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste Management & Research* 2009. 825 - 836

<sup>66</sup> US EPA, Emission Factor Municipal solid waste landfills. Technology Transfer network, Clearinghouse of inventories and emission factors, US Environmental Protection Agency,

<sup>67</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015, *IPCC Fifth Assessment Report*.

medida de reducción de impacto ambiental. Adicionalmente, el gas obtenido puede ser tratado para su incorporación a redes de gas natural, luego de ser procesado a biometano.

A continuación se muestra una caracterización de las tecnologías de recuperación energética, incluyendo las siguientes características principales:

- Pretratamiento necesario.
- Sistema de conversión energética (incluyendo componentes principales y estado de desarrollo de la tecnología a nivel global).
- Condiciones típicas de operación (incluyendo rangos de operación, mantención y vida útil, emisiones típicas, residuos del proceso y requerimientos típicos del terreno).
- Costos de Inversión (CAPEX) y operación (OPEX).
- Resumen y Análisis FODA.

### **3.2.5 Combustión de Parrilla**

#### **3.2.5.1 Descripción General**

Los sistemas de combustión de parrilla pueden procesar todo tipo de residuos, desde residuos sin clasificar hasta la fracción combustible de los residuos después de un proceso de clasificación y pre-tratamiento avanzado.

Los residuos, pre-tratados o no, son incorporados a la cámara de combustión por una parrilla inclinada, ubicada en el fondo de la cámara de combustión. De este proceso se obtiene calor, el cual es conducido a una caldera.

La recuperación de la energía se puede realizar a través de distintos tipos de caldera dependiendo del uso final de la energía, agua caliente, calefacción distrital, vapor industrial, electricidad o sus combinaciones. En la Figura 3-6 se pueden ver los distintos esquemas posibles con esta tecnología.

#### **3.2.5.2 Pre-tratamiento**

La combustión de parrilla no requiere pre-tratamiento, solo se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta y en algunas ocasiones se aplica una trituración previa a la alimentación al horno para reducir el tamaño y homogeneizar el material (RDF-1). Sin embargo, esta tecnología también es utilizada en sistemas de pre-tratamiento avanzados para la fracción combustible no reciclable.

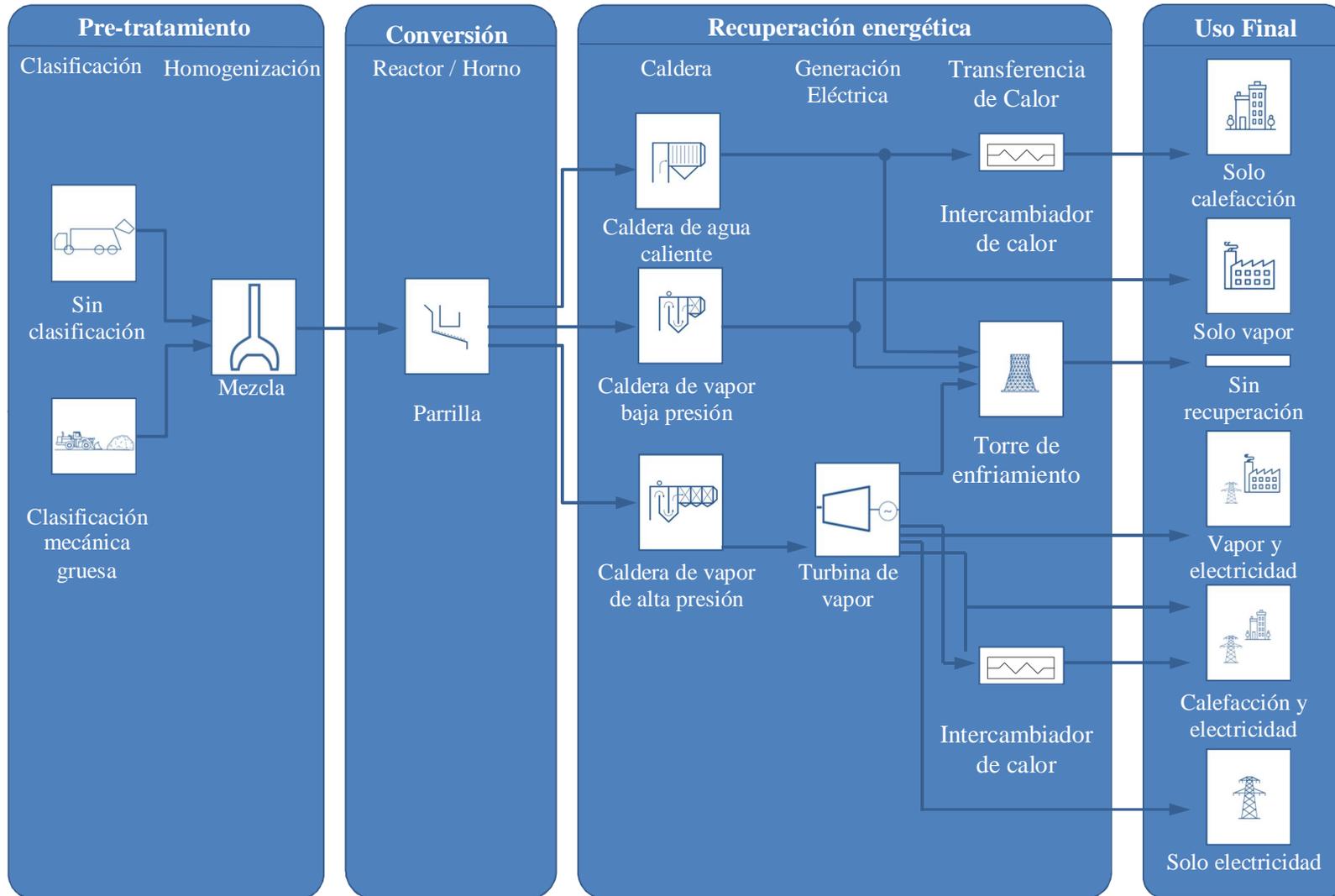
Este tipo de tecnología se utiliza principalmente para residuos sólidos municipales (que incluyen a los RSD), siendo muy versátil en términos de la distribución porcentual de los mismos, sin generar mayores complicaciones para la operación.

**Tabla 3-4: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	500 x 500 x 500 mm 1.200 x 50 x 50 mm
Poder calorífico máximo	5.5 – 18 MJ/kg
Poder calorífico típico	8 – 11 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes (<500 mm)
Pre-tratamiento opcional	Trituración

Los pre-tratamientos opcionales son:

- **Separación mecánica de los elementos grandes:** se realiza para evitar eventuales obstrucciones del alimentador de la parrilla, que pudiese obstruir el proceso y provocar una detención. No tiene efectos significativos en el rendimiento general.
- **Trituración:** se realiza para homogenizar los residuos y aumentar el área superficial específica. La homogenización de los residuos mejora las condiciones de operación y el aumento del área de contacto permite una mejor transferencia de calor y posterior oxidación de los residuos, mejorando la eficiencia del proceso de combustión.



**Figura 3-6: Esquema general de Combustión de Parrilla**

### 3.2.5.3 Conversión

Los residuos son incorporados a la cámara de combustión por una parrilla inclinada, ubicada en el fondo de la cámara de combustión. La parrilla tiene varias funciones, como permitir el avance de los residuos, lo que se logra gracias al movimiento e inclinación de ésta. Además, facilita la mezcla de los residuos y, gracias al efecto del movimiento, contribuye a atizar la llama y propagación de las brasas, lo que conlleva a la aceleración de la combustión.

Existen diversas variantes de esta tecnología según el sistema de parrilla y la forma que son trasladados los residuos dentro de la cámara de combustión:

- Parrilla pivotante: Las secciones de parrilla se colocan a través del ancho del horno. Las filas se mueven mecánicamente para producir un movimiento hacia arriba y hacia delante, avanzando y agitando los residuos.
- Parrilla alternada: la parrilla está compuesta por módulos individuales con series de bloques alternados fijos y móviles. Los bloques de parrilla móviles accionados hidráulicamente se mueven adelante y atrás, agitando y mezclando los residuos mientras los traslada por la cámara de combustión.
- Parrilla móvil: la parrilla está compuesta por una banda o correa continua metálica que transporta mecánicamente los residuos dentro de la cámara de combustión.
- Parrilla de rodillos está compuesta por una serie de rodillos alternados que mezcla y transporta mecánicamente los residuos dentro de la cámara de combustión.

La temperatura de incineración es de alrededor de 850°C, para reducir emisiones de carbono. Esta temperatura debe mantenerse durante al menos 2 segundos.

El aire necesario para el proceso se añade en diferentes etapas y puede ser inyectado a través de la parrilla, cuya función es la de actuar como aire de combustión, o bien, puede ser inyectado por encima del lecho de residuos con el objetivo de completar la combustión.

La incineración se hace con más aire del que se necesita teóricamente, para asegurar la combustión de todos los residuos.

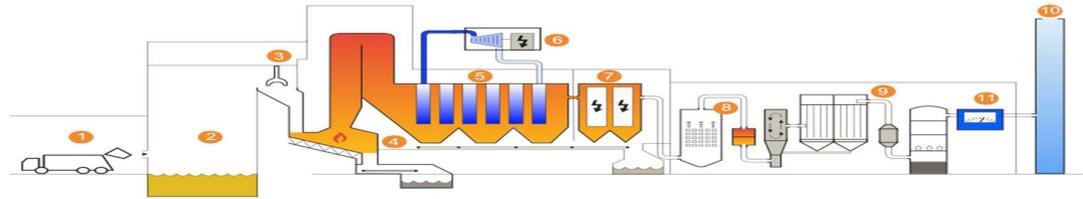
La recuperación de energía se lleva a cabo a través de una caldera e intercambiadores de calor y/o turbinas a vapor, según se quiera obtener calor, energía eléctrica o ambas.

Posteriormente, las cenizas producidas en este proceso deberán ser procesadas y eventualmente tratadas para su revalorización, en otros usos, como aditivo de cemento o en otros materiales de construcción, o en su defecto depositarse de forma adecuada dependiendo de su toxicidad.

La cantidad y características de las cenizas o residuos de los procesos de tratamiento de los gases de escape dependen de la o las tecnologías de limpieza empleadas.

### Componentes principales

Una planta de incineración de residuos moderna consta de los siguientes componentes:



**Figura 3-7: Componentes principales – Planta de Combustión de Parrilla**

Dónde:

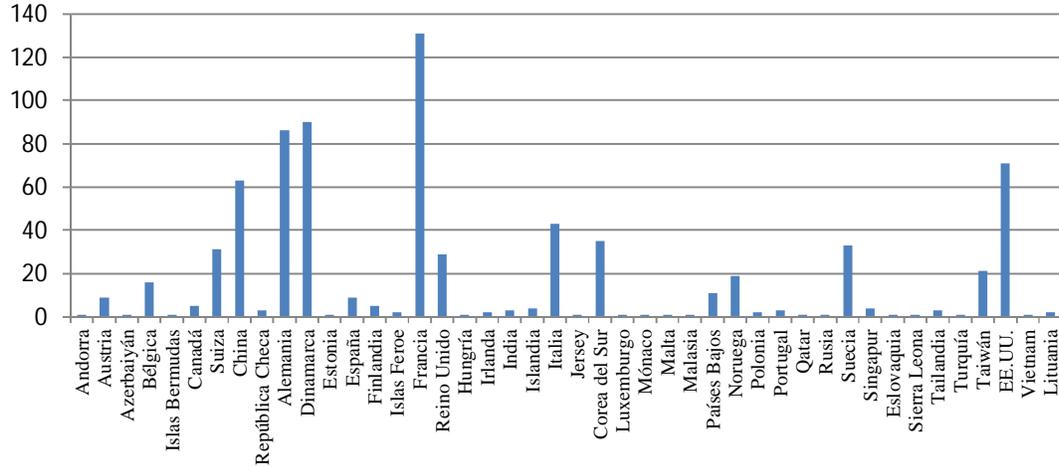
1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Depósito de residuos
3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Incinerador de Parrilla
5. Caldera de vapor
6. Turbina a Vapor y generador eléctrico
7. Eliminación de polvo (filtro de bolsa o precipitador eléctrico)\*
8. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx)\*
9. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
10. Ventilador y chimenea
11. Sistema de monitoreo de gases

\* Sistemas de tratamiento de gases incluidos en esquema a modo de ejemplo, debido a que existen diversas combinaciones y arreglos de sistemas de tratamiento de gases que cumplen la misma función global.

### Estado a nivel global

Esta tecnología cuenta con el mayor nivel de desarrollo a nivel mundial, contando con un más de 1.271 plantas en todo el mundo (véase Anexo F, listado de plantas). En Europa aproximadamente el 90% de las plantas de aprovechamiento energético de RSD operan con esta tecnología. En América Latina existe una planta actualmente en construcción en Ciudad de México, con una capacidad de 4.500 to/día y aproximadamente 1.600.000 ton/año. En los últimos 10 a 15 años se han construido más de 100 nuevas

plantas con esta tecnología, y sigue siendo la tecnología principal desarrollada globalmente. En la Figura 3-8, se muestra el número de plantas desarrolladas por país, excluyendo Japón, donde existen más de 600 plantas con esta tecnología.

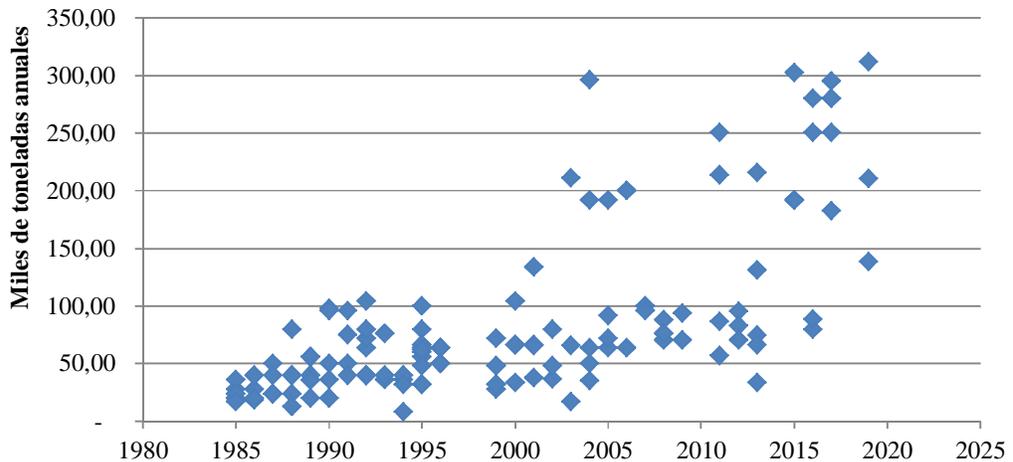


**Figura 3-8: Número de plantas WTE de combustión de parrilla por país**

**3.2.5.4 Condiciones de operación**

La capacidad operativa típica de una planta de combustión va desde los 150.000 a 330.000 toneladas por línea al año, aunque existen diseños de plantas de hasta 500.000 toneladas por línea, pero estos proyectos aún no se han construido. En lugares con condiciones particulares de los mercados locales existen plantas más pequeñas en operación, con capacidad desde 8.000 toneladas procesadas por año (UIOM d'Aurillac, Francia operado por Veolia, 2,5 toneladas por hora).

La tendencia en la capacidad por línea de proceso ha ido aumentando en el tiempo conforme se desarrolla la tecnología. Esa tendencia se refleja en la Figura 3-9 que representa los proyectos de referencia de Babcock & Wilcox Vølund A/S, uno de los proveedores principales en el rubro de WTE.

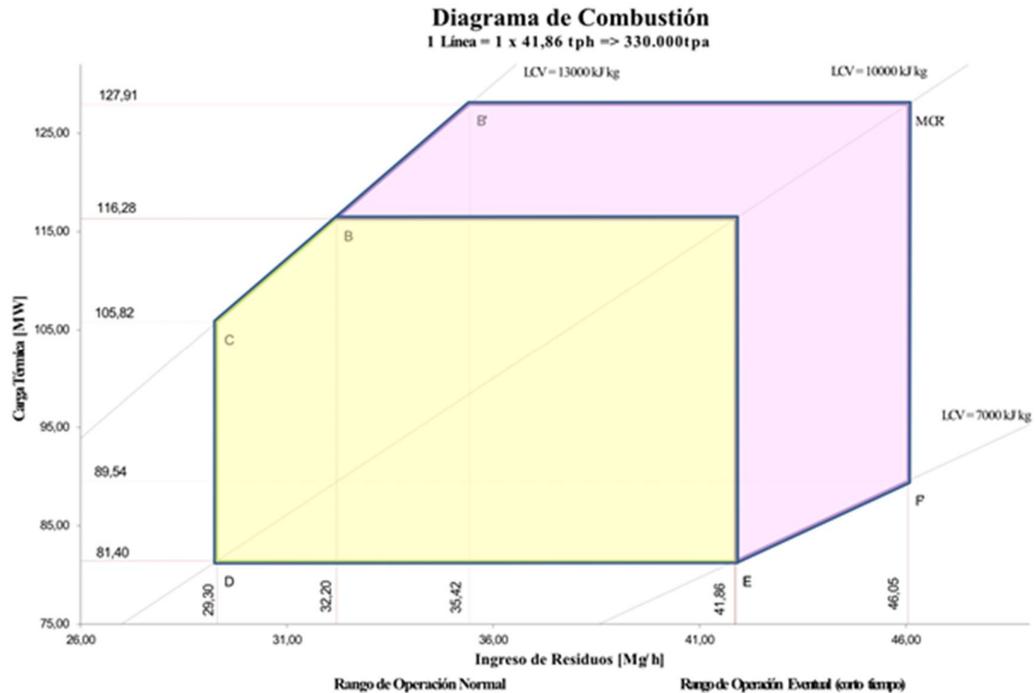


**Figura 3-9: Capacidad anual por línea de procesos de proyectos construidos o en construcción**

**Rangos de Operación**

La tecnología de combustión de parrilla es muy versátil en los rangos de operación, y en general en una planta se encuentra limitada por:

- **Sistema de refrigeración de la parrilla**, que limita el poder calorífico máximo de los residuos (línea B-C).
- **Capacidad del sistema de tratamiento de gases**, que limita la cantidad de toneladas tratadas por hora.
- **Capacidad del sistema de recuperación de energía**, que limita la máxima energía térmica total producida por la combustión que es factible recuperar en energía térmica o eléctrica, y la mínima energía térmica necesaria para mantener la planta en operación sin tener que incorporar otra fuente de calor (para residuos de muy bajo poder calorífico se pueden incorporar otras fuentes de calor, como gas natural).



**Figura 3-10: Diagrama de combustión, una línea de proceso de combustión de parrilla con capacidad de 330.000 ton anuales**

## Mantenimiento y Vida Útil

En términos generales, las labores de mantenimiento de estas plantas se pueden clasificar en tres grandes ítems: mantenimiento menor, mantenimiento mayor y reemplazo de los equipos.

**Tabla 3-5: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos de componentes principales (años)**

Componente	Vida útil	Mant. menor <sup>1</sup>	Mant. mayor
Grúa	10 – 15	1 <sup>2</sup>	5
Parrilla	40	1	10
Caldera	400.000 h	5	10
Manejo de cenizas y escoria	40	1 – 5	5 – 10
Tratamiento de gases de combustión:			
• Precipitador electrostático	40	1	10
• Filtros de bolsa	40	1	5 <sup>3</sup>
• Sistemas de eliminación SO <sub>2</sub> /HCl/Hg	40	1	5
Ventilador	40	5	10
Turbina	40	5	10 – 20 <sup>4</sup>
Generador	40	5	10 – 20
Transformador	20	5	10
Instrumentación & Control	10 – 20	1 – 5	5 – 10

Nota 1: Incluye reemplazo de repuestos definido en el manual de mantenimiento del proveedor

Nota 2: Incluye verificación de seguridad

Nota 3: Incluye reemplazo de los filtros

Nota 4: Apertura de la caja solo en caso de problema con vibraciones o depósitos en las aspas

Para el caso de las calderas, la vida útil está dada por el número de horas de operación y la cantidad de ciclos de partida y parada, debido a que es durante estos procesos que se genera el mayor desgaste a los equipos. Normalmente los ciclos de partida y parada se consideran como una cantidad de horas adicionales a la operación por cada ciclo.

Existen plantas que han sido decomisionadas antes de los 40 años de vida útil, debido a razones no técnicas, principalmente por cambios de regulación ambiental, que ante la alternativa de mejorar o reemplazar la planta, en general se opta por el reemplazo de la planta por una más moderna.

## Emisiones

En general, es una exigencia al operador de una planta WTE emitir un informe anual con los registros de mediciones atmosféricas certificadas y normalizadas. Por ello se cuenta con un registro extenso de valores empíricos de emisiones. En base de estos datos, en la Tabla 3-6 se presentan los rangos típicos permitidos por cada grupo de contaminantes. Como referencia, se han indicado los límites de la norma europea donde se puede observar que las plantas en operación cumplen con los requisitos regulatorios.

**Tabla 3-6: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de combustión de parrilla<sup>68</sup>**

Contaminante		Rangos típicos	EU	
Material Particulado	MP	0,1 – 3	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	0,9 – 22	50	mg/Nm <sup>3</sup>
Óxidos de Nitrógeno	NOx	39 – 127	200 – (400 <sup>(1)</sup> )	mg/Nm <sup>3</sup>
Carbono Orgánico Total	COT	0,01 – 1	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono	CO	3,7 – 35	N/A	mg/Nm <sup>3</sup>
Cadmio + Talio y sus compuestos, indicado como metal	Cd + Ti	0,0001 – 0,0065	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	0,0001 – 0,05	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn			mg/Nm <sup>3</sup>
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te	0,002 – 0,005	0,5 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V			mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	0,07 – 6,5	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	< 0,001 – 0,009	1,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas y furanos	TEQ	0,0000016 – 0,02	0,1	ng/Nm <sup>3</sup>

### Residuos del proceso

Aunque el proceso de combustión logra la oxidación de gran parte de los residuos, aún existe un remanente final que requiere ser tratado, revalorizado o enviado a rellenos sanitarios para su disposición final. En términos generales, los residuos son:

- Cenizas de fondo, aproximadamente 246 kg/ton de RSD tratada (6,6% del volumen de residuo tratado), que están compuestas por material particulado que se deposita gravitacionalmente al fondo de la cámara de combustión → Enviadas a rellenos sanitarios o tratadas para su uso como aditivo del cemento para construcción de pavimentos o elementos prefabricados.
- Cenizas volantes, aproximadamente 26 kg/ton de RSD tratada (<1% del volumen de residuo tratado), que está compuesta por material particulado fino que es capturado en las etapas de enfriamiento de los gases de escape → Enviadas a rellenos sanitarios/relleno de seguridad según su composición. La composición de las cenizas volantes dependen directamente de la calidad de residuo y del sistema de pre-tratamiento.

<sup>68</sup> Elaboración propia en base a informes de emisiones de 22 plantas en operación comercial en Europa.

**Uso de terreno de instalaciones típicas**

Las instalaciones consideran un terreno que abarca la planta y las instalaciones anexas y áreas de maniobra y circulación propias de una planta, con esto los tamaños típicos de una planta de acuerdo a su capacidad son:

- 1 línea (150.000 ton/año-planta) → 45.000 – 50.000 m<sup>2</sup>
- 1 línea (330.000 ton/año-planta) → 80.000 – 85.000 m<sup>2</sup>
- 3 líneas (1.000.000 ton/año-planta) → 100.000 – 120.000 m<sup>2</sup>

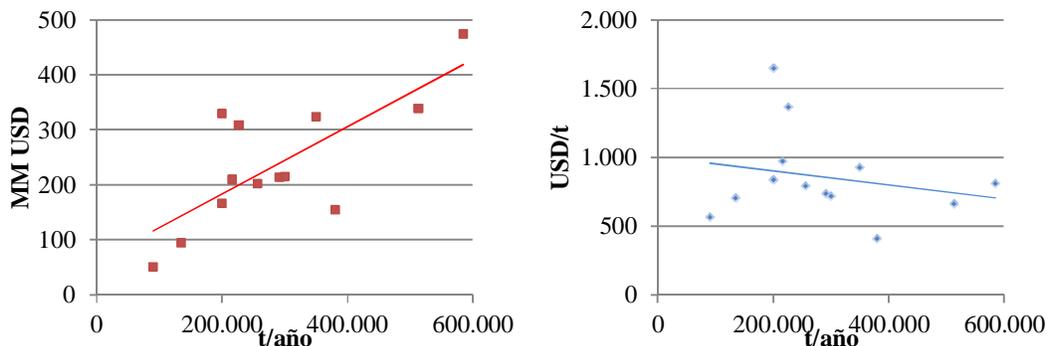
Sin embargo, existen varias plantas compactas donde el diseño fue optimizado de acuerdo a la disponibilidad de espacio. Estas plantas compactas y su implicación al CAPEX deben ser analizadas individualmente.

**3.2.5.5 Costos de Inversión**

Los costos típicos de inversión (CAPEX) de este tipo de tecnología varían para cada proyecto en particular. Sin embargo, en términos generales los costos de inversión totales de la planta, excluyendo el costo de desarrollo, terreno, accesos y conexión a servicios, para cada tamaño representativo son:

- 1 línea (150.000 ton/año/planta) → 115 millones de USD
- 1 línea (330.000 ton/año/planta) → 180 millones de USD
- 3 líneas (1.000.000 ton/año/planta) → 425 millones de USD

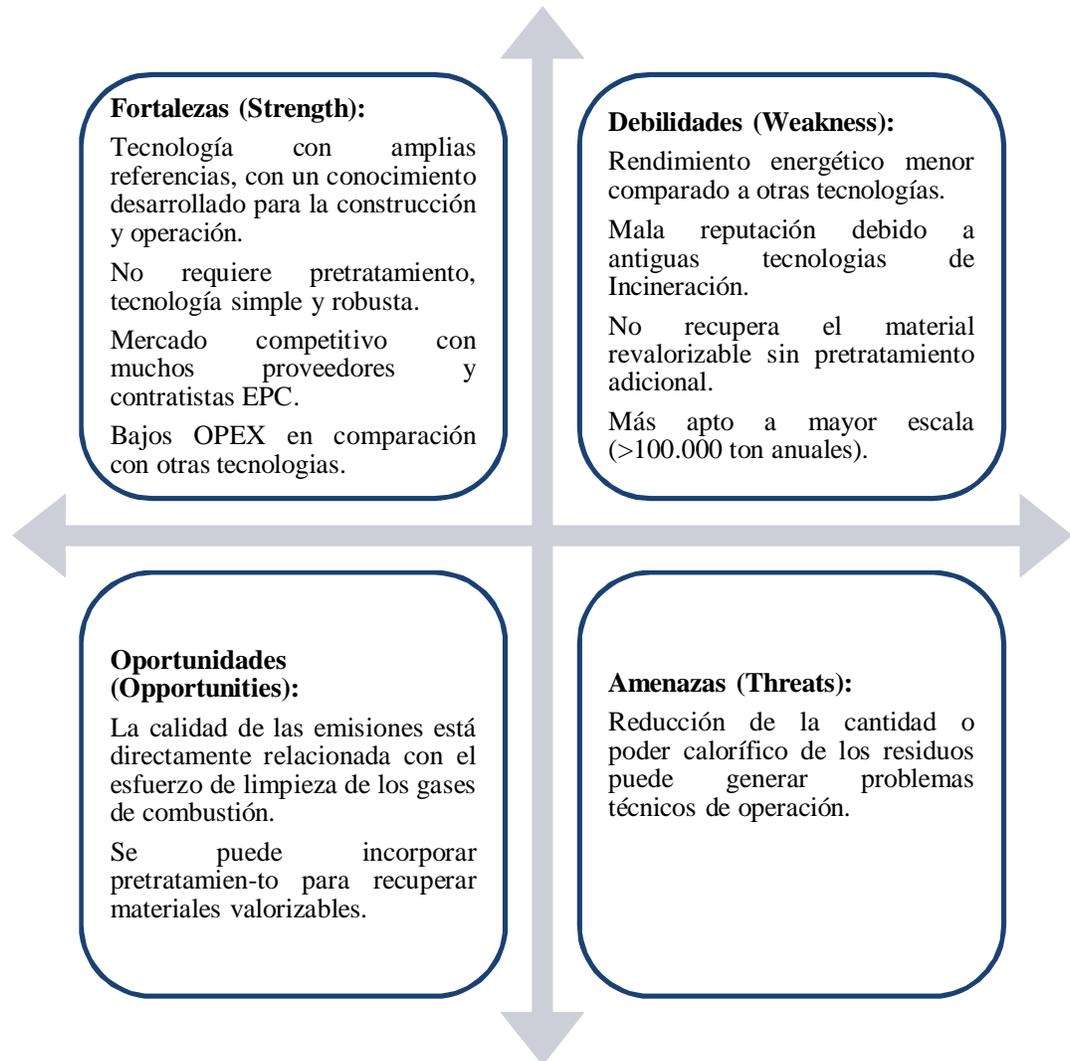
Un factor importante en la definición del CAPEX es la economía de escala en los proyectos. En base a 13 proyectos realizados bajo el esquema llave en mano por la empresa Hitachi-Zosen, considerando proyectos en Europa y Asia, se ha elaborado la Figura 3-11. En ella se puede observar una gran dispersión de costos por el mismo rango de tamaño de planta, la cual puede ser explicada por las características y particularidades locales de cada proyecto, como por ejemplo, la disponibilidad de espacio (requerimiento de un diseño compacto), exigencias en tratamiento de gases, diferencias en normas de construcción por la parte civil, arquitectura, etc. Sin embargo, se puede observar la tendencia de reducción del costo unitario con mayor tamaño de planta. El costo por tonelada procesada baja desde 760 USD/t hasta cerca de 425 USD/t reduciendo un 40% los costos por tonelada. Por la pequeña cantidad de plantas o datos en esta magnitud, se debe considerar la curva en el extremo alto solamente como valores referenciales.



**Figura 3-11: Costos de inversión para proyectos llave en mano de Hitachi Zosen**

**3.2.5.6 Resumen y Análisis FODA (SWOT)**

Se ha elaborado un análisis FODA para el aprovechamiento energético de residuos sólidos domiciliarios mediante combustión con parilla y las sub-tecnologías mencionadas en la sección 3.2.5.1.



## Resumen

La Tabla 3-7 resume las características principales de la tecnología de combustión de parrilla para 3 tamaños de planta diferentes, presentando una imagen general de las características y potenciales economías de escala de esta tecnología. Estos valores son referenciales y cada planta debe ser diseñada de acuerdo a las condiciones y regulaciones propias del proyecto.

**Tabla 3-7: Resumen de características de tecnología de combustión de parrilla**

Valores Típicos	1 línea menor tamaño	1 línea mayor tamaño	3 líneas mayor tamaño
Capacidad	150.000 ton/año	330.000 ton/año	1.000.000 ton/año
Eficiencia Eléctrica	15 %	17 %	< 20 %
Generación Eléctrica	7 a 8 MW	16 a 18 MW	60 a 65 MW
Consumos auxiliares <sup>(1)</sup>	~ 15 %	~ 8 %	~ 5 %
Tamaño instalaciones	4,5 a 5,0 ha	8,0 a 8,5 ha	10,0 a 12,0 ha
Personal de O&M requerido	26	29	52
CAPEX	115 MM USD	180 MM USD	425 MM USD

Nota 1: en porcentaje de la generación eléctrica

### 3.2.6 Combustión en Horno Rotatorio

#### 3.2.6.1 Descripción general

La tecnología de combustión en horno rotatorio utiliza una tecnología similar a la de la industria del cemento, donde la cámara de combustión consiste en un cilindro ligeramente inclinado en su eje horizontal, con el fin de generar el flujo de material mientras el cilindro gira.

En particular esta tecnología puede ser utilizada para una gran variedad de residuos con un tiempo de permanencia dentro del horno que asegura una buena combustión de los residuos, pero limita su capacidad. Es por esto que esta tecnología se ha desarrollado y es más utilizada para el tratamiento de residuos peligrosos. De este proceso se obtiene calor, el cual es conducido a una caldera.

La recuperación de la energía se puede realizar a través de distintos tipos de caldera dependiendo del uso final de la energía, agua caliente, calefacción distrital, vapor industrial, electricidad o sus combinaciones. En la Figura 3-6 se pueden ver los distintos esquemas posibles con esta tecnología.

#### 3.2.6.2 Pre-tratamiento

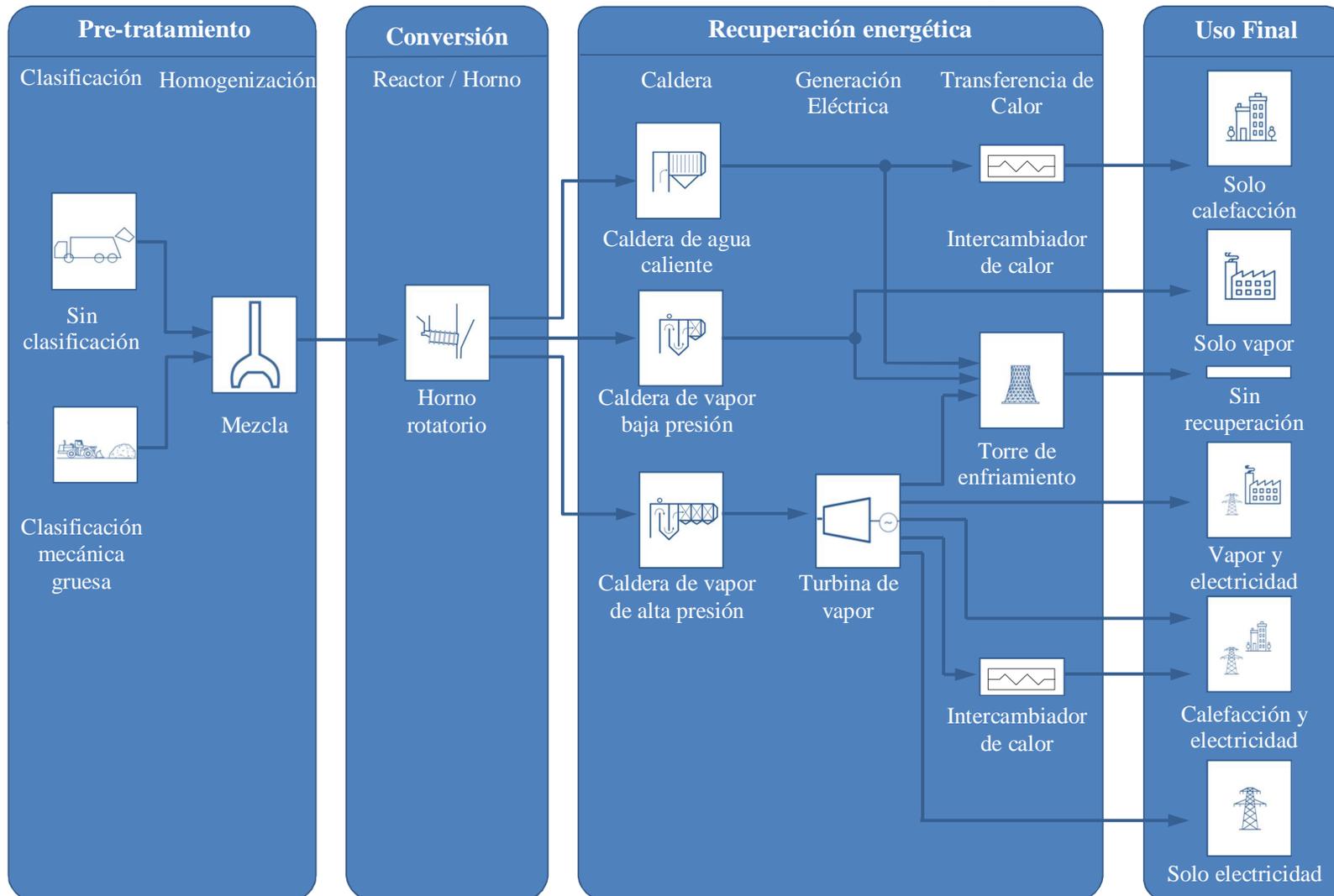
La combustión de horno no requiere pre-tratamiento, solo se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta, y en algunas ocasiones se aplica una trituración previa a la alimentación al horno para reducir el tamaño y homogeneizar el material (RDF-1). Sin embargo, esta tecnología también es utilizada en sistemas de pre-tratamiento avanzado para la fracción combustible no reciclable de los residuos.

Este tipo de tecnología se utiliza principalmente para residuos biológicos clínicos o residuos peligrosos, sin embargo también es utilizada para residuos sólidos municipales (que incluyen a los RSD), siendo muy versátil en términos de la distribución porcentual de los mismos, sin generar mayores complicaciones para la operación.

**Tabla 3-8: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	1 a 500 mm
Poder calorífico máximo	7 – 18 MJ/kg
Poder calorífico típico	8 – 10 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes (<500 mm)
Pre-tratamiento opcional	Trituración

Como pre-tratamiento opcional para esta tecnología se utiliza la trituración que se realiza para homogeneizar los residuos y aumentar el área superficial específica. La homogenización de los residuos mejora las condiciones de operación y el aumento del área de contacto permite una mejor transferencia de calor y posterior oxidación de los residuos, mejorando la eficiencia del proceso de combustión.



**Figura 3-12: Esquema general combustión de horno rotatorio**

### 3.2.6.3 Conversión

La cámara de combustión consiste en un cilindro ligeramente inclinado en su eje horizontal, con el fin de generar el flujo de material mientras gira.

La rotación del cilindro se logra a través de rodillos que se encuentran bajo éste, permitiendo que los residuos se muevan a través del horno tanto por la gravedad como por efecto de la rotación.

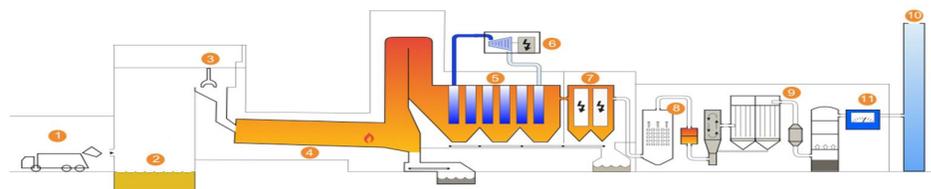
Las paredes del horno son de material refractario, que debido a las condiciones de operación puede dañarse por estrés térmico. En consecuencia, algunos hornos tienen una camisa refrigerada por aire o agua, que ayuda a extender la vida útil del material refractario, lo que permite reducir el número de paradas para mantención.

El tiempo de residencia del material dentro del horno depende del ángulo de inclinación y velocidad de rotación del cilindro, y suele ser de entre 30 a 90 minutos aproximadamente, suficientes para asegurar una buena combustión del material.

Los gases de escape generados en el horno rotativo son tratados en una cámara de post-combustión. Con el fin de asegurar las temperaturas necesarias para la destrucción de los compuestos orgánicos (850°C – 1.200°C), la cámara de post-combustión está equipada con quemadores que se accionan automáticamente en caso de que la temperatura disminuya bajo los valores dados. Esto hace que esta tecnología sea capaz de tratar residuos muy diversos sin requerir de un gran sistema de pre-tratamiento y homogenización.

Si bien se puede tratar cualquier tipo de residuo, para lograr la temperatura necesaria se requiere de combustible adicional, lo que encarece el proceso. Además, la capacidad de estos hornos se ve limitada por su diámetro, es decir, para aumentar la capacidad es necesario un horno más grande, con el consecuente aumento en el costo.

#### Componentes principales



**Figura 3-13 Componentes Principales – Planta de Combustión de Horno Rotatorio**

Una instalación de incineración de horno rotatorio se compone principalmente de un sector de acopio y alimentación, una cámara de combustión y una cámara de post-combustión.

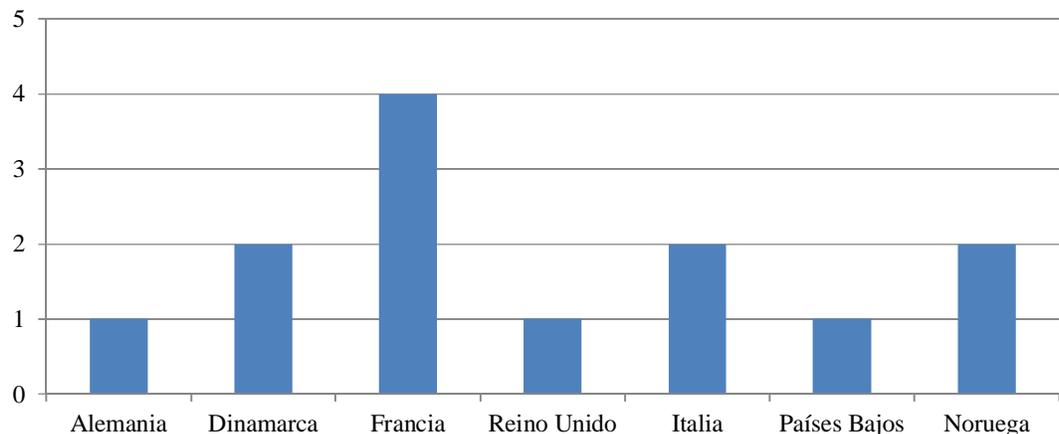
Los sistemas de entrega, descarga y almacenamiento de desechos sólidos son similares a los de horno de parrilla.

1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Depósito de residuos
3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Horno Rotatorio
5. Caldera de vapor
6. Turbina a Vapor y generador eléctrico
7. Eliminación de polvo (filtro de bolsa o precipitador eléctrico)\*
8. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx)\*
9. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
10. Ventilador y chimenea
11. Sistema de monitoreo de gases

**Estado a nivel global**

Esta tecnología cuenta con desarrollo a nivel mundial con plantas y líneas dentro de plantas de gestión integral de residuos, pero sólo para uso con residuos peligrosos y residuos biológicos. Se conocen al menos 13 plantas en el mundo destinadas a los RSD.

Su utilización se enfoca principalmente para tratamiento de residuos peligrosos y residuos biológicos infecciosos, tratando en total más de dos millones de toneladas por año. Por lo tanto, muchas veces está instalada en paralelo en centros integrales de gestión de residuos, abarcando solamente los residuos peligrosos anteriormente separados de los RSD recolectados.



**Figura 3-14: Número de plantas WTE de combustión de RSD en horno rotatorio por país**

### 3.2.6.4 Condiciones de operación

La capacidad operativa típica de una planta de combustión va desde los 10.000 a 100.000 toneladas por línea al año, existiendo plantas de hasta 300.000 toneladas anuales con tres líneas de operación. El primer tamaño es típico para plantas instaladas en hospitales. El tamaño mayor de una línea corresponde a plantas instaladas en sectores industriales, para la eliminación de residuos tóxicos peligrosos, como por ejemplo químicos, residuos de industria pesada y de munición, etc.

#### Mantenimiento y Vida Útil

En términos generales, las labores de mantenimiento de estas plantas se pueden clasificar en tres grandes ítems: mantenimiento menor, mantenimiento mayor y reemplazo de los equipos.

**Tabla 3-9: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)**

Componente	Vida útil	Mant. menor <sup>1</sup>	Mant. mayor
Grúa	10 – 15	1 <sup>2</sup>	5
Horno rotatorio	40	1	5
Caldera	400.000 h	5	10
Manejo de cenizas y escoria	40	1 – 5	5 – 10
Tratamiento de gases de combustión:			
• Precipitador electrostático	40	1	10
• Filtros de bolsa	40	1	5 <sup>3</sup>
• Sistemas de eliminación SO <sub>2</sub> /HCl/Hg	40	1	5
Ventilador	40	5	10
Turbina	40	5	10 – 20 <sup>4</sup>
Generador	40	5	10 – 20
Transformador	20	5	10
Instrumentación & Control	10 – 20	1 – 5	5 – 10

Nota 1: Incluye reemplazo de repuestos definido en el manual de mantenimiento del proveedor

Nota 2: Incluye verificación de seguridad

Nota 3: Incluye reemplazo de los filtros

Nota 4: Apertura de la caja solo en caso de problema con vibraciones o depósitos en las aspas

Para el caso de las calderas, la vida útil está dada por el número de horas de operación y la cantidad de ciclos de partida y parada, debido a que es durante estos procesos que se genera el mayor desgaste a los equipos. Normalmente los ciclos de partida y parada se consideran como una cantidad de horas adicionales a la operación por cada ciclo.

#### Emisiones

En general es una exigencia al operador de una planta WTE emitir un informe anual con los registros de mediciones atmosféricas certificadas y normalizadas. Por lo que se cuenta con un registro extenso de valores empíricos de emisiones. En base de estos datos, en la Tabla 3-10 se presentan los rangos típicos por cada grupo de contaminantes. Como referencia se han indicado los límites de la norma europea donde se puede observar que las plantas en operación cumplen con los requisitos regulatorios.

**Tabla 3-10: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de combustión de Horno Rotatorio<sup>69</sup>**

Contaminante		Rangos típicos	EU	
Material particulado	MP	0,25 – 2,6	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	15 – 30	50	mg/Nm <sup>3</sup>
Óxidos de nitrógeno	NO <sub>x</sub>	110 – 160	200 – (400 <sup>(1)</sup> )	mg/Nm <sup>3</sup>
Carbono orgánico total	COT	0,6 – 1,5	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Monóxido de carbono	CO	3 – 20	N/A	mg/Nm <sup>3</sup>
Cadmio + Talio y sus compuestos, indicado como metal	Cd + Ti	Sin info.	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	Sin info.	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn	Sin info.	0,5 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te			mg/Nm <sup>3</sup>
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V			mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	2 – 6	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	Sin info.	1,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas y furanos	TEQ	Sin info.	0,1	ng/Nm <sup>3</sup>

### Residuos del proceso

Aunque el proceso de combustión logra la oxidación de gran parte de los residuos, aún existe un remanente final que requiere ser tratado, revalorizado o enviado a rellenos sanitarios para su disposición final. En términos generales, los residuos son:

- Cenizas de fondo, aproximadamente 180 kg/ton de RSD tratada (4,8% del volumen de residuo tratado), que están compuestas por material particulado que se deposita gravitacionalmente al fondo de la cámara de combustión → Enviadas a rellenos sanitarios o tratadas para su uso como aditivo del cemento para construcción de pavimentos o elementos prefabricados.
- Cenizas volantes, aproximadamente 96 kg/ton de RSD tratada (2,6% del volumen de residuo tratado), que está compuesta por material particulado fino que es capturado en las etapas de tiramiento de los gases de escape → Enviadas a rellenos sanitarios/relleno de seguridad según su composición. La composición de las cenizas volantes dependen directamente de la calidad de residuo y del sistema de pre-tratamiento.

<sup>69</sup> En base a informes de emisiones de plantas en operación

### Uso de terreno de instalaciones típicas

Las instalaciones consideran un terreno que abarca la planta y las instalaciones anexas junto a áreas de maniobra y circulación propias de una planta, con esto los tamaños típicos de la una planta de acuerdo a su capacidad son:

- 1 línea (10.000 ton/año-planta) → 40.000 – 50.000 m<sup>2</sup>
- 1 línea (100.000 ton/año-planta) → 75.000 – 85.000 m<sup>2</sup>
- 3 líneas (300.000 ton/año-planta) → 90.000 – 110.000 m<sup>2</sup>

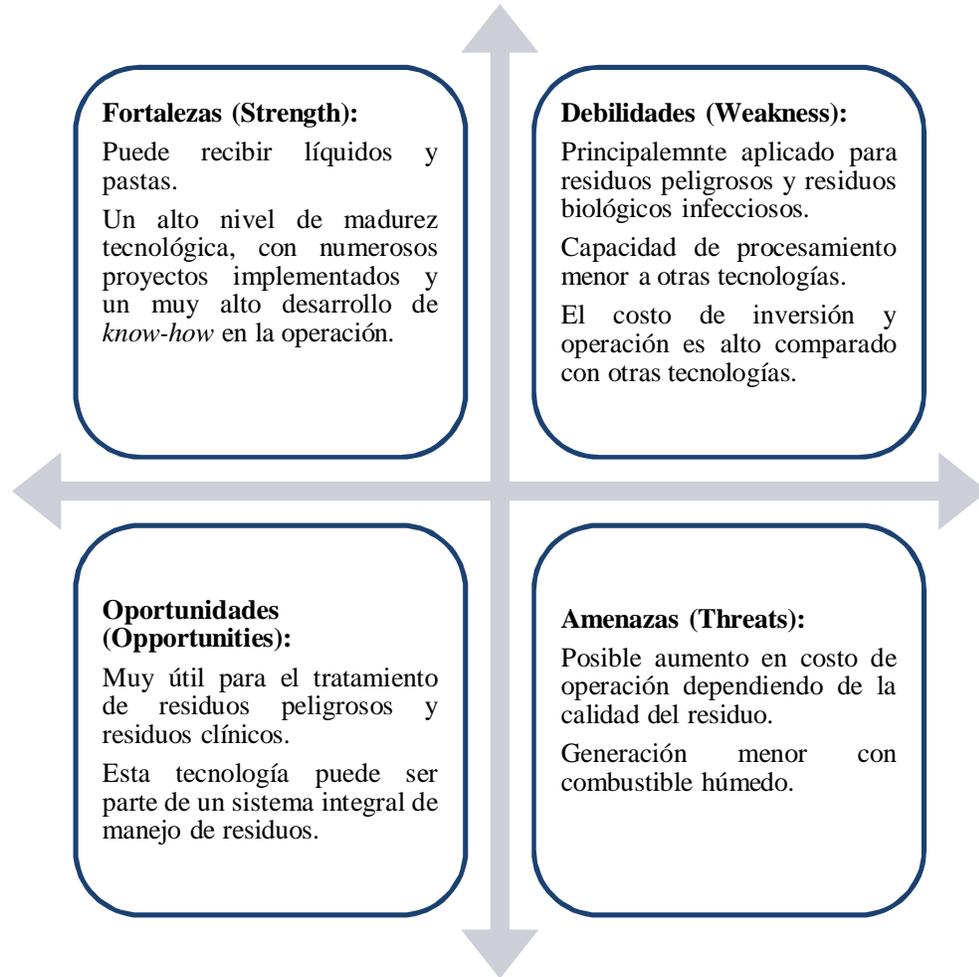
El tamaño y disposición horizontal del horno rotatorio genera que la planta tenga requerimientos mayores de espacio que en las otras tecnologías.

### 3.2.6.5 Costos de Inversión

Los costos típicos de inversión de este tipo de tecnología varían para cada proyecto en particular, sin embargo, en términos generales los costos de inversión totales de la planta, excluyendo el costo de desarrollo, terreno, accesos y conexión a servicios, para cada tamaño representativo son:

- 1 línea (10.000 ton/año/planta) → 240 millones de USD
- 1 línea (100.000 ton/año-planta) → 400 millones de USD
- 3 líneas (300.000 ton/año-planta) → 800 millones de USD

### 3.2.6.6 Resumen y Análisis FODA (SWOT)



#### Resumen

A continuación se presenta una tabla resumen con las características principales de la tecnología de combustión de horno rotatorio para 3 tamaños diferentes de plantas.

**Tabla 3-11: Resumen de características de tecnología de horno rotatorio**

Valores Típicos	1 línea menor tamaño	1 línea mayor tamaño	3 líneas mayor tamaño
Capacidad	10.000 ton/año	100.000 ton/año	300.000 ton/año
Eficiencia Eléctrica	10 %	12 %	15 %
Generación Eléctrica	0,26 a 0,31 MW	3,4 a 4,0 MW	13 a 15 MW
Consumos auxiliares <sup>(1)</sup>	~ 10 %	~ 8 %	~ 7 %
Tamaño instalaciones	4,0 a 5,0 ha	7,5 a 8,5 ha	9,0 a 11,0 ha
Personal de O&M Requerido	26	29	52
CAPEX	240	400	800

Nota 1: en porcentaje de la generación eléctrica

### 3.2.7 Combustión de Lecho Fluidizado

#### 3.2.7.1 Descripción general

La incineración de lecho fluidizado necesita pre-tratamiento de los residuos, considerando al menos la reducción del tamaño, y normalmente la clasificación y retiro de los metales, vidrios y arenas.

Los residuos pretratados son incorporados a la cámara de combustión sobre un lecho de arena o caliza, ubicada en el fondo de la cámara de combustión. Desde el fondo de la cámara se inyecta aire u oxígeno, que permite la fluidización del lecho y la combustión de los residuos. De este proceso se obtiene calor, el cual es conducido a una caldera.

La recuperación de la energía se puede realizar a través de distintos tipos de caldera dependiendo del uso final de la energía, agua caliente, calefacción distrital, vapor industrial, electricidad o sus combinaciones. En la Figura 3-15 se pueden ver los distintos esquemas posibles con esta tecnología.

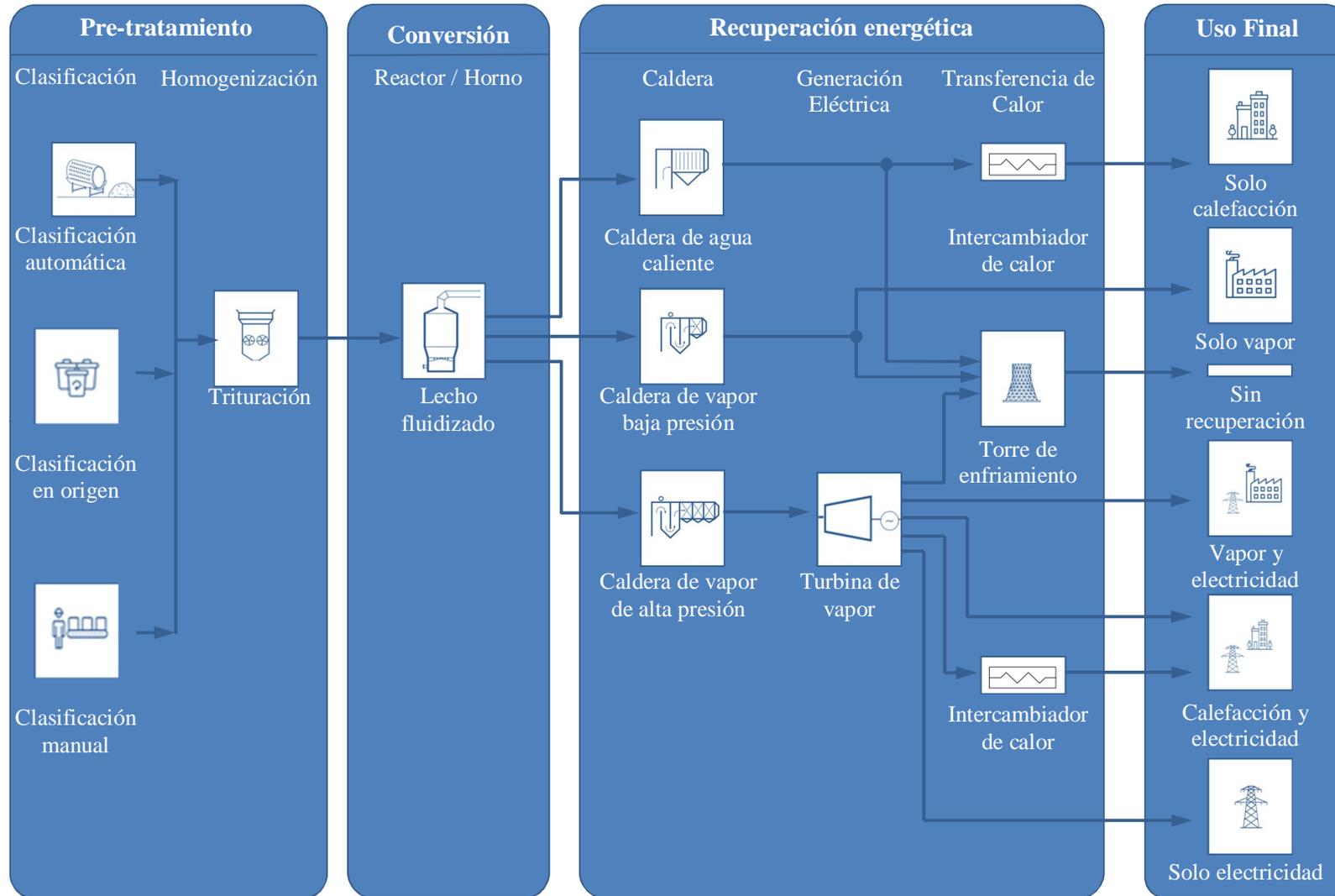
#### 3.2.7.2 Pre-tratamiento

La combustión de lecho fluidizado necesita un buen nivel de pre-tratamiento de los residuos. Como mínimo, se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta y se reduce el tamaño de los residuos por un sistema de una o varias etapas de trituración a un tamaño, usualmente menor a 5 cm (RDF-2), aunque también hay plantas de menores tamaños.

En general, para esta tecnología se aplican distintos sistemas de clasificación para el retiro de los metales férricos, vidrio, metales no férricos, y otros elementos reciclables y residuos con alto contenido orgánico (RDF-3).

**Tabla 3-12: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	1 a 5 mm
Poder calorífico máximo	5,5 a 30 MJ/kg
Poder calorífico típico	8 a 20 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes Trituración primaria/secundaria (< 5 cm) [RDF – 2 o RDF – 3]
Pre-tratamiento opcional	Clasificación manual Clasificación automática



**Figura 3-15: Esquema general Combustión de Lecho Fluidizado**

Los pre-tratamientos opcionales son:

- **Clasificación manual:** Permite la clasificación de materiales reciclables o aprovechables en otras tecnologías, sus efectos dependen de qué materiales se están recuperando,
- **Clasificación automática:**
  - **Clasificación con aire:** permite la separación de papeles y plásticos, reduciendo el poder calorífico.
  - **Tamizado:** permite retirar cenizas, polvo, vidrios y arenas, aumentando el poder calorífico, reduciendo la escoria y cenizas.
  - **Separación Magnética:** permite la separación y recuperación de metales férricos de los residuos, incrementando el poder calorífico, reduciendo la escoria y cenizas.
  - **Separación Eléctrica:** permite la separación y recuperación de metales no férricos, principalmente aluminio y envases tetra pack.

### 3.2.7.3 Conversión

Un horno de lecho fluidizado consiste en una cámara cilíndrica vertical, cuya parte inferior está formada por un lecho de material inerte, típicamente de arena o caliza.

Por la parte inferior del lecho, se inyecta aire para conseguir la fluidización del material inerte, que además de “fluidizar” el lecho, actúa como comburente y se conoce como aire primario. El aire secundario se utiliza para la combustión completa de los gases.

Según el movimiento del lecho, se diferencian en:

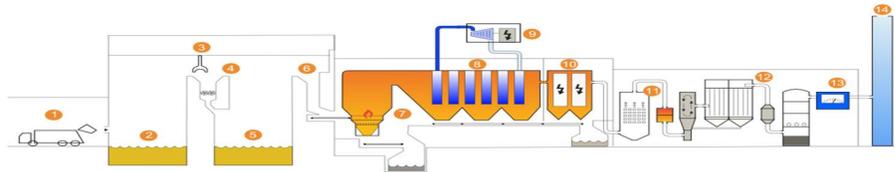
- Lecho fluidizado burbujeante (*Bubbling Fluidized Bed – BFB*): se hace pasar aire por la parte inferior del horno hasta hacer burbujear el lecho manteniéndolo en suspensión. La velocidad de fluidización es aproximadamente dos veces la mínima. Las cenizas volantes se arrastran con los gases de combustión y las escorias son recogidas por la parte inferior del horno.
- Lecho fluidizado circulante (*Circulating Fluidized Bed – CFB*): esta tecnología fue desarrollada con la intención de mejorar el lecho burbujeante, para lograr una combustión más completa y un mayor control sobre la temperatura. Se hace entrar el aire de forma tangencial de forma de que el lecho se mueva de forma similar a un ciclón en toda la cámara de combustión. La velocidad de fluidización puede ser de hasta 20 veces la mínima. Esta tecnología permite incinerar partículas de mayor tamaño que el lecho burbujeante. Debido a las altas velocidades, parte del material del lecho se arrastra con los gases de combustión.

En el interior del lecho fluidizado, tiene lugar el secado, volatilización, ignición y combustión de los residuos.

En la parte situada por encima del lecho se alcanzan temperaturas de entre 850°C y 950°C, permitiendo la retención de gases en la zona de combustión, mientras que en el interior del lecho la temperatura es de aproximadamente 650°C.

Los hornos de lecho fluidizado generalmente tienen una buena distribución de temperatura y oxígeno, lo que permite una operación más estable.

### Componentes principales



**Figura 3-16 Componentes principales – Planta de Combustión de Lecho Fluidizado**

Dónde:

1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Depósito de residuos
3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Sistemas de Trituración
5. Depósito de residuos triturados
6. Alimentación de residuos
7. Cámara de combustión de lecho fluidizado
8. Caldera de vapor
9. Turbina a Vapor y generador eléctrico
10. Eliminación de polvo (filtro de bolsa o precipitador eléctrico)\*
11. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx)\*
12. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
13. Sistema de monitoreo de gases
14. Ventilador y chimenea

### Estado a nivel global

Esta tecnología ha sido implementada en los últimos años a nivel mundial, contando con más de 174 plantas en todo el mundo (véase Anexo F, listado de plantas). En el mundo aproximadamente 11 % de las plantas de tratamiento de RSD operan con esta tecnología.

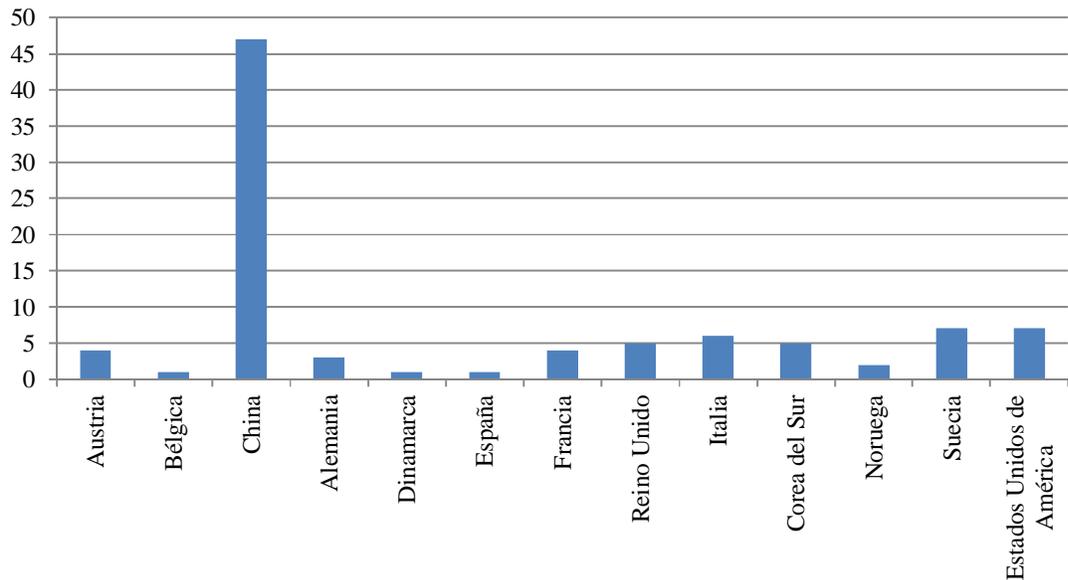


Figura 3-17: Número de plantas WTE de combustión de lecho fluidizado por país

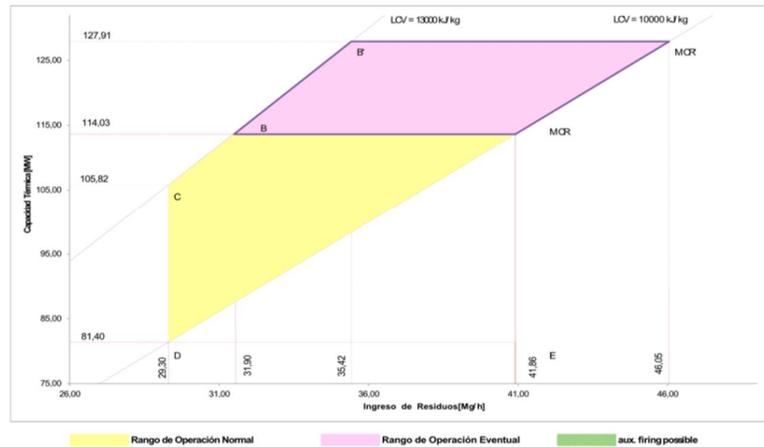
### 3.2.7.4 Condiciones de operación

La capacidad operativa típica de una planta de combustión va desde los 150.000 a 300.000 toneladas por línea al año, existiendo plantas de 700.000 toneladas anuales (Industriepark Höchst cerca de Frankfurt, Alemania), con tres líneas paralelas de proceso. Sin embargo, ya que no existe ninguna restricción técnica, para efectos de comparación se considerará una planta con 3 líneas de 330.000 en los siguientes análisis.

#### Rangos de Operación

La tecnología de combustión de lecho fluidizado es muy versátil en los rangos de operación, y en general en una planta se encuentra limitada por:

- **Sistema de refrigeración de la parrilla** que limita el poder calorífico máximo de los residuos (línea B-C).
- **Capacidad del sistema de tratamiento de gases**, que limita la cantidad de toneladas tratadas por hora.
- **Capacidad del sistema de recuperación de energía**, que limita la máxima energía térmica total producida por la combustión que es factible recuperar en energía térmica o eléctrica, y la mínima energía térmica necesaria para mantener la planta en operación sin tener que incorporar otra fuente de calor (para residuos de muy bajo poder calorífico se pueden incorporar otras fuentes de calor como gas natural).



**Figura 3-18: Diagrama de combustión, una línea de proceso de combustión de lecho fluidizado con capacidad de 330.000 ton anuales**

### Mantenimiento y Vida Útil

En términos generales las labores de mantenimiento de estas plantas se pueden clasificar en tres grandes ítems: mantenimiento menor, mantenimiento mayor y reemplazo de los equipos.

**Tabla 3-13: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)**

Componente	Vida útil	Mant. Menor <sup>1</sup>	Mant. mayor
Pre-tratamiento	15	1 <sup>1</sup>	5
Grúa	10-15	1 <sup>2</sup>	5
Cámara de Combustión	400.000 h	1	5
Caldera	400.000 h	5	10
Manejo de cenizas y escoria	40	1-5	5-10
Tratamiento de gases de combustión:			
• Precipitador electrostático	40	1	10
• Filtros de bolsa	40	1	5 <sup>3</sup>
• Sistemas de eliminación SO <sub>2</sub> /HCl/Hg	40	1	5
Ventilador	40	5	10
Turbina	40	5	10-20 <sup>4</sup>
Generador	40	5	10-20
Transformador	20	5	10
Instrumentación & Control	10-20	1-5	5-10

Nota 1: Incluye reemplazo de repuestos definido en el manual de mantenimiento del proveedor

Nota 2: Incluye verificación de seguridad

Nota 3: Incluye reemplazo de los filtros

Nota 4: Apertura de la caja solo en caso de problema con vibraciones o depósitos en las aspas

Para el caso de las calderas, la vida útil está dada por el número de horas de operación y la cantidad de ciclos de partida y parada, debido a que es durante estos procesos que se genera el mayor desgaste a los equipos. Normalmente los ciclos de partida y parada se consideran como una cantidad de horas adicionales a la operación por cada ciclo.

### Emisiones

En general es una exigencia al operador de una planta WTE emitir un informe anual con los registros de mediciones atmosféricas certificadas y normalizadas. Por ello se cuenta con un registro extenso de valores empíricos de emisiones. En base de estos datos, en la Tabla 3-6 se presentan los rangos típicos por cada grupo de contaminantes. Como referencia se han indicado los límites de la norma europea donde se puede observar que las plantas en operación cumplen con los requisitos regulatorios.

**Tabla 3-14: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de combustión por lecho fluidizado<sup>70</sup>**

Contaminante		Rangos típicos	EU	
Material Particulado	MP	0,1 – 2	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	4,0 – 26,0	50	mg/Nm <sup>3</sup>
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	50 – 140	200	mg/Nm <sup>3</sup>
Carbono Orgánico Total	COT	1,0 – 3,3	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono	CO	3,6 – 45	n.a.	mg/Nm <sup>3</sup>
Cadmio + Talio y sus compuestos, indicado como metal	Cd + Ti	0.0025	0.05	mg/Nm <sup>3</sup>
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	Sin info.	0.05	mg/Nm <sup>3</sup>
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn	0.075	0.5	mg/Nm <sup>3</sup>
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te			mg/Nm <sup>3</sup>
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V			mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	6.5	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	Sin info.	1.0	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas y furanos	TEQ	0.001	0.1	ng/Nm <sup>3</sup>

### Residuos del proceso

Aunque el proceso de combustión logra la oxidación de gran parte de los residuos, aún existe un remanente final que requiere ser tratado, revalorizado o enviado a rellenos sanitarios para su disposición final. En términos generales, los residuos son:

- Cenizas de fondo, aproximadamente 110 kg/ton de RSD tratada (2,9% del volumen de residuo tratado), que están compuestas por material particulado que se

<sup>70</sup> En base a informes de emisiones de plantas en operación

deposita gravitacionalmente al fondo de la cámara de combustión → Enviadas a rellenos sanitarios o tratadas para su uso como aditivo del cemento para construcción de pavimentos o elementos prefabricados.

- Cenizas volantes, aproximadamente 120 kg/ton de RSD tratada (3,2% del volumen de residuo tratado), que está compuesta por material particulado fino que es capturado en las etapas de tiramiento de los gases de escape → Enviadas a rellenos sanitarios/relleno de seguridad según su composición. La composición de las cenizas volantes dependen directamente de la calidad de residuo y del sistema de pre-tratamiento.

### **Tamaño típico de las instalaciones**

Las instalaciones consideran un terreno que abarca la planta y las instalaciones anexas y áreas de maniobra y circulación propias de una planta. Con esto, los tamaños típicos de una planta de acuerdo a su capacidad son:

- 1 línea (150.000 ton/año-planta) → 45.000 – 50.000 m<sup>2</sup>
- 1 línea (300.000 ton/año-planta) → 80.000 – 85.000 m<sup>2</sup>
- 3 líneas (1.000.000 ton/año-planta) → 100.000 – 120.000 m<sup>2</sup>

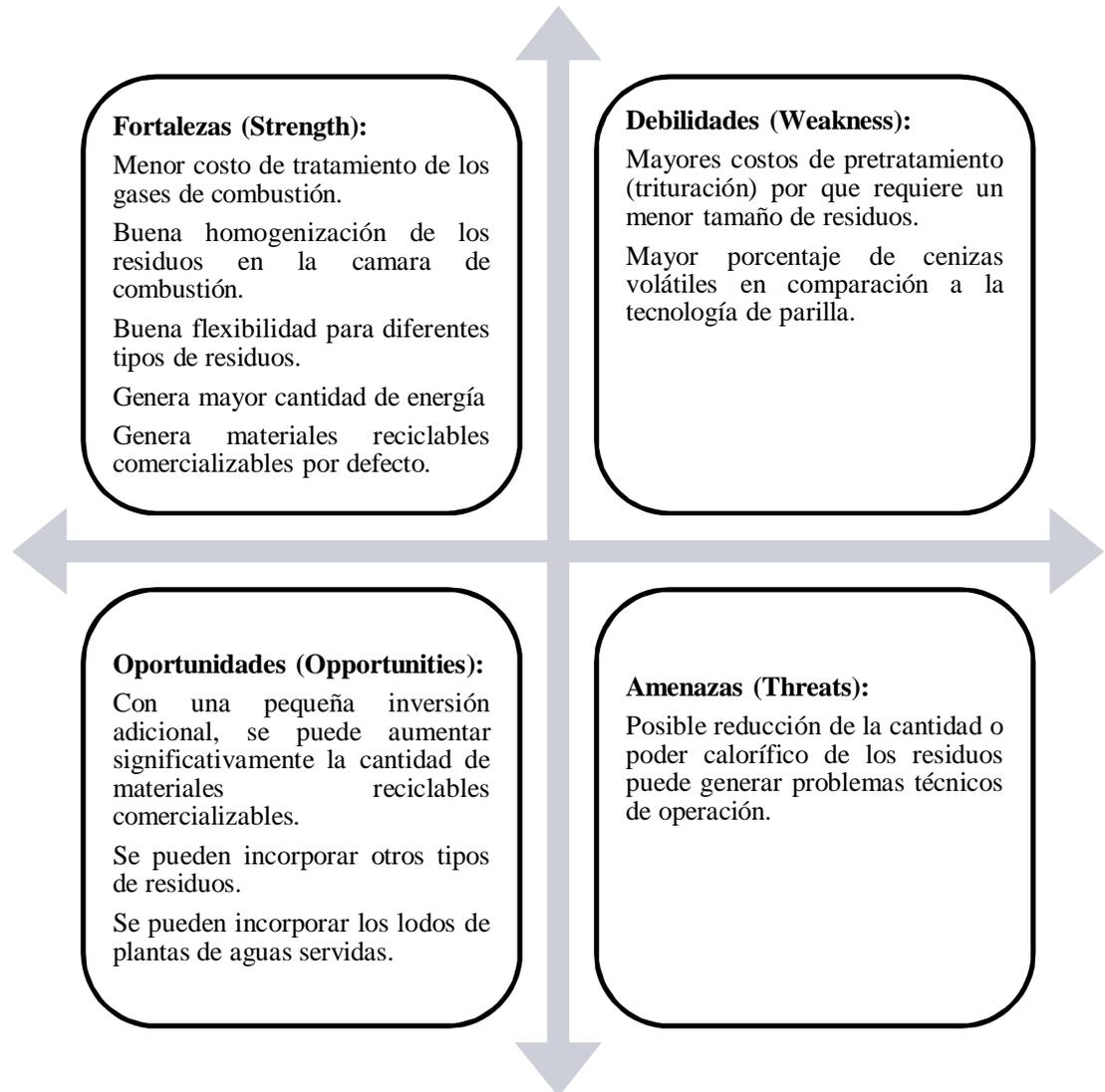
### **3.2.7.5 Costos de Inversión**

Los costos típicos de inversión de este tipo de tecnología varían para cada proyecto en particular, sin embargo, en términos generales los costos de inversión totales de la planta, excluyendo el costo de desarrollo, terreno, accesos y conexión a servicios, para cada tamaño representativo son:

- 1 línea (150.000 ton/año/planta) → 150 millones de USD
- 1 línea (300.000 ton/año-planta) → 250 millones de USD
- 3 líneas (1.000.000 ton/año-planta) → 710 millones de USD

En adición a lo anterior, esta tecnología requiere un sistema de pre-tratamiento para triturar y homogenizar los residuos antes de procesamiento en la planta. Este pre-tratamiento puede estar dentro de la planta y, en términos generales, su costo no es significativo respecto al costo total de la inversión.

### 3.2.7.6 Resumen y Análisis FODA (SWOT)



## Resumen

A continuación se presenta una tabla de resumen con las características principales de la tecnología de combustión con lecho fluidizado para 3 tamaños diferentes de planta, presentando las características generales y potenciales economías de escala de esta tecnología. Estos valores son referenciales y cada planta debe ser diseñada de acuerdo a las condiciones y regulaciones del proyecto.

**Tabla 3-15: Resumen de características de tecnología de lecho fluidizado**

Valores Típicos	1 línea menor tamaño	1 línea mayor tamaño	3 líneas mayor tamaño
Capacidad	150.000 ton/año	300.000 ton/año	1.000.000 ton/año
Eficiencia Eléctrica	20 %	22 %	25 %
Generación Eléctrica	9 a 10 MW	20 a 22 MW	76 a 82 MW
Consumos Auxiliares <sup>(1)</sup>	~ 20 %	~ 17 %	~ 10 %
Tamaño instalaciones	4.5 a 5.0 ha	8.0 a 8.5 ha	10.0 a 12.0 ha
Personal de O&M requerido	26	29	52
CAPEX	150	250	710

Nota 1: en porcentaje de la generación eléctrica

### 3.2.8 Gasificación con Turbina a Vapor

#### 3.2.8.1 Descripción general

La gasificación necesita pre-tratamiento de los residuos al menos la reducción del tamaño, y normalmente la clasificación y retiro de los metales, vidrios y arenas.

Los residuos, pre-tratados, son incorporados a la cámara de gasificación por sobre o por debajo dependiendo del tipo flujo dentro del gasificador. Para el proceso de gasificación de los residuos se requiere calentar los residuos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. De este proceso se obtiene un conjunto de gases, denominado gas de síntesis o *syngas*, al cual, para el caso de la gasificación con caldera a vapor, se le agrega aire u oxígeno para su ignición y combustión dentro de la caldera.

La recuperación de la energía se puede realizar a través de distintos tipos de caldera dependiendo del uso final de la energía, agua caliente, calefacción distrital, vapor industrial, electricidad o sus combinaciones. En la Figura 3-19 se pueden ver los distintos esquemas posibles con esta tecnología.

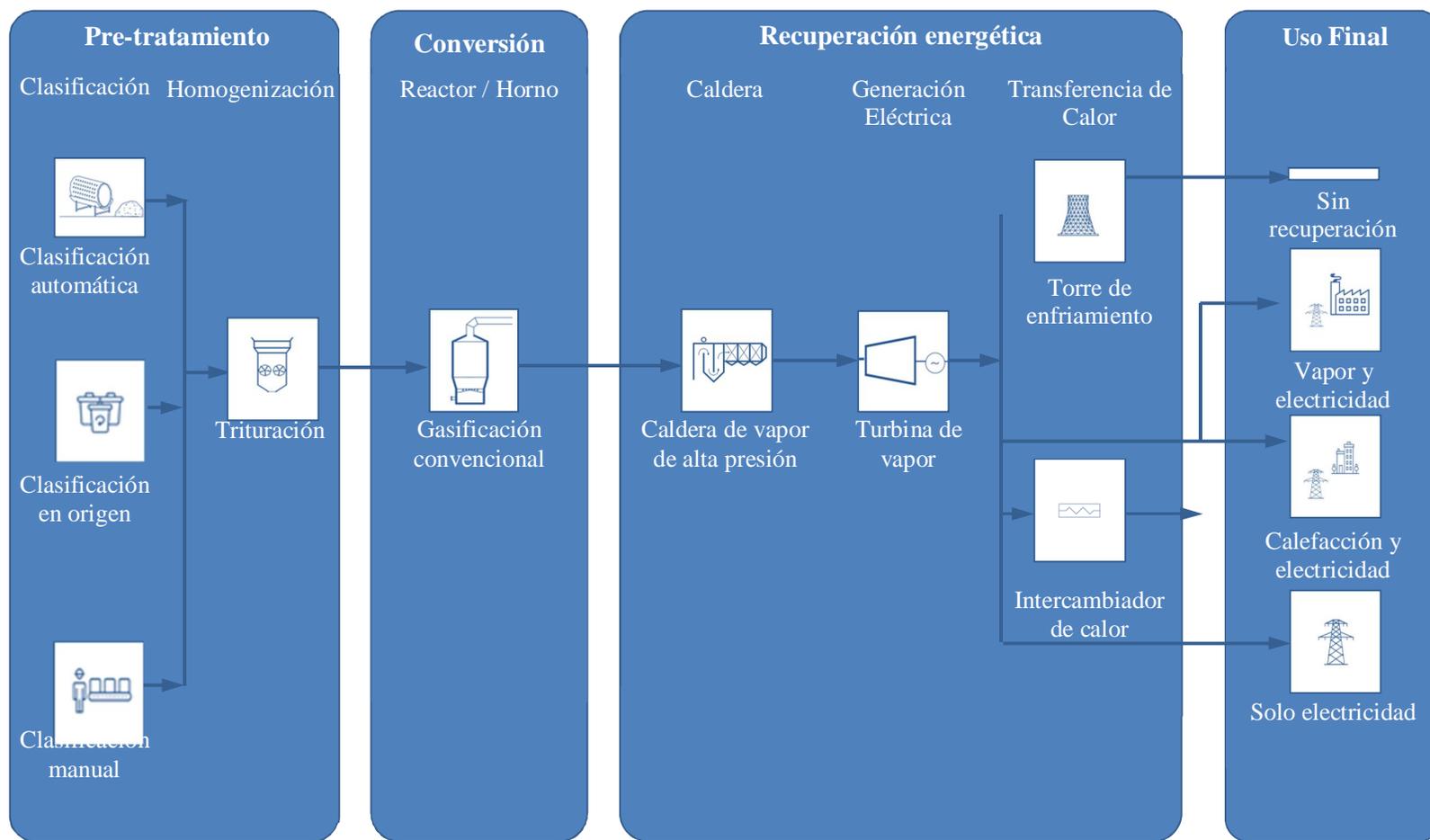
#### 3.2.8.2 Pre-tratamiento

La gasificación convencional necesita un buen nivel de pre-tratamiento de los residuos. Se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta y se reduce el tamaño de los residuos por un sistema de una o varias etapas de trituración a un tamaño usualmente menor a 5 mm. Se aplican distintos sistemas de clasificación para el retiro de los metales férricos, vidrio, metales no férricos, otros elementos reciclables y residuos con alto contenido orgánico (RDF-3).

**Tabla 3-16: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	1 a 5 mm
Poder calorífico máximo [MJ/kg]	5,5 a 30
Poder calorífico típico [MJ/kg]	8 a 20
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes Trituración primaria/secundaria (< 5 mm) Clasificación automática [RDF – 3]
Pre-tratamiento opcional	Clasificación manual

Como pre-tratamientos opcional esta la clasificación manual que permite la clasificación de materiales reciclables o aprovechables en otras tecnologías, sus efectos dependen de qué materiales se están recuperando.



**Figura 3-19: Esquema general de gasificación con caldera y turbina a vapor**

### 3.2.8.3 Conversión

La gasificación consiste en un conjunto de reacciones térmicas y químicas de oxidación parcial de la materia en condiciones pobres de oxígeno.

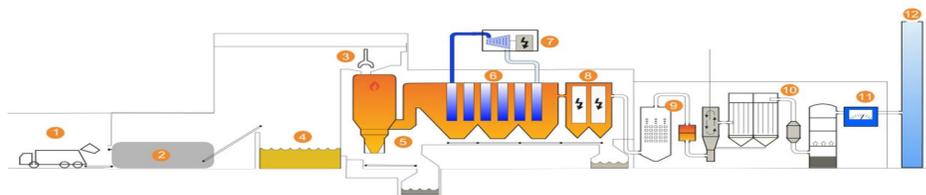
A través de este proceso se forma un gas de síntesis (*syngas*), compuesto por CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Además, contiene alquitranes, compuestos halogenados y partículas. Existen diferentes diseños para el reactor del gasificador como: de lecho fluidizado, de horno rotatorio, cada uno de los cuales debe ser diseñado a la medida de cada proyecto.

El proceso de gasificación de los residuos se produce en un reactor, donde se identifican tres etapas principales:

- Etapa de calentamiento, a una temperatura de 100°C, para el secado de los residuos y la evaporación del agua.
- Posteriormente, tiene lugar un proceso de gasificación, que consiste en la descomposición química u oxidación parcial de la materia orgánica a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, normalmente de 800 a 1.100°C.
- Finalmente, se oxida la fracción carbonosa de los residuos, al entrar en contacto con el agente gasificante, que puede ser aire, oxígeno, vapor, dióxido de carbono, o mezclas de éstos.

Luego, se inyecta oxígeno o aire dentro de la cámara, lo que combustiona el gas de síntesis, produciéndose gases de combustión y calor que es utilizado para alimentar una caldera de vapor para la generación de energía eléctrica. La temperatura del proceso es normalmente superior a los 750°C.

### Componentes principales



**Figura 3-20: Componentes principales – Planta de Gasificación con Turbina a Vapor<sup>71</sup>**

Dónde:

1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Pre-tratamiento de residuos

<sup>71</sup> elaboración propia

3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Depósito de residuos
5. Cámara de gasificación
6. Caldera de vapor
7. Turbina a Vapor y generador eléctrico
8. Eliminación de polvo (filtro de bolsa o precipitador eléctrico)\*
9. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx)\*
10. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - a. Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
11. Sistema de monitoreo de gases
12. Ventilador y chimenea

#### **Estado a nivel global**

Esta tecnología es muy conocida a nivel global por su uso en centrales de generación eléctrica con carbón o biomasa. El desarrollo de la aplicación de esta tecnología en desechos sólidos municipales lleva varios años y comenzó con la implementación parcial de soluciones híbridas con distintos porcentajes de mezcla de combustibles entre su aplicación original y RSD.

Esta tecnología ha tenido un éxito considerable en Japón, con 122 plantas en operación, una planta en Finlandia y Reino Unido, dos en Italia y tres en Noruega, para un total 129 en el mundo. Sin embargo, es necesario indicar que Japón tiene un mercado particular en términos de precios altos de la energía eléctrica, mercado de calefacción distrital establecido y costo de rellenos sanitarios.

#### **3.2.8.4 Condiciones de operación**

La capacidad operativa típica de una planta de combustión va desde los 10.000 a 100.000 toneladas por línea al año, existiendo plantas de 300.000 toneladas por año con 3 líneas de operación en paralelo.

#### **Mantenimiento y Vida Útil**

En términos generales, las labores de mantenimiento de estas plantas se pueden clasificar en tres grandes ítems: mantenimiento menor, mantenimiento mayor y reemplazo de los equipos.

**Tabla 3-17: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)**

Componente	Vida útil	Mant. Menor <sup>1</sup>	Mant. mayor
Pre-tratamiento	15	1 <sup>1</sup>	5
Grúa	10-15	1 <sup>2</sup>	5
Gasificador	400.000 h	5	10

Caldera	400.000 h	5	10
Manejo de cenizas y escoria	40	1-5	5-10
Tratamiento de gases de combustión:			
• Precipitador electrostático	40	1	10
• Filtros de bolsa	40	1	5 <sup>3</sup>
• Sistemas de eliminación SO <sub>2</sub> /HCl/Hg	40	1	5
Ventilador	40	5	10
Turbina	40	5	10-20 <sup>4</sup>
Generador	40	5	10-20
Transformador	20	5	10
Instrumentación & Control	10-20	1-5	5-10

Nota 1: Incluye reemplazo de repuestos definido en el manual de mantenimiento del proveedor

Nota 2: Incluye verificación de seguridad

Nota 3: Incluye reemplazo de los filtros

Nota 4: Apertura de la caja solo en caso de problema con vibraciones o depósitos en las aspas

Para el caso de las calderas, la vida útil está dada por el número de horas de operación y la cantidad de ciclos de partida y parada, debido a que es durante estos procesos que se genera el mayor desgaste a los equipos. Normalmente los ciclos de partida y parada se consideran como una cantidad de horas adicionales a la operación por cada ciclo.

### Emisiones

En general es una exigencia al operador de una planta WTE emitir un informe anual con los registros de mediciones atmosféricas certificadas y normalizadas. Por ello se cuenta con un registro extenso de valores empíricos de emisiones. En base de estos datos en la Tabla 3-6 se presentan los rangos típicos de emisiones por cada grupo de contaminantes. Como referencia, se han indicado los límites de la norma europea donde se puede observar que las plantas en operación cumplen con los requisitos regulatorios.

**Tabla 3-18: Rangos típicos de emisiones atmosféricas de plantas de gasificación con turbina a vapor<sup>72</sup>**

Contaminante		Rangos típicos	EU	
Material Particulado	MP	0,24	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	19,8	50	mg/Nm <sup>3</sup>
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	42	200	mg/Nm <sup>3</sup>
Carbono Orgánico Total	COT	0,2	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono	CO	2,0	N.A.	mg/Nm <sup>3</sup>
Cadmio + Talio y sus compuestos, indicado como metal	Cd + Ti	0,00002	0.05	mg/Nm <sup>3</sup>
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	0,003	0.05	mg/Nm <sup>3</sup>
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn	0,002	0.5	mg/Nm <sup>3</sup>
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio +	As + Co +			mg/Nm <sup>3</sup>

<sup>72</sup> En base a informes de emisiones de plantas en operación

Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	Ni + Se + Te			
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V			mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	3,6	10	mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	0,02	1.0	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas y furanos	TEQ	0,001	0.1	ng/Nm <sup>3</sup>

### Residuos del proceso

Aunque el proceso de combustión logra la oxidación de gran parte de los residuos, aún existe un remanente final que requiere ser tratado, revalorizado o enviado a rellenos sanitarios para su disposición final. En términos generales, los residuos son:

- Cenizas de fondo, aproximadamente 150 kg/ton de RSD tratada (4,0% del volumen de residuo tratado), que están compuestas por material particulado que se deposita gravitacionalmente al fondo de la cámara de combustión → Enviadas a rellenos sanitarios o tratadas para su uso como aditivo del cemento para construcción de pavimentos o elementos prefabricados.
- Cenizas volantes, aproximadamente 70 kg/ton de RSD tratada (1,9% del volumen de residuo tratado), que está compuesta por material particulado fino que es capturado en las etapas de tiramiento de los gases de escape → Enviadas a rellenos sanitarios/relleno de seguridad según su composición. La composición de las cenizas volantes dependen directamente de la calidad de residuo y del sistema de pre-tratamiento.

### Tamaño típico de las instalaciones

Las instalaciones consideran un terreno que abarca la planta y las instalaciones anexas además de las áreas de maniobra y circulación propias de una planta, con esto los tamaños típicos de la una planta de acuerdo a su capacidad son:

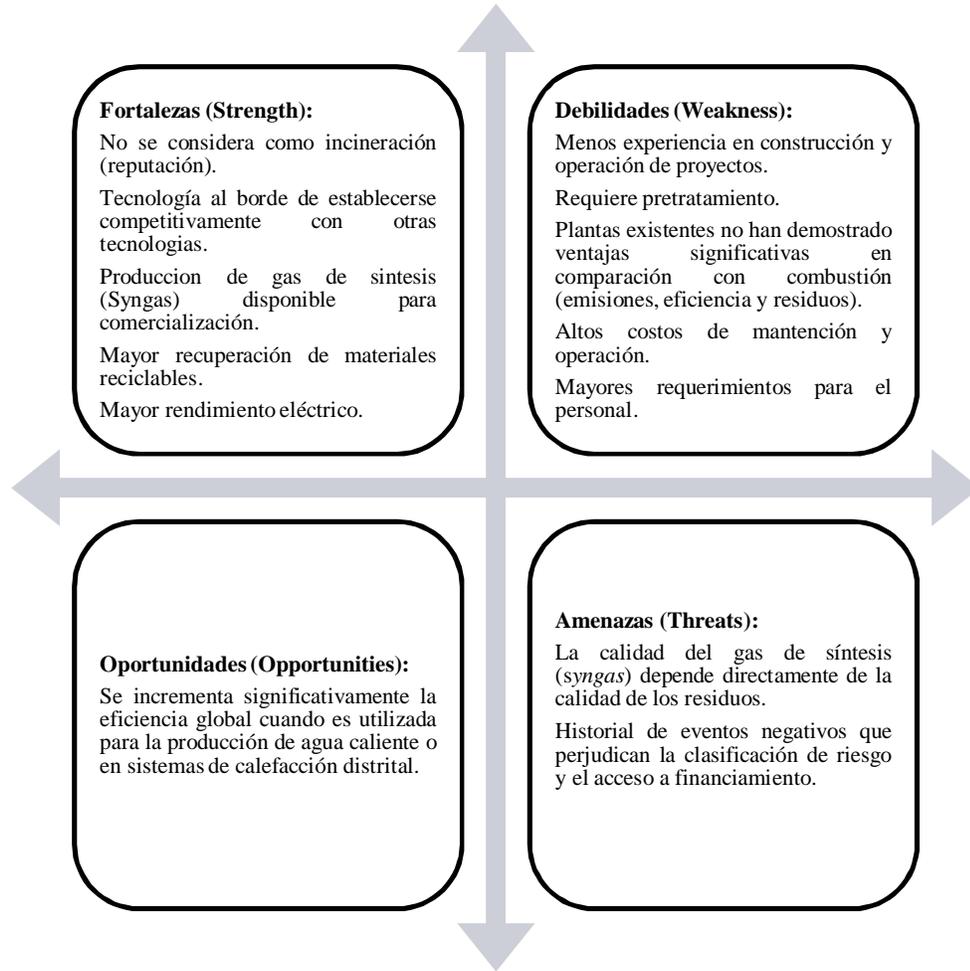
- 1 línea (10.000 ton/año-planta) → 15.000 – 20.000 m<sup>2</sup>
- 1 línea (100.000 ton/año-planta) → 30.000 – 40.000 m<sup>2</sup>
- 3 líneas (300.000 ton/año-planta) → 75.000 – 100.000 m<sup>2</sup>

#### 3.2.8.5 Costos de Inversión

Los costos típicos de inversión de este tipo de tecnología varían para cada proyecto en particular, sin embargo, en términos generales los costos de inversión totales de la planta, excluyendo el costo de desarrollo, terreno, accesos y conexión a servicios, para cada tamaño representativo son:

- 1 línea (10.000 ton/año/planta) → 10 millones de USD
- 1 línea (100.000 ton/año-planta) → 30 millones de USD
- 3 líneas (300.000 ton/año-planta) → 80 millones de USD

**3.2.8.6 Resumen y Análisis FODA (SWOT)**



**Resumen**

La Tabla 3-19 resume las características principales de la tecnología de gasificación con turbina a vapor para 3 tamaños diferentes de planta.

**Tabla 3-19: Resumen de características de tecnología gasificación con turbina a vapor**

Valores Típicos	1 línea menor tamaño	1 línea mayor tamaño	3 líneas mayor tamaño
Capacidad	10.000 ton/año	100.000 ton/año	300.000 ton/año
Eficiencia Generación. Eléctrica	10 %	15 %	20 %
Generación Eléctrica	0,27 a 0,32 MW	4,3 a 5,0 MW	18 a 20 MW
Consumos auxiliares <sup>(1)</sup>	~ 10 %	~ 7 %	~ 5 %
Tamaño instalaciones	1,5 a 2,0 ha	3,0 a 4,0ha	7,50 a 10,0 ha
Personal de O&M requerido	28	30	56
CAPEX	10	30	80

Nota 1: en porcentaje de la generación eléctrica

### 3.2.9 Gasificación con Turbina a Gas

#### 3.2.9.1 Descripción general

La gasificación necesita pre-tratamiento de los residuos, en particular al menos la reducción del tamaño, y normalmente la clasificación y retiro de los metales, vidrios y arenas.

Los residuos pre-tratados son incorporados a la cámara de gasificación por sobre o por debajo dependiendo del tipo flujo dentro del gasificador. Para el proceso de gasificación de los residuos se requiere calentar los residuos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. De este proceso se obtiene un conjunto de gases denominado gas de síntesis o *syngas*, el cual, para el caso de la gasificación con turbina o motor a gas, se pasa por un proceso de enfriamiento y tratamiento.

La recuperación de la energía se puede realizar a través de una turbina de reacción o un motor a gas conectado con un generador eléctrico. En la Figura 3-21 pueden ver los distintos esquemas posibles con esta tecnología.

#### 3.2.9.2 Pre-tratamiento

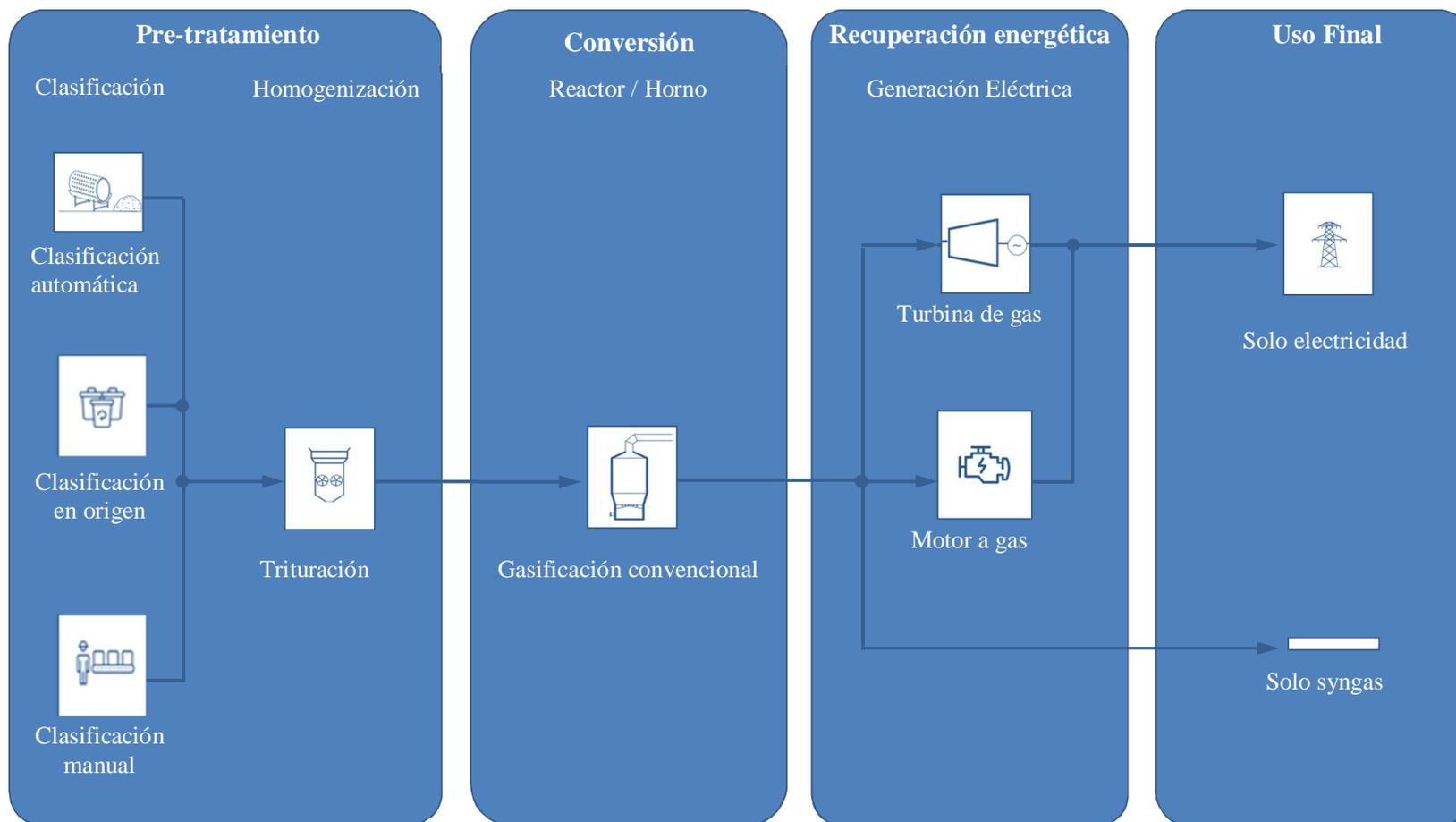
La gasificación convencional necesita un buen nivel de pre-tratamiento de los residuos. Se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta y se reduce el tamaño de los residuos por un sistema de una o varias etapas de trituración a un tamaño, usualmente menor a 5 mm. Se aplican distintos sistemas de clasificación para el retiro de los metales férricos, vidrio, metales no férricos, otros elementos reciclables y residuos con alto contenido orgánico (RDF-3).

**Tabla 3-20: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	1 a 5 mm
Poder calorífico máximo	5,5 a 30 MJ/kg
Poder calorífico típico	8 a 20 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes Trituración primaria/secundaria (< 5 mm) Clasificación automática [RDF – 3]
Pre-tratamiento opcional	Clasificación Manual

El pre-tratamiento opcional es:

- **Clasificación manual:** Permite la clasificación de materiales reciclables o aprovechables en otras tecnologías, sus efectos dependen de que materiales se están recuperando.



**Figura 3-21: Esquema general de gasificación con caldera a gas**

El proceso de gasificación es el mismo que en gasificación con turbina a vapor, la diferencia radica en el proceso de aprovechamiento energético donde en vez de combustionar el *syngas* dentro de la cámara o en una caldera, este es procesado y purificado, para luego ser utilizado para alimentar una turbina de reacción a gas para la generación de energía eléctrica. También puede ser implementado un motor a gas para este propósito.

La utilización del *syngas* en una turbina a gas convencional (ciclo combinado) requiere de un *syngas* de alta calidad. La calidad del *syngas* depende de la composición del RSD, que por su naturaleza heterogénea requiere de proceso de pre-tratamiento y homogenización de alto costo. El *syngas* de alta calidad sólo se puede obtener utilizando un sistema de limpieza/purificación complejo, que hasta el día de hoy es la barrera principal para el desarrollo comercial de esta tecnología utilizando RSD.

### 3.2.9.3 Conversión

La gasificación consiste en un conjunto de reacciones térmicas y químicas de oxidación parcial de la materia en condiciones pobres de oxígeno.

A través de este proceso se forma un gas de síntesis (*syngas*), compuesto por CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Además, contiene alquitranes, compuestos halogenados y partículas. Existen diferentes diseños para el reactor del gasificador, como de lecho fluidizado, de horno rotario, de escape ascendente y de escape descendente, cada uno de los cuales debe ser diseñado a la medida de cada proyecto.

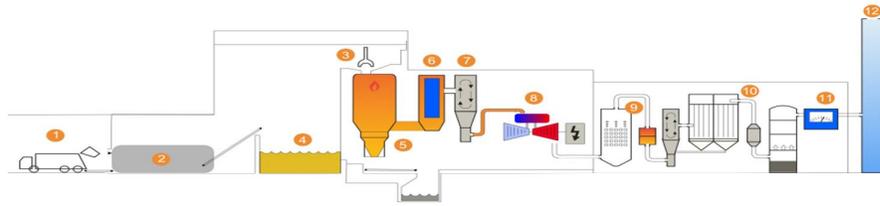
El proceso de gasificación de los residuos se produce en un reactor donde se identifican tres etapas principales:

- Etapa de calentamiento, a una temperatura de 100°C, para el secado de los residuos y la evaporación del agua.
- Posteriormente, tiene lugar un proceso de gasificación, que consiste en la descomposición química u oxidación parcial de la materia orgánica a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, normalmente de 800 a 1100°C.
- Finalmente, se oxida la fracción carbonosa de los residuos al entrar en contacto con el agente gasificante, que puede ser aire, oxígeno, vapor, dióxido de carbono, o mezclas de éstos.

Luego, los gases resultantes son enfriados y tratados para su uso posterior en una turbina a gas, motor a gas o inyección a red de distribución de gas.

La temperatura del proceso es normalmente superior a los 750°C.

### Componentes principales



**Figura 3-22: Componentes principales – Planta de Gasificación con Turbina a Gas**

Dónde:

1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Pre-tratamiento de residuos
3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Depósito de residuos
5. Cámara de gasificación
6. Enfriador de singas
7. Sistema de purificación de singas
8. Turbina a gas y generador eléctrico
9. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)\*
10. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
11. Sistema de monitoreo de gases
12. Ventilador y chimenea

### Estado a nivel global

Esta tecnología ha sido implementada en los últimos años a nivel mundial, existiendo plantas en distintos niveles de desarrollo en Europa, Inglaterra, Japón, Canadá y EE.UU. Sin embargo, esta tecnología se encuentra en una etapa temprana de implementación, ninguna planta ha logrado llegar a operación comercial a la fecha, obteniendo resultados variados y hasta ahora no exitosos, principalmente debido a la dificultad en el tratamiento/purificación del *syngas* para su combustión en turbinas y motores.

#### 3.2.9.4 Condiciones de operación

La capacidad operativa teórica de una planta de gasificación con turbina a gas va desde los 10.000 a 100.000 toneladas por línea al año, no habiendo limitación para una eventual planta de 300.000 toneladas por año con 3 líneas de operación en paralelo.

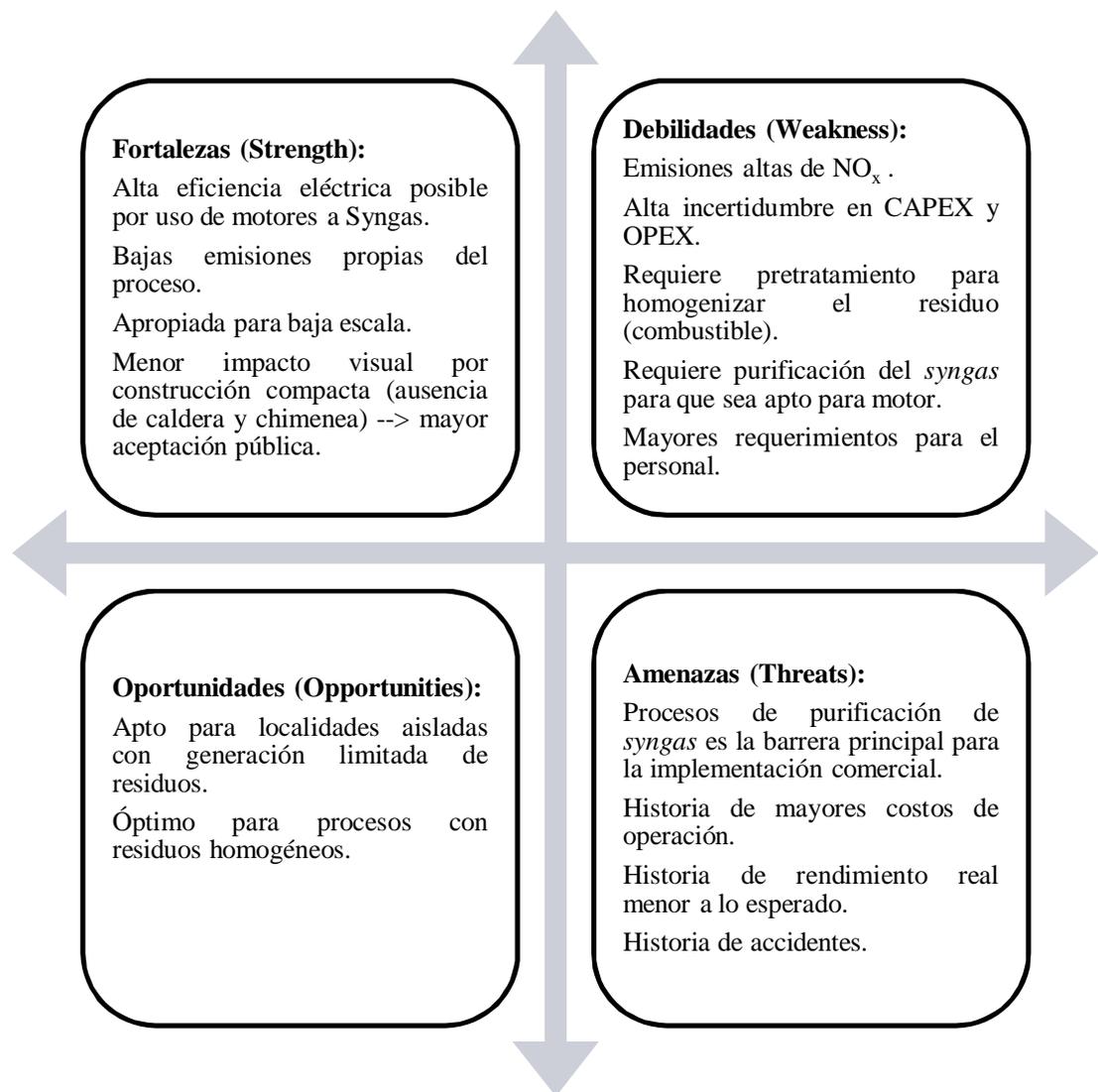
Cabe mencionar, que a criterio del consultor, al no haber casos de operación exitosa de esta tecnología, no es posible comentar las eventuales condiciones de operación que tendría esta tecnología.

### 3.2.9.5 Costos de Inversión

Los costos teóricos de inversión de este tipo de dependen en términos generales del tamaño de la planta, la calidad del residuo (en particular la homogeneidad del combustible) y la normativa ambiental a cumplir. El costo estimado para cada tamaño representativo es:

- 1 línea (10.000 ton/año/planta) → 10 millones de USD
- 1 línea (100.000 ton/año-planta) → 30 millones de USD.
- 3 líneas (300.000 ton/año-planta) → 100 millones de USD.

### 3.2.9.6 Resumen y Análisis FODA (SWOT)



### **3.2.10 Gasificación con Plasma**

#### **3.2.10.1 Descripción general**

La gasificación por plasma en teoría podría tratar una amplia gama de residuos, necesitando un pre-tratamiento de los residuos en particular al menos la reducción del tamaño, y normalmente la clasificación y retiro de los metales, vidrios y arenas.

El plasma es un estado de la materia proveniente de un gas sometido a altas temperaturas en que gran parte de los átomos han sido ionizados. Está formado por una mezcla de iones, electrones y partículas libres, siendo en conjunto eléctricamente neutro, pero conductor de la electricidad.

Los residuos pre-tratados son incorporados a la cámara de gasificación donde entran en contacto con el arco eléctrico, o con los gases ionizados a muy alta temperatura en ausencia de oxígeno. De este proceso se obtiene *syngas*.

La recuperación de la energía se puede realizar a través de la combustión del *syngas* en una caldera de vapor, turbina de gas o motor de gas. En la Figura 3-23 se pueden ver los distintos esquemas posibles con esta tecnología.

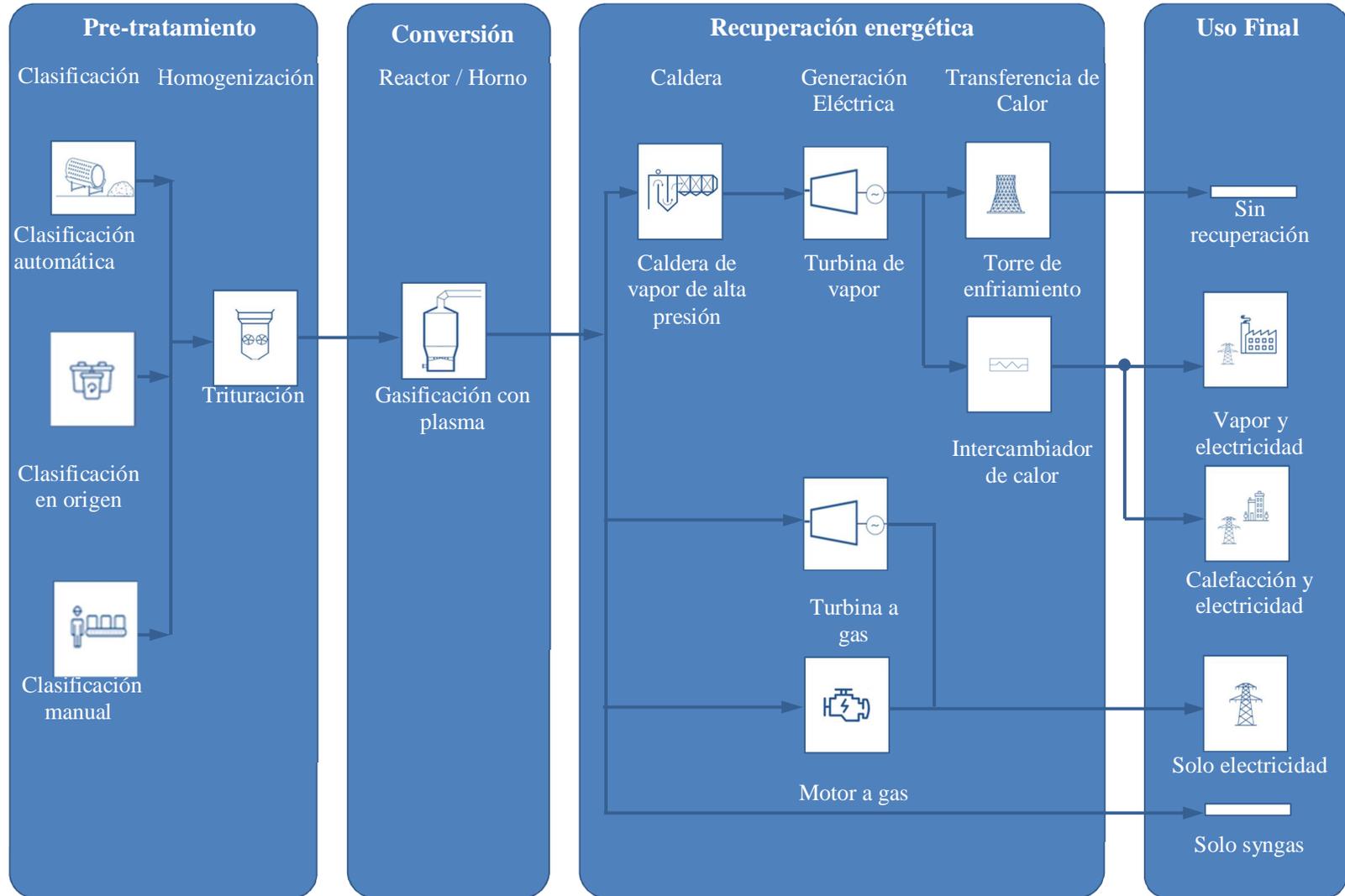


Figura 3-23: Esquema general de gasificación con plasma

### 3.2.10.2 Pre-tratamiento

Esta tecnología, según estudios realizados en plantas piloto, podría llegar a tratar una amplia gama de residuos, como residuos sólidos municipales e industriales, biomasa, residuos sanitarios, neumáticos, combustible derivado de residuos, plásticos, etc.

A diferencia de otras tecnologías que producen gases, se incluyen residuos con alto contenido de compuestos inorgánicos e inertes, de humedad y bajo poder calorífico inferior, sin embargo, limitan la rentabilidad económica.

Debido a las limitaciones económicas, se requiere un pre-tratamiento para reducir el material inerte y la humedad, además de homogeneizar el tamaño de partícula de los residuos. En general, se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta y se reduce el tamaño de los residuos por un sistema de una o varias etapas de trituración a un tamaño usualmente menor a 5 mm. Se aplican distintos sistemas de clasificación para el retiro de los metales férricos, vidrio, metales no férricos, otros elementos reciclables y residuos con alto contenido orgánico (RDF-3).

**Tabla 3-21: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	1 a 5 mm
Poder calorífico máximo	5,5 a 30 ( MJ/kg
Poder calorífico tópic	8 a 20 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes Trituración primaria/secundaria (< 5 mm) Clasificación automática [RDF-3])
Pre-tratamiento opcional	Clasificación Manual

El pre-tratamiento opcional es:

- **Clasificación manual:** Permite la clasificación de materiales reciclables o aprovechables en otras tecnologías, sus efectos dependen de los materiales que se están recuperando.

### 3.2.10.3 Conversión

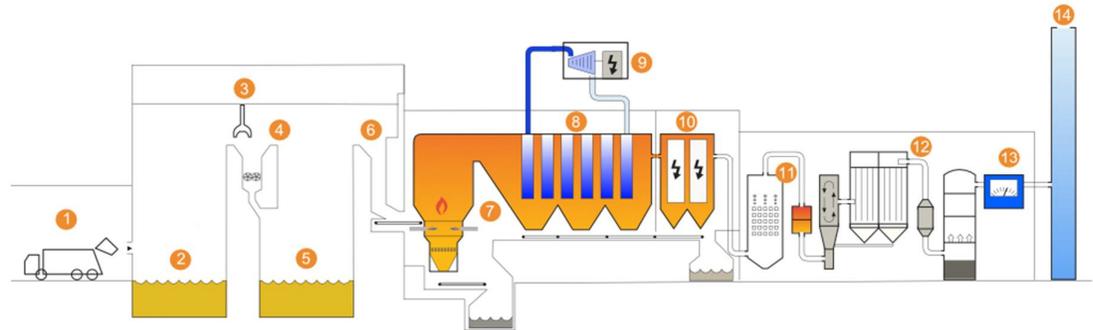
El plasma se forma al hacer fluir un gas inerte a través de un campo eléctrico existente entre dos electrodos, formándose lo que se denomina arco de plasma. Las moléculas gaseosas son forzadas a colisiones de alta energía con electrones cargados, resultando en generación de partículas cargadas.

La temperatura de trabajo oscila entre los 5.000 °C y 15.000 °C

Para la recuperación energética se utiliza la gasificación por plasma, de donde se obtiene como producto final un gas compuesto principalmente de monóxido de carbono e hidrogeno, además de residuo sólido, consistente en una escoria inerte generalmente vitrificada.

La valorización del gas de síntesis obtenido de la gasificación por plasma puede realizarse por medio de ciclos térmicos combinados de turbinas de gas o vapor o a través de motores de gas.

**Componentes principales**



**Figura 3-24: Componentes principales – Planta de Gasificación con Plasma**

Dónde:

1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Depósito de residuos
3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Trituración
5. Depósito de residuos
6. Ingreso de residuos
7. Cámara de gasificación por plasma
8. Caldera de Vapor
9. Turbina a vapor y generador eléctrico
10. Eliminación de polvo (filtro de bolsa o precipitador eléctrico)\*
11. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx)\*
12. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - a. Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
13. Sistema de monitoreo de gases
14. Ventilador y chimenea

**Estado a nivel global**

Esta tecnología está siendo implementada en los últimos años a nivel mundial, contando con 4 plantas en todo el mundo que tratan en total cerca de 200 mil de toneladas por año, sin considerar los sistemas de tratamiento de ceniza por plasma (vitrificación) ni las plantas que cuentan con líneas de procesos secundarios o piloto de gasificación por plasma.

El éxito de esta tecnología ha sido limitado, existiendo casos como la planta de generación de energía renovable Tees Valley, ubicada en Teesside Bellingham Inglaterra

(Tees Valley Renewable Energy Facility) la que iba a ser la planta de gasificación por plasma más grande de su tipo<sup>73</sup>, pero no fue terminada. Consideraba dos etapas (Tees Valley 1 y Tees Valley 2) con una capacidad de 350.000 toneladas anuales, y una generación de 50 MW cada una. La inversión inicial realizada en la primera etapa fue sobre los 500 millones de dólares. La etapa 1 fue construida, entrando en operación a finales de 2015. La segunda etapa inició su construcción en 2014, anunciándose el abandono del proyecto en su totalidad en abril de 2016. La compañía Airproduct, propietaria del proyecto, indicó como razones para el abandono del proyecto “la inviabilidad de lograr el desempeño esperado de la planta debido a problemas técnicos”<sup>74</sup>.

#### **3.2.10.4 Condiciones de operación**

La capacidad teórica típica de una planta de gasificación por plasma va desde los 10.000 a 100.000 toneladas por línea al año, aunque se han construido plantas de 350.000 toneladas por línea al año pero sin éxito en su operación, como el caso de la planta en Teesside en Reino Unido.

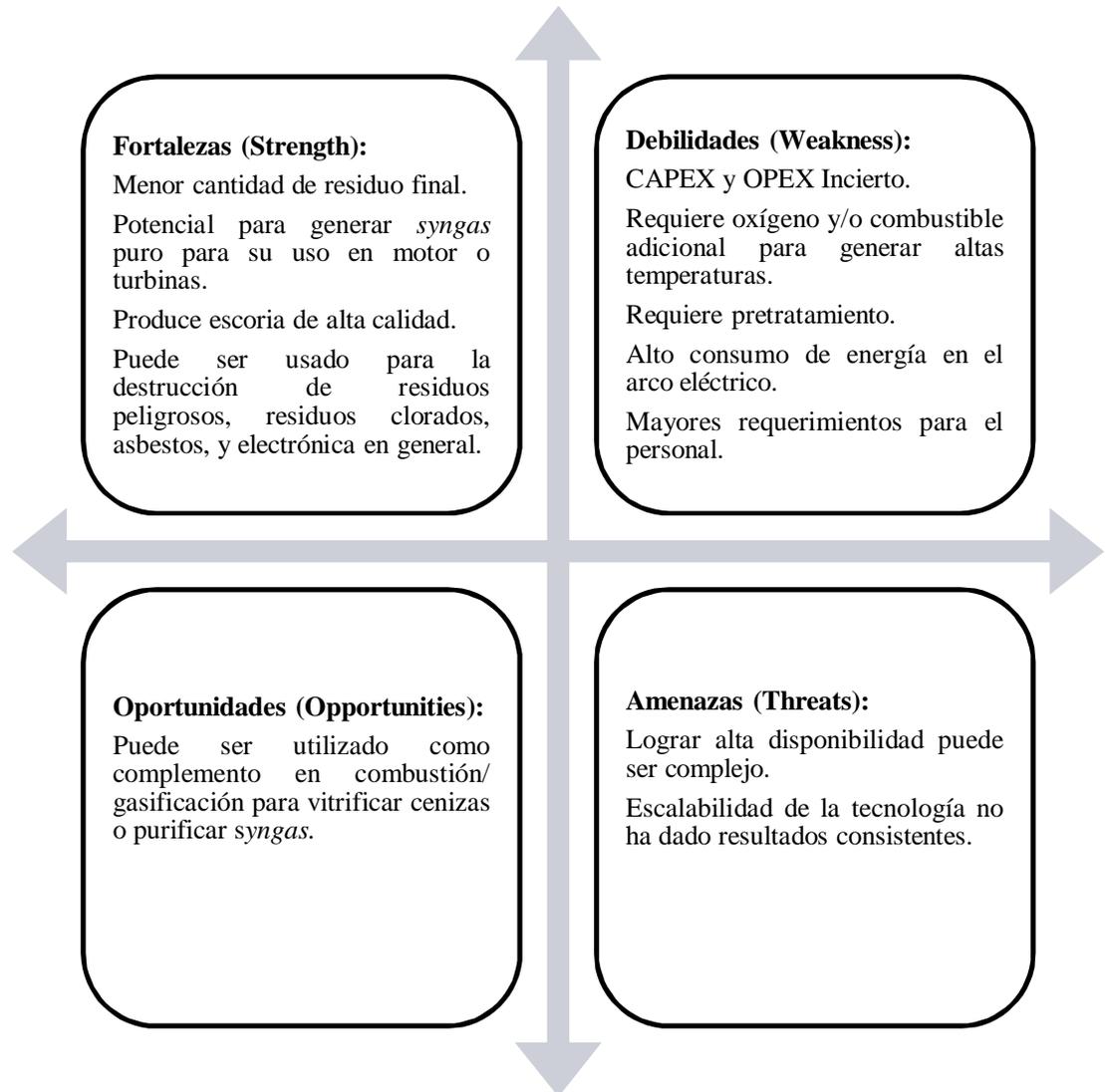
Cabe mencionar que como los únicos casos de operación exitosa se encuentran en Japón y Corea del Sur, el acceso a la información de operación de estas plantas no ha sido posible, y por lo tanto, no le es posible al consultor comentar las condiciones de operación de las plantas existentes ni las que tendría una eventual planta en la Región Metropolitana con esta tecnología.

---

<sup>73</sup> <https://www.letsrecycle.com/news/latest-news/worlds-largest-gasification-plant-nears-completion/>

<sup>74</sup> <https://waste-management-world.com/a/air-products-to-ditch-plasma-gasification-waste-to-energy-plants-in-teesside>

### 3.2.10.5 Resumen y Análisis FODA (SWOT)



### **3.2.11 Pirólisis**

#### **3.2.11.1 Descripción general**

La pirólisis se basa en la descomposición de los residuos a altas temperaturas en un ambiente libre de oxígeno. De este proceso se pueden obtener tres subproductos, dependiendo de la composición de los residuos y de la temperatura del proceso: syngas, aceites y elementos carbonizados.

En general, a mayor temperatura se genera un mayor contenido de gases versus los otros productos, mientras que a menor temperatura se genera mayormente carbón.

Al igual que para las tecnologías de gasificación, la naturaleza heterogénea de los RSD hace que los procesos de pirólisis y limpieza de los subproductos sean complejos de estabilizar, generando la necesidad de contar con un gran equipo de profesionales y constantes ajustes en la operación, por lo que no se conocen proyectos de pirólisis para RSD de gran escala en operación comercial.

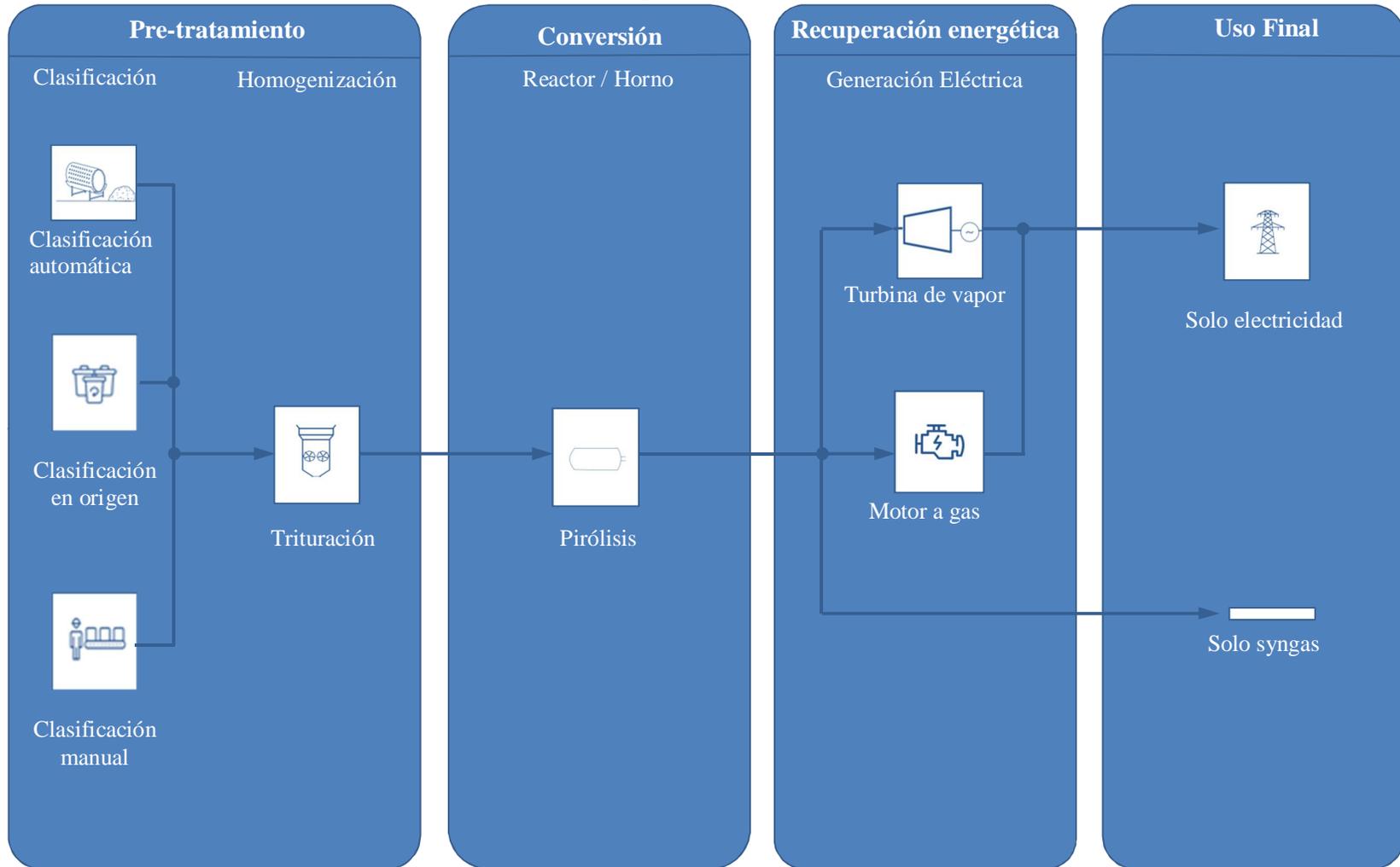


Figura 3-25: Esquema general de gasificación con turbina o motor a gas

### 3.2.11.2 Pre-tratamiento

La pirólisis necesita un pre-tratamiento de los residuos, como mínimo, se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta y se reduce el tamaño de los residuos por un sistema de una o varias etapas de trituración a un tamaño usualmente menor a 5 cm (RDF-2), aunque también hay plantas de tamaños menores.

En general, para esta tecnología se aplican distintos sistemas de clasificación para el retiro de los metales férricos, vidrio, metales no férricos, otros elementos reciclables y residuos con alto contenido orgánico (RDF-3).

**Tabla 3-22: Requisitos para los residuos**

Descripción	Valor
Tamaño máximo	1 a 5 mm
Poder calorífico	5,5 a 30 MJ/kg
Poder calorífico típico	8 a 20 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes Trituración primaria/secundaria (< 5 cm) [RDF – 2 o RDF – 3]
Pre-tratamiento opcional	Clasificación manual Clasificación automática

Los pre-tratamientos opcionales son:

- **Clasificación manual:** Permite la clasificación de materiales reciclables o aprovechables en otras tecnologías, sus efectos dependen de que materiales se están recuperando,
- **Clasificación automática:**
  - **Clasificación con aire:** permite la separación de papeles y plásticos, reduciendo el poder calorífico.
  - **Tamizado:** permite retirar cenizas, polvo, vidrios y arenas, aumentando el poder calorífico, reduciendo la escoria y cenizas.
  - **Separación Magnética:** permite la separación y recuperación de metales férricos de los residuos, incrementando el poder calorífico, reduciendo la escoria y cenizas.
  - **Separación Eléctrica:** permite la separación y recuperación de metales no férricos, principalmente aluminio y envases tetra pack.

### 3.2.11.3 Conversión

Degradación térmica de los residuos en ausencia de oxígeno añadido, por lo que la descomposición se produce mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión.

El oxígeno presente en el proceso corresponde solo al contenido en el material a tratar.

La temperatura de trabajo está entre 300°C y 800°C.

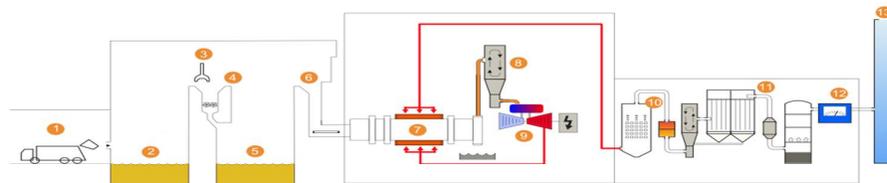
Las relativamente bajas temperaturas provocan una menor volatilización de carbono y otros contaminantes, como metales pesados o dioxina. Por lo tanto, en teoría, los gases de combustión necesitarán un tratamiento menor para cumplir con los límites de emisión permitidos.

Una planta de tratamiento de residuos por pirólisis usualmente incluye las siguientes etapas:

- Preparación y trituración: en esta etapa se mejora y estandariza la calidad de los residuos para su procesamiento, promoviendo la transferencia de calor.
- Secado: una etapa de secado separada mejora el poder calorífico neto del proceso y aumenta la eficiencia de las reacciones gas-sólido dentro del reactor.
- Pirólisis de los residuos.
- Tratamiento secundario del gas y residuos de pirólisis: a través de la condensación de los gases para la extracción de mezclas de aceites energéticamente utilizables y/o la incineración de gas y coque para la destrucción de los ingredientes orgánicos y la utilización simultánea de energía.

La interacción entre un gran número de fenómenos termoquímicos resulta en una enorme diversidad de sustancias obtenidas e incrementa la complejidad del proceso. Muchísimos compuestos diferentes son producidos en el proceso de pirólisis de residuos, de los cuales una gran cantidad aún no han sido identificados. Una comprensión completa de las características y concentración de los efluentes es esencial, especialmente cuando se tratan residuos peligrosos.

### Componentes principales



**Figura 3-26: Componentes principales – Planta de Pirólisis**

Dónde:

1. Acopio de residuos (máquina de peso/control de calidad)
2. Depósito de residuos
3. Grúa para la manipulación de los residuos y transporte a la caldera
4. Trituración
5. Depósito de residuos triturados

6. Ingreso de residuos
7. Cámara de pirólisis
8. Limpieza de gases
9. Turbina a gas y generador eléctrico (puede ser motor a gas)
10. SNCR (reducción no catalítica selectiva)\* o SCR (reducción catalítica selectiva) para reducir las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx)\*
11. Reducción de Cl/Ácidos (depurador o sistema de limpieza semi-seco)\*
  - a. Reducción de mercurio y dióxidos/furanos (adsorción en un sistema separado)\*
12. Sistema de monitoreo de gases
13. Ventilador y chimenea

#### **Estado a nivel global**

Esta tecnología está siendo implementada en los últimos años a nivel mundial, contando con 5 plantas en operación exclusivamente en Japón. Sin embargo, su aplicación para RSD es incipiente, y se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, siendo en general experiencias pilotos en plantas destinadas a su utilización con algún residuo municipal, agrícola o industrial específico.

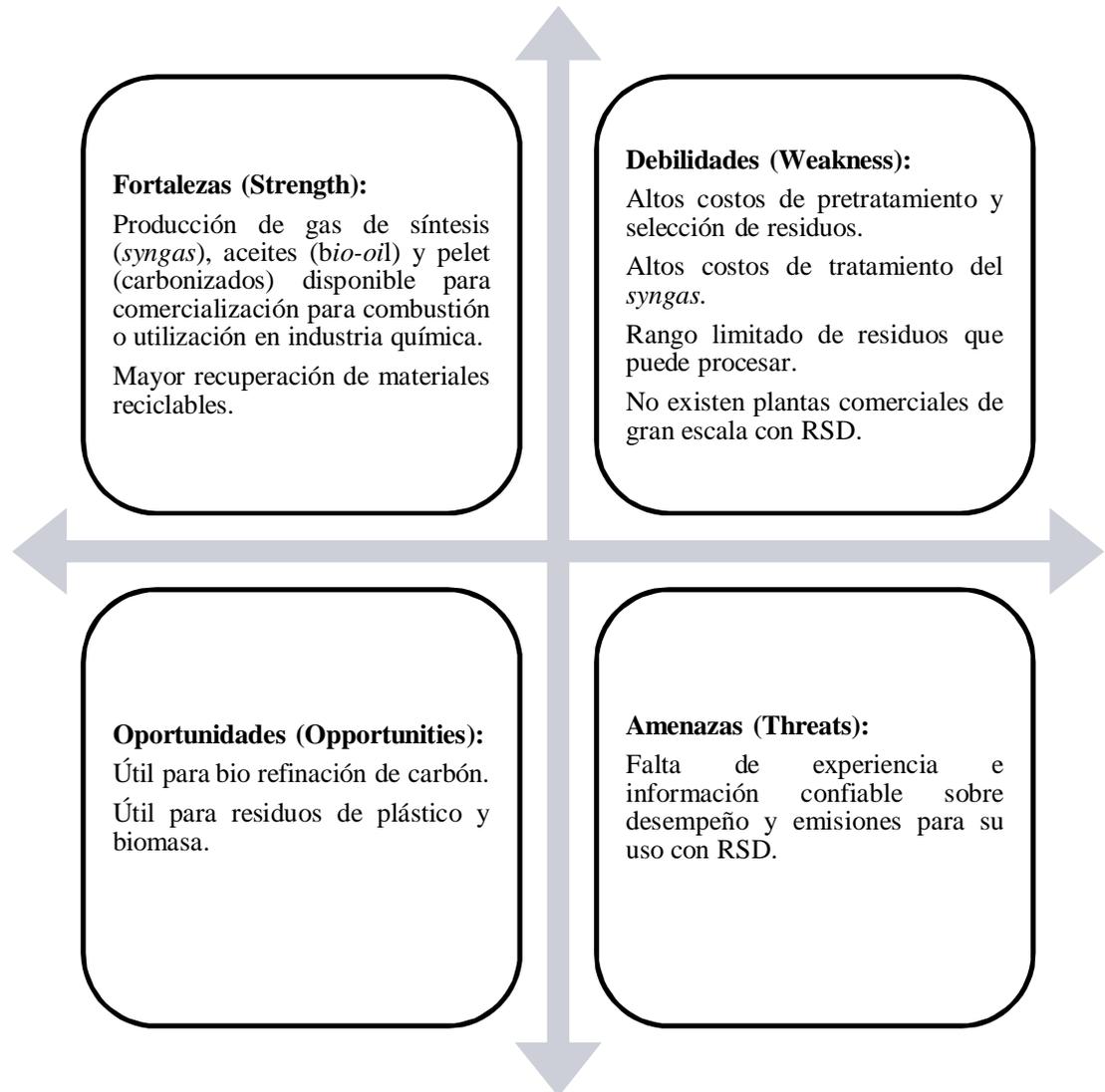
Su uso más masivo se da en la industria de los combustibles fósiles, para la refinación de arenas con hidrocarburos y carbón.

#### **3.2.11.4 Condiciones de operación**

La capacidad operativa teórica de una planta de pirólisis para RSD se encuentra desde los 40.000 a 80.000 toneladas por línea al año, existiendo plantas de 240.000 toneladas por año.

Cabe mencionar que a criterio del consultor, al no haber casos de operación exitosa de esta tecnología, no es posible comentar las eventuales condiciones de operación que tendría esta tecnología.

### 3.2.11.5 Resumen y Análisis FODA (SWOT)

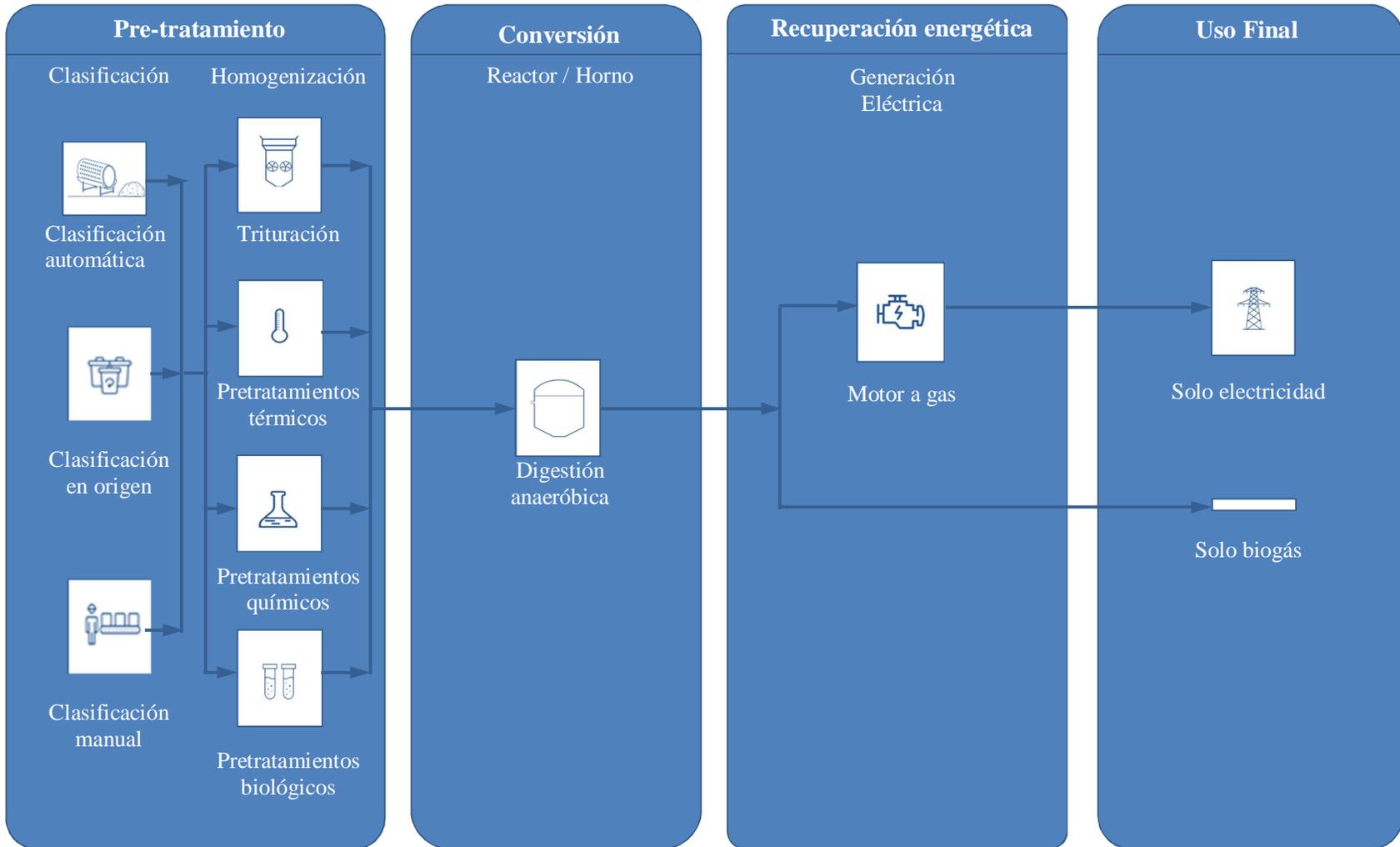


### **3.2.12 Digestión Anaeróbica**

#### **3.2.12.1 Descripción general**

La digestión anaeróbica consiste en la descomposición de la fracción orgánica o biodegradable de los residuos en un reactor o digestor cerrados, en ausencia de oxígeno, donde por acción de distintas familias de microorganismos es posible lograr la descomposición de los residuos. De este proceso se obtienen dos productos principales: biogás (gas rico en metano) y digestato (material rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante).

Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica. La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupo de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea.



**Figura 3-27: Esquema general de digestión anaeróbica.**

### 3.2.12.2 Pre-tratamiento

La digestión anaeróbica necesita un buen nivel de pre-tratamiento de los residuos. Normalmente solo se tratan los residuos separados en origen o ya seleccionados en un sistema de pre-tratamiento de otra planta de WTE.

En general, se retiran los elementos de sobre tamaño y se reduce el tamaño de los residuos por un sistema de una o varias etapas de trituración a un tamaño, usualmente menor a 5 cm. Se aplican distintos sistemas de clasificación para el retiro de los metales férricos, vidrio, metales no férricos, otros elementos reciclables, obteniendo residuos con alto contenido orgánico (RDF-3).

Tabla 3-23: Requisitos para los residuos

Descripción	Valor
Tamaño máximo	<5 cm
Poder calorífico máximo	5,5 a 30 MJ/kg
Poder calorífico típico	8 a 20 MJ/kg
Pre-tratamiento requerido	Separación mecánica de elementos grandes Trituración primaria/secundaria (< 5 cm) Clasificación automática [RDF – 3]
Pre-tratamiento opcional	Clasificación Manual Térmico Químico Biológico

Los pre-tratamientos opcionales son:

- **Clasificación manual:** Permite la clasificación de materiales reciclables o aprovechables en otras tecnologías, sus efectos dependen de que materiales se están recuperando.
- **Térmico:** Permite la eliminación de cualquier microorganismo presente en los residuos que pudiese alterar el proceso de digestión. También es usada como pos tratamiento del digestato para su higienización antes de su venta.
- **Químico:** se utiliza para lograr la destrucción de los compuestos orgánicos sobre sustratos ricos en lignina como los residuos de roce y poda municipal.
- **Biológico:** que permite mejorar el rendimiento de la fase de hidrolisis de la digestión.

### 3.2.12.3 Conversión

El biogás es un compuesto con alto contenido energético, que se genera en la descomposición anaeróbica (sin presencia de oxígeno), de la materia orgánica.

El gas generado por la descomposición está compuesto principalmente por metano (fracción combustible) y CO<sub>2</sub> (fracción inerte). El contenido de metano varía entre 50% a 75%.

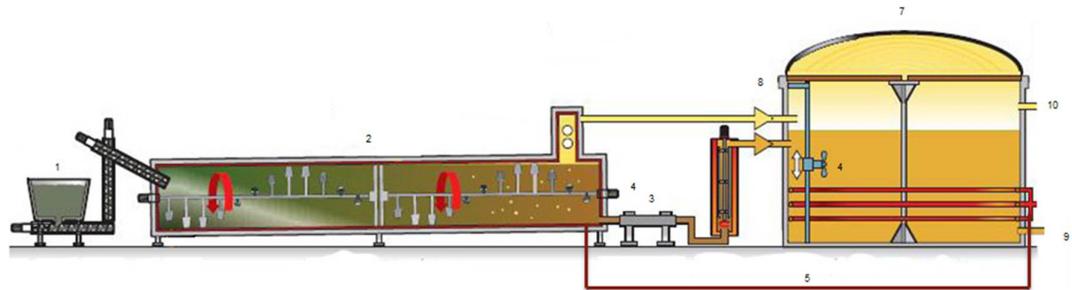
La descomposición anaeróbica consta de cuatro fases o etapas,

- Fase hidrolítica → Hidrólisis molecular → aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga.
- Fase acidogénica → Fermentación de productos disociados → ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios.
- Fase acetogénica → Formación acetato → ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Fase metanogénica → Formación de metano.

Los productos finales de la digestión anaeróbica son el biogás y el digestato o bioabono.

### Componentes principales

Los principales componentes de una planta de biogás lo constituyen un estanque de recepción de residuos, un biodigestor, un gasómetro (contenedor de gas), una estación de compresión y tratamiento del gas y accesorios para movilizar el sustrato (materias orgánicas primas) y digestato (materias orgánicas estabilizadas). En general, se cuenta con los siguientes componentes:



**Figura 3-28: Componentes principales – Planta de Digestión Anaeróbica de dos etapas (elaboración propia)**

Dónde:

1. Entrada del sustrato.
2. Estanque de digestión – Digestor 1 o primario.
3. Sistema de aislamiento y bombeo.
4. Agitador.
5. Calefacción.
6. Digestor 2 o secundario.
7. Protección contra sobrepresiones.
8. Salida del digestato.
9. Salida del biogás.

### Estado a nivel global

Esta tecnología ya existe hace mucho tiempo con sus inicios en 1859 en India y en 1930, cuando se iniciaron los primeros estudios para plantas a nivel industrial con respecto a su uso a partir de RSD. Solo entre Europa, Estados Unidos y Brasil existen al menos 733 plantas que tratan la parte orgánica de los RSD<sup>75 76 77</sup>.

La capacidad acumulada de estas plantas de digestión anaeróbica es de 7.750.000 ton/año de material orgánico (datos hasta el año 2014). Alemania con aprox. 2.000.000 ton/año y España con 1.600.000 ton/año tienen las capacidades más grandes instaladas a nivel mundial. En los EE.UU. hay pocas plantas principalmente por los bajos costos de disposición en rellenos sanitarios y el bajo precio de energía que no permite una operación rentable. En Europa, la tendencia de plantas de DA ha cambiado de plantas grandes aisladas o en combinación con plantas de compostaje hacia plantas integradas en centros de tratamiento de residuos donde se instala una línea de DA para recibir la parte orgánica desde los procesos de pre-tratamiento o de separación en origen, como parte integral de la gestión de residuos en una región.

Por otro lado, existen muchas plantas de DA que reciben otros tipos de residuos, como desechos de comida, residuos de agricultura y ganadería o lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas. En países en desarrollo es muy común utilizar los digestores anaeróbicos de pequeña escala para satisfacer las necesidades de calefacción y cocción de las comunidades rurales individuales. Según los datos de la EIA<sup>78</sup> solo China tiene un estimado de 8 millones de digestores anaeróbicos, mientras que Nepal tiene aproximadamente 50.000.

Las capacidades de estas plantas contemplan desde su uso domiciliario en zonas rurales de baja capacidad (sistemas integrados en el hogar) o sistemas pequeños utilizados en una granja, hasta plantas industriales para el tratamiento de lodos (PTAR). Ello dificulta separar en cantidad de plantas por tipo de sustrato o residuo en cada país.

A continuación, se presenta una tabla de resumen de la cantidad de digestores anaeróbicos utilizando RSD<sup>79</sup> en el mundo, a partir de la información entregada por los proveedores, dado que cada uno tiene su propio diseño o proceso patentado.

---

<sup>75</sup> IEA, 2015, *Bioenergy task, country report summary*

<sup>76</sup> Verde Nero, 2016, *Anaerobic digestion overview and opportunities for process intensification*,

<sup>77</sup> Columbia University, 2010, *Anaerobic digestion of food waste, Current status, problems and alternative product*,

<sup>78</sup> [https://www.c2es.org/technology/factsheet/anaerobic-digesters#\\_edn3](https://www.c2es.org/technology/factsheet/anaerobic-digesters#_edn3)

<sup>79</sup> California integrated waste management board, 2008, *Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste*.

**Tabla 3-24: Resumen de tecnologías de digestión anaeróbica a escala industrial comercializado<sup>80</sup>**

Proceso Proveedor	Plantas	Capacidad [ton/año]	Fases		Contenido sólido		Temperatura de operación	
			1	2	<20%	>20%	35°C	55°C
AAT	8	3.000-55.000	X		X		X	
ArrowBio	4	90.000-180.000		X	X		X	
BTA	23	1.000-150.000	X	X	X		X	X
Biocel	1	35.000	X			X	X	
Biopercolat	1	100.000		X		X	X	
Biostab	13	10.000-90.000	X		X			X
DBA-Wabio	4	6.000-60.000	X		X		X	
DRANCO	17	3.000-120.000	X			X		X
Entec	2	40.000-150.000	X		X		X	
Haase	4	50.000-200.000		X	X		X	X
Kompogas	47	1.000-110.000	X			X		X
Linde-KCA/BRV	8	15.000-150.000	X	X	X	X	X	X
Preseco	2	24.000-30.000						
Schwarting-Uhde	3	25.000-87.600		X	X			X
Valorga	22	10.000-270.000	X			X	X	X
Waasa	10	3.000-230.000	X		X		X	X

### 3.2.12.4 Condiciones de operación

La capacidad típica de una planta de digestión anaeróbica a nivel industrial va desde los 3.000 a 270.000 ton/año por línea.

Con respecto al pre-tratamiento, la producción de biogás en su cantidad y composición difieren significativamente. En la Tabla 3-25 se presenta un resumen de estos aspectos con rangos típicos de la composición del biogás producida por DA y el potencial de producción de biogás en base a materia prima. Estos valores no consideran ningún proceso de *upgrade* a bio-metano.

<sup>80</sup> Fuente: California integrated waste management board, 2008, Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste.

**Tabla 3-25: Composición de biogás por DA<sup>81</sup>**

Componente	Orden
Metano	50-75%
Carbón dióxido	25-50%
Nitrógeno	0-10%
Oxígeno	1-5%
Vapor de agua	0.1-2%
Sulfuro de hidrogeno	10-30.000ppm
Amoniaco	0.01-2.5mg/m <sup>3</sup>

### Mantenimiento y Vida Útil

En términos generales, las labores de mantenimiento de estas plantas se pueden clasificar en tres grandes ítems: mantenimiento menor, mantenimiento mayor y reemplazo de los equipos.

**Tabla 3-26: Resumen vida útil y ciclos de mantenimientos componentes principales (años)**

Componente	Vida útil	Mant. Menor <sup>1</sup>	Mant. mayor
Pre-tratamiento	15	1 <sup>1</sup>	5
Tratamiento de gases de combustión	20	1	5
Soplador	20	5	10
Motor	20	5	10
Generador	40	5	10-20
Transformador	20	5	10
Instrumentación & Control	10-20	1-5	5-10

Nota 1: Incluye reemplazo de repuestos definido en el manual de mantenimiento del proveedor

### Emisiones

Las emisiones atmosféricas se generan en la combustión del biogás. Al no ser obligatoria la declaración de emisiones de esta tecnología, el acceso a documentos oficiales de emisiones de los gases de combustión del biogás es limitada.

### Residuos del proceso

El proceso de digestión anaeróbica logra obtener biogás desde los residuos sólidos orgánicos, pero genera un residuo remanente revalorizable, llamado digestato, compuesto por material orgánico procesado. La cantidad generada de digestato equivale aproximadamente a la cantidad de residuo orgánico introducido en la digestión anaeróbica. Este material debe ser enviado a rellenos sanitarios o tratados para su uso como abono o fertilizante orgánico.

<sup>81</sup> Global Methane Initiative, 2016, Overview of Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste,

### Tamaño típico de las instalaciones

Las instalaciones consideran un terreno que abarca la planta y las instalaciones anexas y áreas de maniobra y circulación propias de una planta, con esto los tamaños típicos de una planta de acuerdo a su capacidad son:

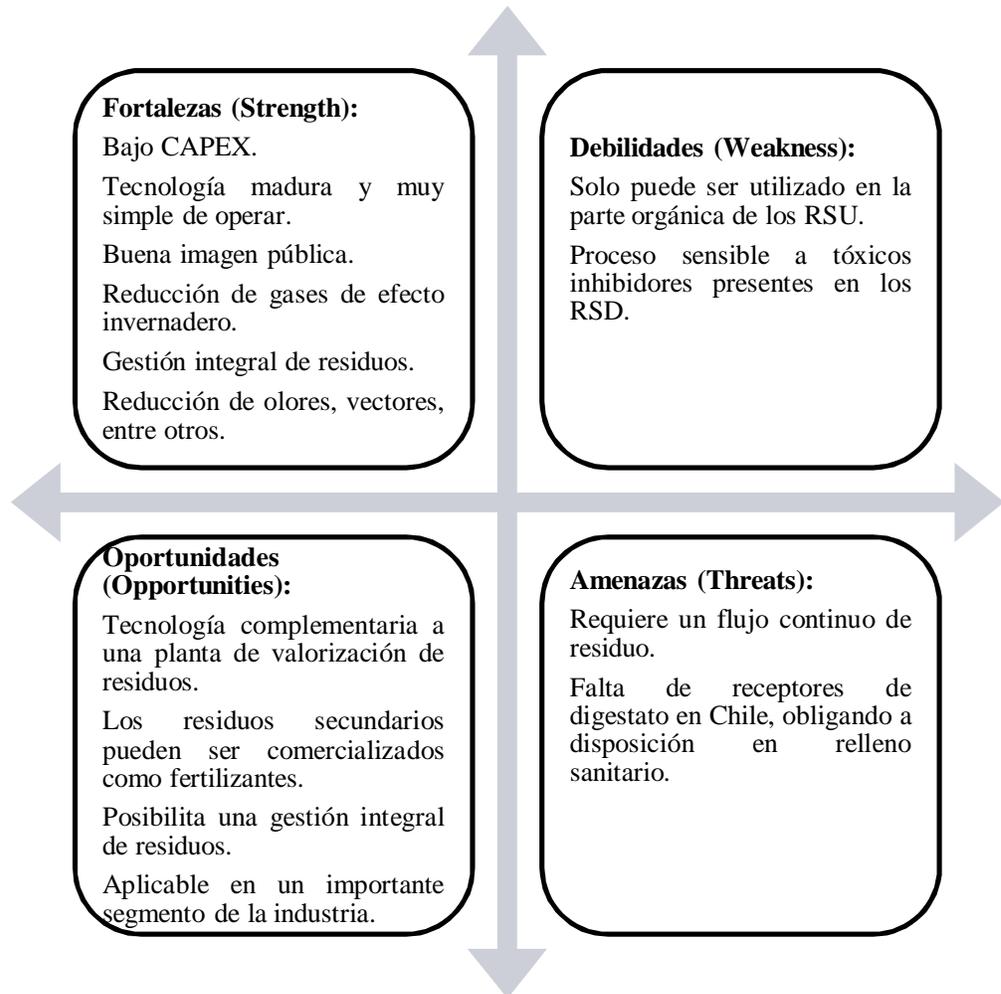
- 1 línea (10.000 ton/año/planta) → 1.000 – 2.000 m<sup>2</sup>
- 1 línea (100.000 ton/año/planta) → 2.000 – 3.000 m<sup>2</sup>
- 3 líneas (300.000 ton/año/planta) → 3.000 – 5.000 m<sup>2</sup>

### 3.2.12.5 Costos de Inversión

Los costos típicos de inversión de este tipo de tecnología varían para cada proyecto en particular. Sin embargo, en términos generales los costos de inversión totales de la planta, excluyendo el costo de desarrollo, terreno, accesos y conexión a servicios, para cada tamaño representativo son:

- 1 línea (10.000 ton/año/planta) → 4 millones de USD.
- 1 línea (100.000 ton/año/planta) → 6 millones de USD.
- 3 líneas (300.000 ton/año/planta) → 15 millones de USD.

### 3.2.12.6 Resumen y Análisis FODA (SWOT)



#### Resumen

En la Tabla 3-27 se resumen las características principales de la tecnología de digestión anaeróbica para 3 tamaños diferentes de planta.

**Tabla 3-27: Resumen de características de digestión anaeróbica**

Valores Típicos	1 línea menor tamaño	1 línea mayor tamaño	3 líneas mayor tamaño
Capacidad	50.000 ton/año	100.000 ton/año	300.000 ton/año
Eficiencia Generación. Eléctrica	5 %	7 %	8 %
Generación Eléctrica	0,8 - 1,2 MW	2,0 – 2,6 MW	7,3 – 9,0 MW
Tamaño instalaciones	1.000 – 2.000 m <sup>2</sup>	2.000 – 3.000 m <sup>2</sup>	3.000 – 5.000 m <sup>2</sup>
Personal de O&M requerido	4	6	12
CAPEX	4 MMUSD	6 MMUSD	15 MMUSD

### 3.2.13 Relleno sanitario con y sin aprovechamiento energético

#### 3.2.13.1 Descripción general

Por definición<sup>82</sup>, un relleno sanitario consiste en una obra de ingeniería para la disposición de residuos sólidos domiciliarios, en cuyo diseño se contemplan medidas tendientes a evitar emisiones, impactos al medio ambiente y/o riesgos para la salud de la población. Considera una impermeabilización basal, captación y tratamiento de líquidos percolados, cobertura final y un sistema de captación de gases.

Los rellenos sanitarios constituyen una fuente importante de biogás, que es de gran contenido energético, resultado del proceso de descomposición biológica de residuos sólidos de origen orgánico, conformado por los gases presentados en la Tabla 3-28. En este proceso el gas más predominante es el gas metano (CH<sub>4</sub>), que contribuye al efecto invernadero en más de 20 veces de lo que aporta el dióxido de carbono. Por lo tanto, al utilizar este gas eficientemente para generar energía eléctrica se obtiene una situación favorable para el medio ambiente.

**Tabla 3-28: Volumen de gases típicos presentes en rellenos sanitarios de Santiago<sup>83</sup>.**

Compuesto	Porcentaje de volumen
Metano (CH <sub>4</sub> )	48,5%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	40,2%
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	9%
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	2,3%

<sup>82</sup> Ministerio de Energía, 2011, *Propuesta de Perfeccionamiento de Entorno a Proyectos de Aprovechamiento Energético de Lodos y Residuos Sólidos Urbanos*.

<sup>83</sup> KDM, *Biogás: Un Combustible Sustentable El caso del Relleno Sanitario y Central Loma Los Colorados*.

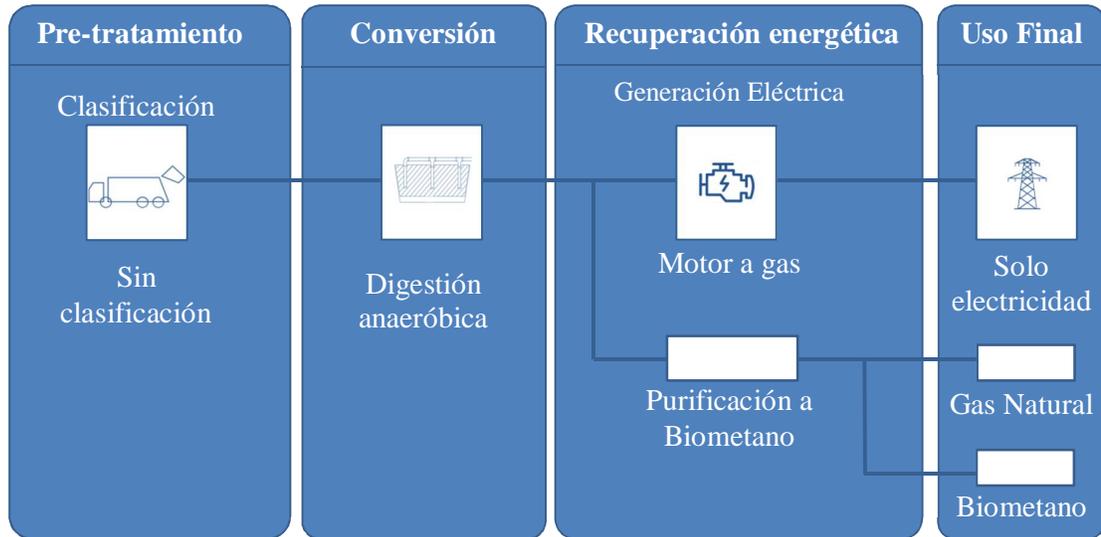


Figura 3-29: esquema general de tecnologías de relleno sanitario con captura de biogás

### 3.2.13.2 Pre-tratamiento

Los rellenos sanitarios, en la actualidad, no realizan ningún tipo de pre-tratamiento a los residuos, y solo proceden a su cuantificación y disposición.

Tabla 3-29: Requisitos para los residuos

Descripción	Valor
Tamaño máximo	Sin restricción
Poder calorífico	Sin restricción
Pre-tratamiento requerido	Ninguno
Pre-tratamiento opcional	Ninguno

### 3.2.13.3 Conversión

La producción de gases en rellenos sanitarios comienza mediante la descomposición anaeróbica de los residuos, al primer o segundo año de deposición, hasta la descomposición total de su contenido orgánico a los 15-25 años. La disminución de la producción de gases puede ser compensada con la deposición continua de RSD en el relleno sanitario.

Los rellenos sanitarios se pueden clasificar en tres tipos según el manejo que realicen de los gases generados:

- **Rellenos sanitarios sin captura de gas:** corresponden a rellenos sanitarios donde no se cuenta con ningún tipo de sistema o instalación destinada a la captura o manejo de los gases producidos en los procesos de descomposición de los residuos.
- **Rellenos sanitarios con captura e incineración de gas:** corresponden a rellenos sanitarios donde se cuenta con un sistema o instalación destinada a la captura y manejo de los gases producidos en los procesos de descomposición de los residuos,

donde se procede a la incineración directa de los gases para reducir la emisión del gas metano al ambiente.

- **Rellenos sanitarios con captura y aprovechamiento energético:** corresponden a rellenos sanitarios donde se cuenta con un sistema o instalación destinada a la captura y manejo de los gases producidos en los procesos de descomposición de los residuos, donde se procede a su tratamiento y posterior conversión a energía eléctrica en un conjunto motor-generator a gas.

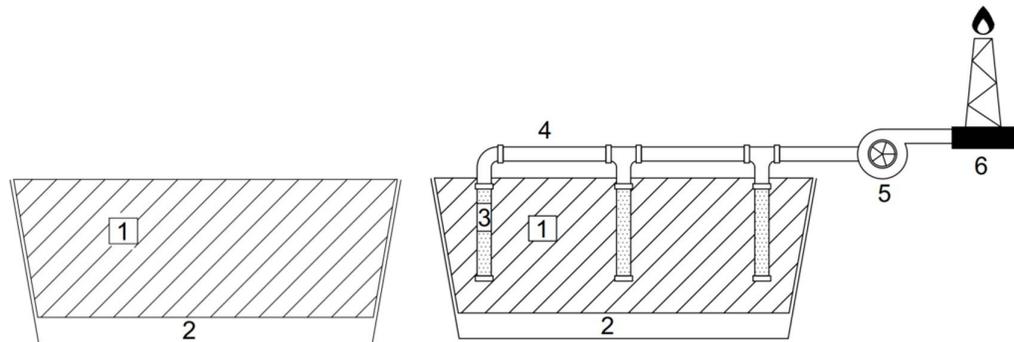


Figura 3-30: Esquema relleno sanitario (izquierda: sin captura de gas; derecha: con captura e incineración de gas).

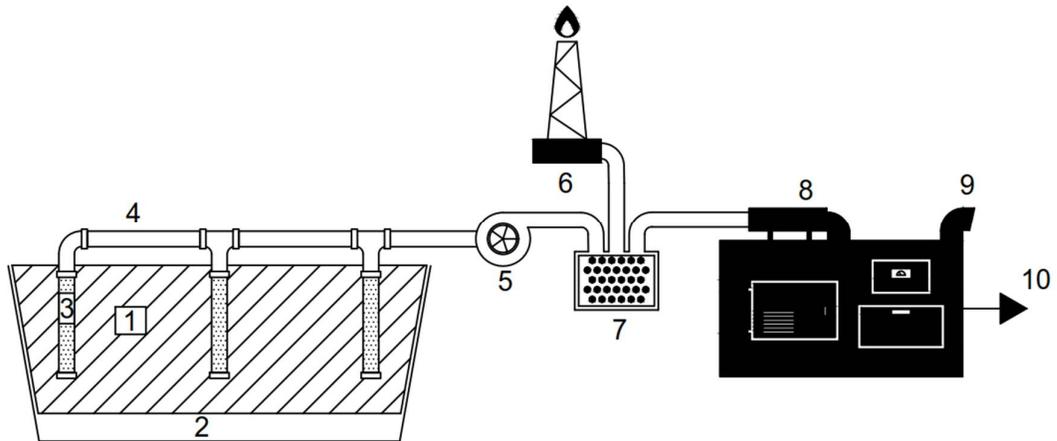


Figura 3-31: esquema relleno sanitario con captura de gas y aprovechamiento energético

Dónde:

1. Residuos.
2. Capa impermeable
3. Tuberías de captura.
4. Tuberías colectoras
5. Soplador.
6. Antorcha.
7. Sistema de proceso y filtrado de gases.
8. Motor de turbina de gas y generador de energía eléctrica.
9. Escape de gases.
10. Salida de energía eléctrica.

En el caso de no contar con recuperación energética, igualmente se realiza la quema de biogás en antorchas para reducir la emisión de CH<sub>4</sub> al ambiente. Para esto se puede tener un sistema con captación activa o pasiva del biogás, en cuyo primer caso se utiliza un soplador. Una antorcha está constituida por una cámara cilíndrica vertical donde el biogás se quemará a alta temperatura (1.200° Celsius).

### 3.2.13.4 Condiciones de operación

La capacidad operativa de las plantas más importantes en funcionamiento, en su primer año de funcionamiento, es la que se muestra en la Tabla 3-30. El flujo de biogás realmente utilizado para generación de energía eléctrica es variable y depende de la cantidad de biogás extraído por el sistema de extracción.

**Tabla 3-30: Condiciones de operación de plantas de relleno sanitario en Chile<sup>84</sup>.**

Proyecto	Biogás generado [m <sup>3</sup> /h]	Biogás captado (50% eficiencia) [m <sup>3</sup> /h]	Capacidad instalada [MW]
Santa Marta	14.764	7.382	13,5
Loma Los Colorados	17.516	8.758	18,2

#### **Eficiencia típica de la producción energética eléctrica [%]**

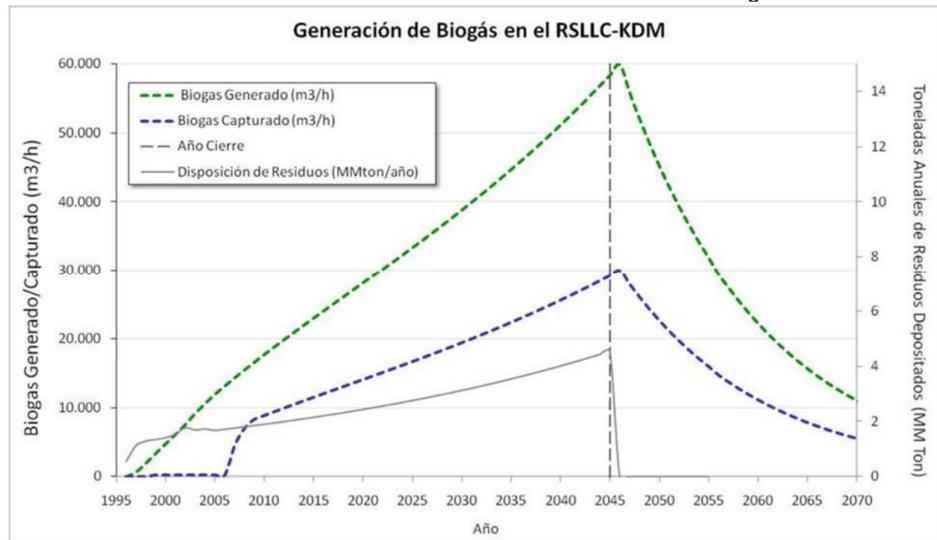
La producción de energía eléctrica es relativamente constante, a pesar de las fluctuaciones que pudieran haber en la composición del biogás. La eficiencia típica<sup>85</sup> es alrededor de un 42 % en condiciones normales.

#### **Ciclo de biogás y vida útil**

Según se muestra en la siguiente figura, los residuos sólidos demoran un tiempo en formar biogás posible de ser captado para la generación de energía eléctrica. La vida útil del sistema de recuperación de gas de un relleno sanitario es de aproximadamente 30 años, pues depende principalmente de la vida útil y mantenciones de los motores utilizados.

<sup>84</sup> Gobierno de Chile, Servicio de evaluación ambiental ERNC Santa Marta y Central Loma los colorados.

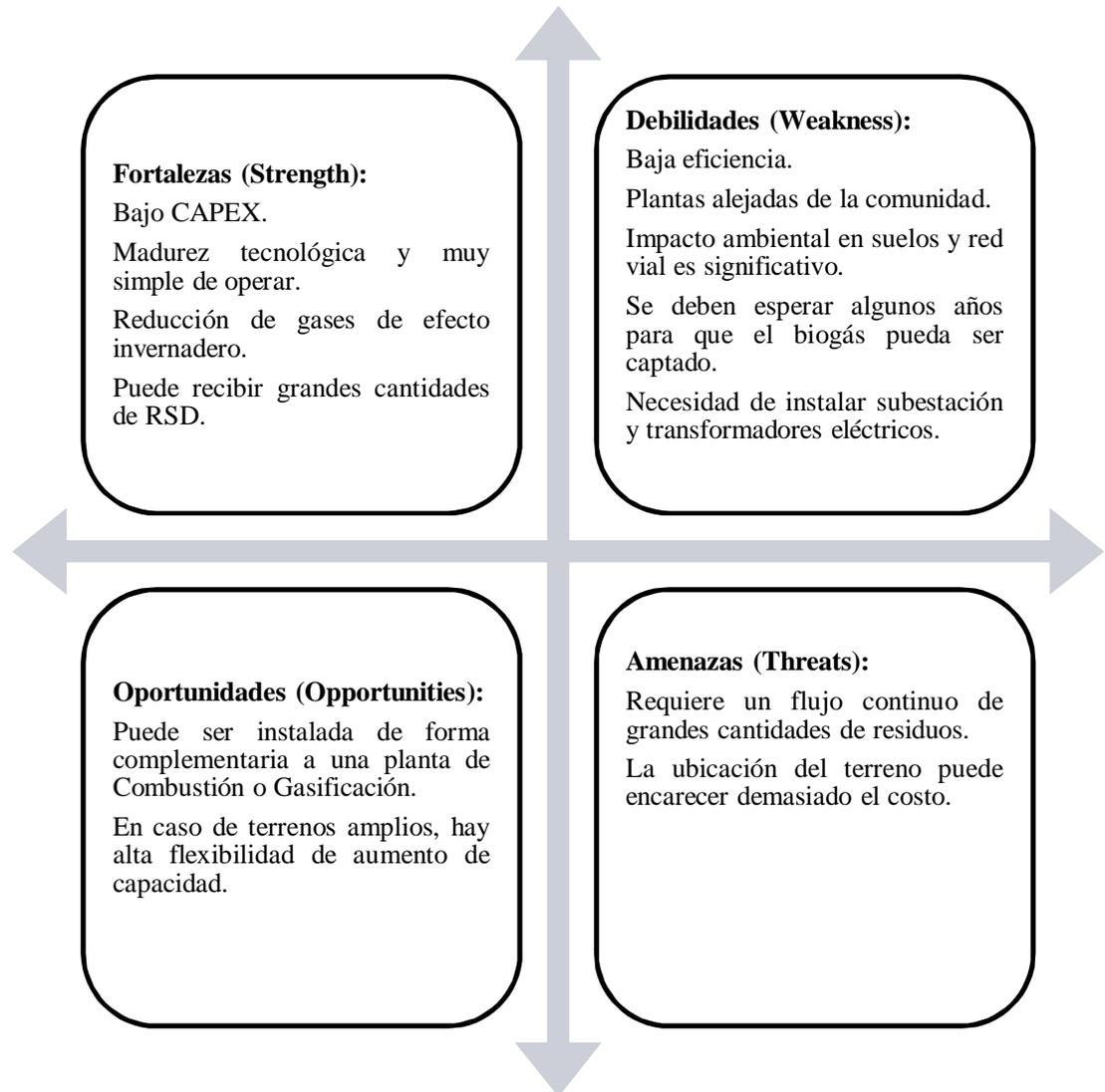
<sup>85</sup> Clarke Energy. 2014. Landfill gases brochure.



**Figura 3-32 Ciclo de biogás<sup>86</sup> – Relleno sanitario con aprovechamiento energético.**

<sup>86</sup> KDM, Biogás: *Un Combustible Sustentable “El caso del Relleno Sanitario y Central Loma Los Colorados”*.

3.2.13.5 Resumen y análisis FODA (SWOT)



**Tabla 3-31: comparación entre relleno sanitario y planta WTE**

Aspecto comparativo	Relleno Sanitario	Planta Waste to Energy (tecnología de parrilla)
Residuos idóneos	<ul style="list-style-type: none"> <li>No aplica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RSD típicamente sin pre-tratar</li> <li>Para asegurar la combustión se requiere un poder calorífico de los residuos mayor a 5,5 MJ/kg</li> </ul>
Pretratamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Actualmente sin pretratamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pretratamiento opcional para recuperación de materiales</li> </ul>
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emisión de gas metano, que es altamente contribuyente al efecto invernadero, con horizonte de generación entre 30-50 años (superior a vida útil de los rellenos sanitarios)</li> <li>Captación de gas actual apenas alcanza un 50%</li> <li>Presencia de olores, residuos tóxicos y RILes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emisiones cumplen normas internacionales.</li> <li>En la Región Metropolitana se deben controlar emisiones específicamente de NOx y MP equivalente según el plan de descontaminación vigente.</li> </ul>
Ubicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>En general alejados de las principales fuentes de RSD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normalmente ubicadas cerca de parques industriales y/o residenciales para aprovechar la máxima generación de energía y el mayor ahorro en transporte de residuos</li> </ul>
Superficie utilizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>41.6 ha para la disposición de 330.000 ton anuales por 20 años<sup>87</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>8 ha para el emplazamiento de la planta WTE y 2 ha para la disposición final de las cenizas considerando el tratamiento de 330.000 ton anuales por 20 años</li> </ul>
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se cuenta con experiencia de operación en Chile</li> <li>Se debe asegurar captación de gas metano del RS al exterior por peligro de explosión o asfixia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operaciones son más complejas y necesitan personal técnico calificado, extranjeros si es necesario.</li> <li>Se debe controlar y asegurar un poder calorífico que permita un suministro continuo de energía</li> </ul>
Generación de energía <sup>88</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En caso de contar con recuperación de energía, se genera aproximadamente 0,06 a 0,31 MWh/ton</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En promedio, las tecnologías WTE generan entre 2,61 a 2,84 MWh/ton</li> </ul>
Aspectos legales	<ul style="list-style-type: none"> <li>No existen leyes que regulen la emisión de gas metano</li> <li>Condiciones legales apropiadas para la operación y planificación de RS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No existe ley ni normativa aplicable específicamente a plantas WTE, esto podría complicar y demorar el proceso de evaluación y otorgamiento de licencias de operación</li> <li>Se aplican los límites de emisión atmosférica del PPDA de la RM</li> </ul>
Tarifa de disposición	<ul style="list-style-type: none"> <li>17,06 USD/ton<sup>89</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>17,31 a 66,68 USD/ton<sup>90</sup></li> </ul>

<sup>87</sup> Valor promedio en base a la capacidad y vida útil de todos los rellenos sanitarios en operación en la RM, considerando la disminución de vida útil en Relleno Santa Marta.

<sup>88</sup> Minnesota Pollution Control Agency, <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/w-sw8-02a.pdf>.

<sup>89</sup> Tarifa promedio de disposición, recopilada en base a contratos de disposición de las comunas de la Región Metropolitana, para el año 2015, excluyendo las comunas de Isla de Maipo, María Pinto, Calera de Tango y San José de Maipo de las cuales no se cuenta con la información.

<sup>90</sup> Considerando planta de 330.000 USD/ton, bajo modelo de negocio de concesión.

### **3.2.14 Recuperación energética**

En términos generales, el objetivo de este proceso es la recuperación energética de la energía producida por los residuos desde la cámara de combustión. En primer lugar existe la recuperación energética mediante uso de una caldera. En este caso, la energía que se libera de los residuos calienta los gases durante la combustión dentro de la caldera, llegando a temperaturas de hasta 1.100 a 1.200 °C. Este aire de altas temperaturas permitirá producir agua caliente o vapor, que puede ser usado en una turbina para la generación de electricidad. Así también, los gases de combustión que se liberan desde la caldera alcanzarán posteriormente una temperatura adecuada (aprox. 160 - 220 °C) que permitirá poder limpiarlos.

En general, se han establecido tres formas de recuperar esta energía a través de calderas en plantas WTE a nivel comercial, las cuales serán descritas en continuación, así como también dos otras alternativas utilizadas correspondientes a la recuperación energética a través de una turbina a gas y de motor a gas.

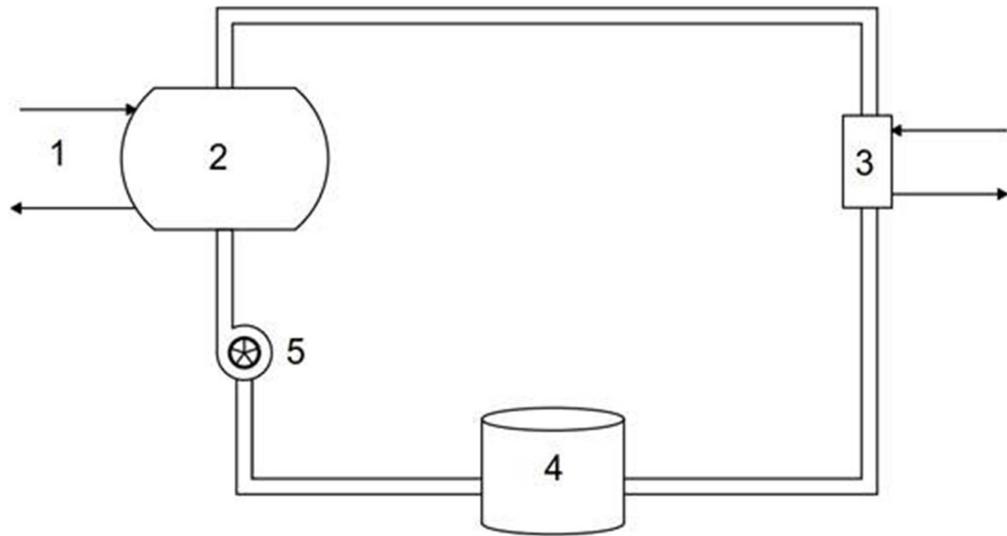
#### **3.2.14.1 Caldera de agua caliente<sup>91</sup>**

La utilización de una caldera de agua caliente es uno de los diseños más simples. El proceso consiste en que los gases de combustión fluyen a través de una caldera con agua caliente, donde se produce un intercambio de calor entre la energía de los gases que están calientes, y el acero de la caldera con agua fría. De esta forma, se transfiere el calor a la caldera, dejando el agua a una temperatura de entre 110 - 160 °C y los gases de combustión a una temperatura de entre 160 - 220 °C.

Una caldera puede tener una eficiencia energética de hasta 80%, lo que significa que el 80% de la energía de los gases de combustión será transferida al agua caliente. La recuperación energética está limitada por la temperatura del agua de refrigeración. Como se puede apreciar en la Figura 3-32, la energía de los gases de combustión es transferida a una caldera de agua caliente por un proceso de intercambio de calor del tubo de gas. Hay que tener especial cuidado por la corrosividad de los gases de combustión y los componentes de la caldera. Este sistema se aplica típicamente para aprovechar el calor con un sistema de calefacción distrital.

---

<sup>91</sup> World Bank, Technical Guidance Report, 1999, Municipal Solid Waste Incineration



**Figura 3-32: Esquema caldera de agua caliente**

Dónde:

1. Gases de escape (fuente de calor)
2. Caldera de alta baja presión de agua caliente
3. Condensador / intercambiador de calor con sistema de calefacción distrital
4. Estanque de acumulación
5. Sistema de bombeo

### **3.2.14.2 Caldera de vapor a baja presión<sup>91</sup>**

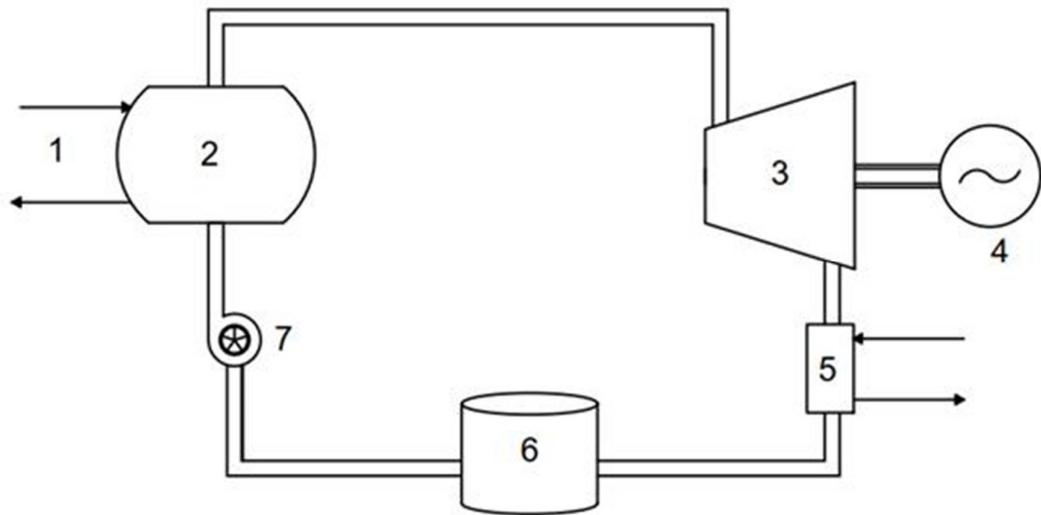
En caso que exista una demanda por vapor de procesos, se puede implementar una caldera de vapor de baja presión. La caldera es similar a la caldera de agua caliente en términos de complejidad. En este proceso, los gases de combustión calientes fluyen a través de la caldera, calentando el agua y produciendo vapor de altas temperaturas. Luego, dependiendo de la presión operativa de la caldera, el vapor se puede extraer a temperaturas entre 120 – 250 °C. Con una presión de vapor de 20 bar se puede obtener vapor saturado a temperaturas de alrededor de 210 °C. La temperatura del vapor depende principalmente de la industria que lo va a utilizar.

### **3.2.14.3 Caldera de vapor a alta presión con turbina de vapor<sup>91</sup>**

En caso que exista una demanda por vapor de alta presión, se puede implementar una caldera de vapor de alta presión. En términos de complejidad, es similar a la caldera a vapor de baja presión. En este proceso los gases de combustión calientes fluyen a través de la caldera, calentando el agua y produciendo vapor de altas temperaturas. Luego, dependiendo de la presión operativa de la caldera, el vapor se puede extraer a temperaturas que alcanzan los 400 °C con una presión que alcanza los 64 bar. Este vapor se puede ocupar especialmente para la producción de electricidad.

El vapor producido en la caldera se conecta a través de un colector común a la turbina de vapor. El vapor de escape de la turbina se condensa en un condensador enfriado por aire. El vapor condensado se bombea al tanque de agua de alimentación, que está equipado con un des-aireador. Desde allí, el agua de alimentación de la caldera se bombea de vuelta a las calderas utilizando bombas de alimentación de alta presión. El vapor condensado es luego precalentado por vapor de baja presión extraído de la turbina, contribuyendo así a una mayor eficiencia del ciclo.

La energía producida por el generador de turbina de vapor se suministra a la red después de asegurar/descontar el suministro de la demanda de energía eléctrica necesaria de la planta y el sitio. Adicionalmente, se podrían generar sinergias al generar electricidad con otras instalaciones en el entorno de la planta, utilizando el calor del vapor para la aplicación de procesos industriales.



**Figura 3-33: Esquema Caldera a vapor con turbina a vapor**

Dónde:

1. Gases de escape (fuente de calor)
2. Caldera de alta presión de vapor
3. Turbina de Vapor
4. Generador eléctrico
5. Condensador / intercambiador de calor con sistema de calefacción distrital
6. Estanque de acumulación
7. Sistema de bombeo

#### **3.2.14.4 Turbina de gas**

Esta tecnología se basa en la tecnología utilizada en las turbinas para aviones. En su operación básica, el aire fluye a través de un compresor hasta una cámara de combustión, elevando la presión de la cámara. El gas de síntesis se añade luego a la cámara y se inicia la combustión, de modo que la combustión genera un flujo de gases de escape calientes

de alta presión. Estos gases de alta temperatura y presión entran a una turbina, donde se expanden, disminuyendo así la presión de salida y produciendo el movimiento del eje durante el proceso. El trabajo de este eje de la turbina es mover el compresor de la entrada de aire y el generador eléctrico. La energía producida luego de este proceso se suministra a la red. Los gases expulsados pueden reutilizarse en una caldera.

#### 3.2.14.5 Motor a gas

El motor de gas es una central eléctrica que usa el gas de síntesis como medio de combustión interna. Esta tecnología tiene el rendimiento de conversión de energía térmica a eléctrica más elevado en la actualidad y produce mucha menos contaminación de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, este tipo de motores necesitan un gas homogéneo, que no es siempre fácil de obtener en las plantas de WTE por la naturaleza heterogénea de los residuos.

#### 3.2.15 Tratamiento de gases de combustión

Las tecnologías de WTE consideradas como primarias dentro del alcance de este estudio generan grandes volúmenes de gases de combustión. Estos gases transportan residuos de la combustión incompleta, donde su composición y características dependen en gran medida de la composición de los residuos tratados y las condiciones del proceso (tecnología). Sin embargo, es normal que estos gases transporten material particulado, metales pesados y una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Como primer elemento en un sistema de tratamiento de gases, es evitar o disminuir la formación de contaminantes en el proceso de combustión, en particular NO<sub>x</sub> y composiciones orgánicas como dioxinas a través de un proceso de combustión eficiente. Esto se logra con tiempos de retención y temperaturas adecuadas de los gases dentro de la cámara de combustión.

La selección del sistema de tratamiento de gases depende principalmente de los valores límites de emisiones locales donde se instala una planta. En este sentido, se cuenta con distintos sistemas de tratamiento con diversos niveles de complejidad y costo. Estos sistemas se aplican como parte de un o proceso de tratamiento de gases, el cual en general puede ser un proceso seco (o semi seco) o un proceso húmedo.

Independiente a los procesos antes indicados, para el abatimiento de los óxidos nitrosos, NO<sub>x</sub>, se utiliza la reducción no catalítica selectiva o la reducción catalítica selectiva.

El detalle de los sistemas de tratamiento de gases se presenta en el capítulo 4.1.6

#### 3.2.16 Producción y uso de energía final

Como fue indicado en el esquema general en la Figura 3-4, existen diferentes formas de utilizar la energía generada por el proceso de recuperación. A continuación se presenta una breve descripción de cada uso final como producto del aprovechamiento energético de RSD por las tecnologías analizadas. En términos generales, los productos principales de estos procesos son los siguientes:

- **Energía eléctrica:** el calor producido en el proceso de combustión se convierte en energía eléctrica de acuerdo a los procesos descritos anteriormente. Esta energía en primer lugar se utiliza para el autoconsumo de la planta. La electricidad

restante se inyecta a la red de distribución y será comercializada de acuerdo a las normas y leyes locales.

- **Calor para calefacción distrital:** el calor puede ser inyectado en una red de distribución local para climatizar edificios y/o casas en la cercanía de la planta, reemplazando los sistemas calefacción individual. El calor puede ser transportado por sistemas de vapor o de agua caliente, utilizando un intercambiador de calor vapor/agua, siendo este último sistema es el más utilizado en la actualidad.
- **Vapor para procesos industriales:** en caso de demanda por vapor se puede comercializar directamente vapor para procesos industriales, como por ejemplo, para limpieza de componentes. Este vapor será distribuido a través un sistema de transporte separado hacia los consumidores finales.
- **Refrigeración:** de la misma manera como se transmite la calefacción distrital, se puede aplicar el calor para refrigerar edificios aplicando enfriadores de absorción (*absorption chillers*) en vez de enfriadores de compresión que utilizan electricidad.
- **Biogás:** en caso de la digestión anaeróbica y el aprovechamiento energético de los gases de los rellenos sanitarios, el proceso de descomposición genera biogás que puede ser utilizado para generar electricidad con los mismos procesos descritos anteriormente. Sin embargo, es posible comercializar el biogás directamente como producto para entrega directa en la red de distribución de gas, venta en unidades definidas o como combustible de motores de vehículos (públicos y privados si hubiera mercado).
- **Syngas:** es generado durante la gasificación de RSD y puede ser quemado directamente dentro de la cámara de combustión agregando oxígeno, o puede ser extraído para su uso separado. En caso de no quemarlo dentro de la cámara de combustión, es necesario un proceso de purificación para que sea apto para combustión en un motor de gas.

La priorización de comercializar estos productos finales del proceso de aprovechamiento energético de los RSD resulta de un análisis económico entre la demanda en el mercado local versus la inversión para generar respectivamente los productos finales. De acuerdo a la evaluación económica, el diseño de una planta se ajustará a las necesidades del mercado eventualmente optimizando la generación eléctrica en caso de altos precios de energía, maximizando la producción de calor en una planta con conexión a una red de calefacción distrital, o en general, priorizando el producto más rentable para la operación de una central WTE.

### 3.3 Criterios y Metodología de evaluación de tecnologías

El siguiente capítulo tiene por objetivo definir los supuestos, escenarios y criterios utilizados para la evaluación de las diferentes alternativas tecnologías disponibles para el aprovechamiento energético de los RSD.

Para esto será considerado como escenario base la solución actual de disposición final en relleno sanitario, en sus variantes con aprovechamiento energético y sin aprovechamiento energético de los gases de recuperación.

Los siguientes criterios de evaluación se encuentran separados en dos grupos, criterios excluyentes que son requisito mínimo para la implementación y operación de una determinada tecnología, y criterios ponderados que serán evaluados de forma independiente para cada tecnología a fin de poder compararlas de manera cuantitativa.

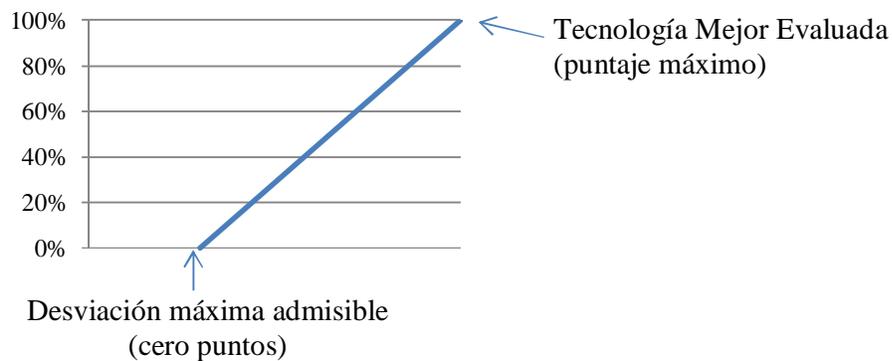
**Criterios excluyentes:**

- **Madurez Tecnológica:** para descartar tecnologías de carácter piloto o que hayan presentado problemas durante su operación que pudiesen poner en riesgo su implementación futura.
- **Análisis de Combustibles:** para descartar tecnologías que por las características de la composición de los residuos disponibles en la Región Metropolitana en cada uno de los escenarios, no fueran técnicamente apropiadas para su aprovechamiento.

**Criterios Ponderados:**

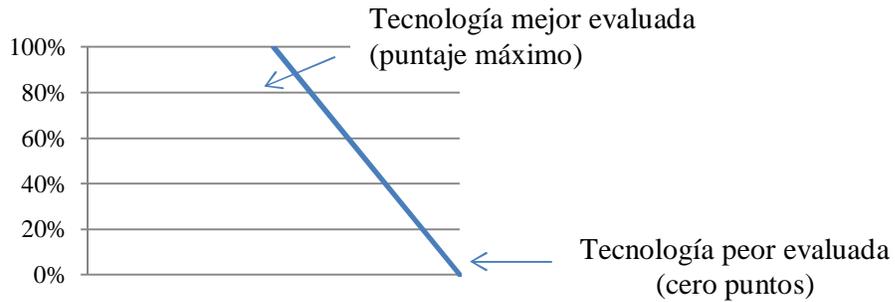
- Cumplimiento Ambiental
- Disponibilidad
- Costos Operacionales
- Costos de Inversiones
- Vida Útil

Para los criterios cumplimiento ambiental, disponibilidad y vida útil, donde un mayor valor es mejor, se asignará la totalidad de los puntos a la tecnología mejor evaluada, y cero puntos a la tecnología con menor desempeño. Las demás tecnologías serán puntuadas linealmente en base a las anteriores.



**Figura 3-33 Asignación lineal de puntos, criterio ambiental, disponibilidad y vida útil.**

Para los criterios de cumplimiento de CAPEX y OPEX, donde un menor valor es mejor, se asignará la totalidad de los puntos (100%) a la tecnología mejor evaluada, y cero puntos a la tecnología peor evaluada. Las demás tecnologías serán puntuadas linealmente en base a las anteriores.



**Figura 3-34: Asignación lineal de puntos, criterios CAPEX y OPEX**

**Tabla 3-32: Resumen de Criterios de evaluación**

	Criterio	Sub / Criterio	Puntos
Excluyentes	Madurez Tecnológica	Número de Plantas Capacidad Instalada Información de Calidad	Go / No go
	Análisis de Combustible		Go / No go
Ponderados	Cumplimiento Ambiental	Emisiones atmosféricas Ruidos RILes RISes	30
	Disponibilidad		5
	Costos Operacionales		30
	Costos de Inversiones		30
	Vida Útil		5

La optimización del diseño de una planta WTE depende del objetivo principal de cada instalación y de las condiciones del mercado local. En términos generales, se define una oferta de residuos con sus características y objetivos o restricciones operativas respecto a lo que se debe reciclar (por ejemplo metales, vidrios, cartones, etc.). Con las condiciones del mercado eléctrico y sus tarifas de venta versus posibles usuarios de calor según la ubicación del proyecto, se define el diseño final de una planta, optimizando sus ingresos pero no necesariamente su rendimiento global.

Por ende, la eficiencia de generación eléctrica y de calor ingresan en la evaluación económica una vez se define el esquema de comercialización de los productos de la planta (electricidad, calor y materiales revalorizables) en la etapa 2 de este estudio.

**Tabla 3-33: Tabla que se utilizará como resumen de evaluación**

	Criterios	Combustión			Gasificación			Pirólisis	DA
		Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
					Turbina a Vapor	Turbina a Gas			
Excluyentes	Madurez Tecnológica								
	Análisis de Combustible								
	Cumplimiento Ambiental								
	Disponibilidad								
Ponderados	Costos Operacionales								
	Costos de Inversiones								
	Vida Útil								
	Total								
Ranking									

Nota: esta tabla se encuentra vacía intencionalmente, la evaluación se realiza en el Capítulo 5, Etapa 2 – Objetivo Especifico 4.

### 3.3.1 Madurez Tecnológica

Se evaluará cada una de las tecnologías en términos de madurez tecnológica, cuantificando el número de plantas en operación, potencia instalada y disponibilidad de información de calidad y confiable de la operación de estas plantas.

- Número de plantas en operación, es la sumatoria de plantas en operación comercial de una tecnología específica conocida a la fecha.
- Referencias de proyectos fracasados, su descripción y razón de la falla o fracaso.

Para los puntos anteriores solo se considerará la información disponible de plantas con una antigüedad mayor a un año calendario desde la entrada en operación comercial, donde se cuente con la información del operador o el fabricante y esta haya sido validada por alguna institución o consultor independiente.<sup>92</sup>

Se utilizará como criterio de exclusión aquellas tecnologías que no cuenten con un mínimo de plantas construidas en operación, o con un bajo porcentaje de potencia instalada respecto del total de potencia instalada en plantas de WTE, o tecnologías que no cuenten con información respecto a su operación o que esta información muestre anormalidades significativas.

#### 3.3.1.1 Número de plantas en operación

De acuerdo al levantamiento de información realizado por el consultor (Anexo F), en la actualidad existen aproximadamente 1.600 plantas WTE operativas en el mundo. En la Tabla 3-34 se muestra un listado de plantas WTE para RSD, separadas por país y tecnología. Sin embargo, existen otras plantas de estas tecnologías que utilizan otros elementos como combustible principal, como carbón, biomasa y gas, donde se agregan RSD en un porcentaje menor para la optimización de la operación. Además existen otras plantas que utilizan otros tipos de RSD, como lodos de tratamiento de aguas servidas, grasas y aceites de residuos comerciales.

El listado se limita a plantas en operación comercial, excluyendo plantas ya decomisionadas, en construcción, o en periodo de pruebas y puesta en servicio. La información de algunos países asiáticos no se ha podido desglosar al mismo nivel de detalle debido a dificultades para el acceso a la información, ya que está disponible solo en idioma original. Por lo tanto, para estos países se ha derivado la distribución en base a información de proveedores de tecnologías, publicaciones de asociaciones nacionales, y publicaciones académicas.

En términos generales el listado debe ser considerado como referencial y no en términos absolutos, ya que representan un compendio de información que se encuentra en constante actualización.

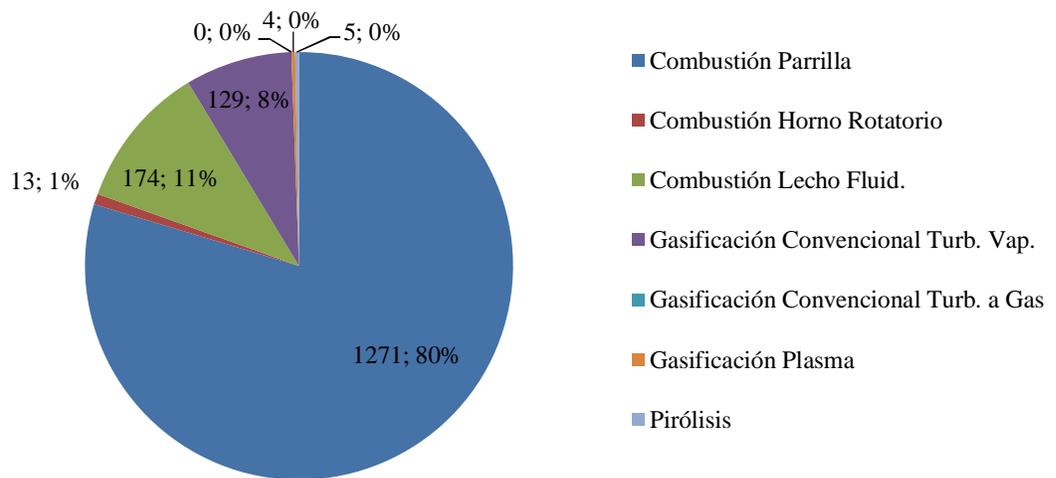
En el caso de plantas con más de una tecnología, como centros de gestión integral de residuos, se ha considerado solo tecnología principal. La información de actualizaciones y cambios de tecnología de plantas en operación ha sido actualizado cuando la información

---

<sup>92</sup> Fuentes de información: *Due diligences* y Análisis de mercado

es accesible al público. Por lo tanto, es posible encontrar la misma planta en distintas referencias y directorios indicando tecnologías diferentes.

Aunque existe un gran número de plantas de digestión anaeróbica en el mundo, estas en muchas ocasiones están instaladas como parte de un tratamiento secundario dentro de un complejo de gestión de RSD, que muchas veces es solo conocido por la planta principal que lo compone. Además, muchas de las plantas indicadas como plantas de “Waste” en realidad hacen referencia a otros residuos de origen agrícola, agro industrial y para el caso de las que indican “municipal waste” en realidad hacen referencia a residuos del proceso de tratamiento de aguas servidas “municipal” y no a RSD o RSM. Por lo tanto, no se incluyen en la Tabla 3-34.



**Figura 3-35: Distribución porcentual de número de plantas en operación por tecnología en el mundo.**

De la información obtenida durante el desarrollo de este estudio, se puede observar que la tecnología de combustión con parrilla es la tecnología con mayor presencia internacional y con mayor experiencia en ingeniería y operación. Muchas de estas tecnologías provienen de otros usos, y están siendo modificadas para su aplicación con RSD como combustible. Un ejemplo de esto es la combustión de lecho fluidizado, la cual es muy utilizada en la combustión de biomasa con muchos años de experiencia en la industria de papel y celulosa. Otras tecnologías están aplicadas en mercados particulares como la gasificación con turbina a gas en Japón, Reino Unido, Finlandia, Italia, Noruega y la gasificación con plasma en Japón y Corea del Sur, con altos costos de disposición de residuos y/o altos precios de energía. Para el caso de Chile y particularmente de Santiago, el escenario es muy diferente de estos mercados, en particular en lo referente a los bajos costos para disponer los RSD en un relleno sanitario y los precios de energía bajando cada vez más por la creciente penetración de las energías renovables.

En la Tabla 3-34 se muestra un listado consolidado de plantas por tecnología en el mundo, este listado debe ser considerado como referencial, debido a la diversidad de fuentes y la constante incorporación de nuevos proyectos y salida de servicio de proyectos antiguos. La metodología y fuentes de información se presentan en el Anexo F.

**Tabla 3-34: Resumen de plantas instaladas por país y tecnología**

País	Combustión			Gasificación			Pirólisis	Total
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
				Turb. Vapor	Turb. a Gas			
Andorra	1							1
Austria	9		4					13
Azerbaiyán	1							1
Bélgica	16		1					17
Islas Bermudas	1							1
Canadá	5							5
Suiza	31							31
China	49		47					96
República Checa	3							3
Alemania	87	1	3					91
Dinamarca	22	2	3					32
Estonia	1							1
España	9		1					10
Finlandia	5			1				6
Islas Feroe	2							2
Francia	125	4	5					134
Reino Unido	29	1	5	1				36
Hungría	1							1
Irlanda	2							2
India	3							3
Islandia	4							4
Italia	38	2	6	2				48
Jersey	1							1
Japón	612		80	122		3	5	822
Corea del Sur	35		5			1		41
Luxemburgo	1							1
Mónaco	1							1
Malta	1							1
Malasia	1							1
Países Bajos	11	1						12
Noruega	17	2	2	3				24
Polonia	2							2
Portugal	3							3
Qatar	1							1
Rusia	2							2
Suecia	29		7					36
Singapur	4							4
Eslovaquia	1							1
Sierra Leona	1							1
Tailandia	3							3
Turquía	1							1
Taiwán	21							21
EE.UU.	69		7					76
Vietnam	1							1
Lituania	2							2
<b>Total Tecnología</b>	<b>1271</b>	<b>13</b>	<b>174</b>	<b>129</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1596</b>

### 3.3.1.2 Referencias de proyectos fracasados, su descripción y razón de la falla o fracaso.

Hay que mencionar que algunas plantas construidas, luego de un periodo de tiempo, fueron abandonadas o decomisionadas debido a sus rendimientos bajo lo proyectado y altos costos de operación. Sobre dos billones de dólares americanos<sup>93</sup> han sido invertidos en proyectos cerrados o cancelados antes de entrar en operación comercial.

La tecnología de gasificación por plasma, es la más reciente de las tecnologías de combustión, por lo que solo algunas plantas de pequeña escala o piloto han sido instaladas con éxito. Entre los casos más emblemáticos con mayores problemas se encuentran<sup>94</sup>:

- Hamm-Uentrop, Alemania, Gasificación: daño por corrosión al equipamiento y a la estructura del edificio, hasta el colapso del techo y la chimenea.
- Teesside, Inglaterra, Gasificación con Plasma la empresa contaba con contrato para proveer electricidad por medio de dos plantas de gasificación – WTE, después de dos años de operación de la primera planta y el inicio de construcción de la segunda abandonaron el proyecto, por dificultades técnicas en el diseño y la operación. Actualmente se encuentra en construcción una nueva planta de combustión de parrilla.
- Dargavel, Escocia, Gasificación: se encontró en operación desde 2009 al 2012 cuando le fue retirada la licencia ambiental debido a incumplimiento constante de las emisiones, incumplimiento de la generación eléctrica, y algunos eventos de incendio durante la operación.
- Ottawa, Canadá, Gasificación con Plasma: se encontró en operación desde 2008 al 2011, durante los cuales las emisiones estaban excediendo los límites. Durante estos años tuvieron variados problemas de operación con una disponibilidad 25% durante los cuales solo lograron un rendimiento del 27% de lo proyectado.
- Green Bay, EE.UU. Gasificación: el proyecto original no consideraba ningún tipo de chimenea, sin embargo, una vez ejecutado, el proyecto tenía una estructura de chimenea que excedía la altura máximas de la ciudad. El proyecto se terminó desistido en la corte.
- New Earth Solutions, Inglaterra, Gasificación: este proyecto consistente en seis plantas presentaban un desempeño menor a lo proyectado en todas las plantas debido a costos de operación y mantenimiento por sobre lo proyectado. La empresa se declaró en quiebra en 2016.
- Seamer Carr, Inglaterra, Pirólisis: esta planta fue construida, pero nunca terminó su proceso de comisionamiento y puesta en servicio.
- Karlsruhe, Alemania, Gasificación: esta planta presentó numerosos problemas incluyendo, baja disponibilidad (~20%), baja o nula producción de energía eléctrica, incumplimientos a la normativa ambiental en las emisiones atmosféricas y a las agua, sobre consumo de agua para los procesos, alta corrosión incluyendo el desprendimiento de elementos estructurales, causando peligro de derrumbe y explosión. Finalmente la planta fue cerrada en 2004 después de 5 años sin entrar en operación comercial.

<sup>93</sup> Considerando la suma de las inversiones de los casos más emblemáticos solo en Europa

<sup>94</sup> Fuentes de información: Due diligences y Análisis de mercado

- Wollongong, Australia, Gasificación: durante tres años de comisionamiento y puesta en servicio, no pudieron cumplir la normativa ambiental de emisiones, excediendo hasta 13 veces los valores límites. El proyecto se quedó sin fondos en 2004.

### 3.3.2 Análisis de Combustibles

Las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético no son adecuadas para todos los tipos de residuos, en la Tabla 3-35 se muestra de forma referencial el nivel de éxito de la aplicación de cada tecnología a los diferentes tipos de residuos.

Tabla 3-35: Análisis del uso de distintos tipos de residuos en las tecnologías WTE <sup>95</sup>

Tecnologías		RSD		Otros residuos <sup>96</sup>			
		No tratados	Pre-tratados o seleccionados	Residuos Peligrosos	Residuos Biológicos Infecciosos	Lodos de plantas de tratamiento	Residuos Agrícolas o productos agrícolas
Combustión	Parrilla alternada	++	++	-	-	+	--
	Parrilla móvil	+	+	-	-	+	--
	Parrilla de rodillos	+	+	-	-	+	--
	Parrilla refrigerada	+	++	-	-	+	--
	Parrilla con Horno rotatorio	+	+	+	-	+	--
	Horno Rotatorio	-	+	++	+	++	--
	Horno Rotatorio refrigerado	-	+	+	+	+	--
	Lecho Fluidizado burbujeante	--	+	-	+	-	--
	Lecho Fluidizado Circulante	--	+	-	++	-	--
	Lecho Fluidizado rotatorio	+	+	-	+	+	--
Gasificación convencional		--	-	--	--	--	--
Gasificación por Plasma		--	--	--	--	--	-
Pirólisis		--	--	--	--	--	++
Digestión Anaeróbica <sup>(1)</sup>		-	++	--	--	++	++
Fermentación <sup>(2)</sup>		--	-	--	--	--	-

++: Utilizado ampliamente con éxito  
 +: Se ha utiliza con éxito  
 nota 1: solo fracción orgánica de los residuos

--: Normalmente no se utiliza  
 --: Rara vez se ha utilizado o no ha tenido éxito,  
 nota 2: solo fracción de aceites y grasas

<sup>95</sup> Elaboración propia en base de Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European Commission

<sup>96</sup> Otros residuos, no incluidos en el alcance del presente estudio

En esta tabla se puede observar la flexibilidad de las tecnologías de combustión con respecto a su aplicación a RSD. Las tecnologías de gasificación y pirólisis se encuentran en desarrollo para ser aplicadas con RSD, ya que los proyectos ejecutados a la fecha no han entrado en operación comercial por deficiencias e incumplimientos técnicos. Las plantas de DA han resultado exitosas pero se restringen solo al tratamiento de la fracción orgánica de los RSD, por lo que este tipo de plantas en general pueden formar parte de una gestión integral de residuos con las tecnologías de combustión.

**Tabla 3-36: Requerimientos de combustible RSD para las distintas tecnologías WTE**

Descripción	Combustión			Gasificación			Pirólisis	DA
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
				Turb. Vapor	Turb. a Gas			
Tamaño máximo [mm]	50 a 500	50 a 500	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	50
Poder calorífico [MJ/kg]	7 – 18	7 – 18	5.5 – 30	5.5 - 30	5.5 - 30	5.5 - 30	5.5 - 30	NA
Poder calorífico típico [MJ/kg]	8 – 11	8 – 10	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF])	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF]	NA
Pre-tratamiento requerido	SM (< 500 mm)	SM (< 500 mm)	TR	TR – CA	TR – CA	TR – CA	TR – CA	TR – CA
Pre-tratamiento opcional	SM – TR	SM – TR	CA – CM	CM	CM	CM	CM	CM – T – QM – B

SM: Separación mecánica de elementos grandes  
 TR: Trituración  
 CA: Clasificación Automática  
 CM: Clasificación Manual

T: Pre-tratamiento Térmico  
 QM: Pre-tratamiento Químico  
 B: Pre-tratamiento Biológico

### 3.3.3 Análisis Cumplimiento Ambiental

El objetivo de este análisis es ponderar el cumplimiento regulatorio de cada tecnología, considerando las emisiones significativas o características de cada una. Esto será realizado en función de la regulación nacional existente y respecto a la normativa internacional específica para la tecnología WTE.

El proceso de evaluación ambiental no será analizado en esta etapa, sino que solo el cumplimiento en términos de parámetros específicos. El análisis de la factibilidad de aprobación bajo la normativa existente será revisado en la siguiente etapa de este estudio.

#### *Emisiones atmosféricas (gases / material particulado)*

- Decreto 29, publicado el 12 de septiembre de 2013. Ministerio del Medio Ambiente. Establece norma de emisión para incineración, co-incineración y co-procesamiento y deroga el Decreto N° 45, de 2007, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Ante la falta de una normativa específica a WTE, aplica a todas las tecnologías en estudio.
- Directiva 2010/75/EU del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, Anexo VI.
- Plan de Descontaminación Ambiental de la Región Metropolitana.

En general, la normativa europea para plantas de WTE es la más exigente de la industria, y como se observa en la Tabla 3-37, en la mayoría de los parámetros permite hasta un 50% de los valores para emisiones permitidos en la normativa chilena. Además, en varios países existe una normativa aún más exigente.

Para la evaluación del cumplimiento se utilizarán datos de emisiones de plantas WTE en operación (informes de emisiones públicos), de los cuales se utilizará el rango de valores promedio de emisiones.

Tabla 3-37: Valores límites de emisión para incineración

Contaminante		DS 45/2007	P.D. RM	EU	Unidad
Material Particulado	MP	30,0	20	10,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	50,0	15 a 22 <sup>(1)</sup>	50,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	300,0	122	200,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Carbono Orgánico Total	COT	20,0	N/A	10,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono	CO	50,0	114	n.a.	mg/Nm <sup>3</sup>
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal	Cd	0,1	N/A	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	0,1	N/A	0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
Berilio y sus compuestos, indicado como metal	Be	0,1	N/A	n.a.	mg/Nm <sup>3</sup>
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn	1,0	N/A	0,5 <sup>(2)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te	1,0	N/A		mg/Nm <sup>3</sup>
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V	5,0	N/A		mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	20,0	N/A	10,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	2,0	N/A	1,0	mg/Nm <sup>3</sup>
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	5,0	N/A	n.a.	mg/Nm <sup>3</sup>
Dioxinas y furanos	TEQ	0,2	N/A	0,1	ng/Nm <sup>3</sup>

nota 1: para plantas antiguas con una capacidad menor a 6 toneladas por hora

nota 2: no incluye Zinc (Zn), Selenio (Se), ni Telurio (Te).

#### Ruido

- Decreto 38, publicado el 12 de junio de 2012. Ministerio del Medio Ambiente. Establece norma de emisión de ruidos generados por fuentes que indica, elaborada a partir de la revisión del Decreto N° 146, de 1997, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

#### RILes

- Decreto 90, publicado el 07 de marzo de 2001. Ministerio Secretaria General de la Presidencia. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- Decreto 609, publicado el 20 de julio de 1998. Ministerio de Obras Públicas. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.

*RISes*

- Decreto 148, publicado el 16 de junio de 2004. Ministerio de Salud. Establece reglamento sanitario sobre el manejo de residuos peligrosos.
- Council Decision 2003/33/EC Establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC.

**Tabla 3-38: Criterios de calificación de residuos peligrosos que aplican a cenizas**

Sustancia	D. 148/2004	Norma EU 2003/33/EC	Unidad
Arsénico	5	2,5	mg/l
Cromo	5	7	mg/l
Mercurio	0,2	0,2	mg/l
Plomo	5	5	mg/l
Selenio	1	0,7	mg/l
Bario	100	30	mg/l
Cadmio	1	0,5	mg/l
Cloridatos		2500	mg/l
Fluoridatos		50	mg/l
Cu		10	mg/l
Sulfatos		5000	mg/l
Antimonio (Sb)		0,5	mg/l
Molibdeno		3	mg/l
Niquel		4	mg/l
Zinc		20	mg/l
Solidos Totales Disueltos		10000	mg/l
Carbón Orgánico Total		100	mg/l

A continuación se presenta una tabla comparativa de las emisiones a la atmósfera y residuos que generan las distintas tecnologías WTE.

Tabla 3-39: Resumen de parámetros ambientales

Criterios		D. 45/2007	EU	Combustión			Gasificación			Pirólisis	DA
				Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
							Turb. a Vapor	Turb. a Gas			
Material Particulado	mg/Nm <sup>3</sup>	30,0	10,0	0,1 – 3	0,25 – 2,6	0,1 – 2	0,24	Sin Información	Sin Información	Sin Información	
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	50,0	50,0	0,9 – 22	15 – 30	4,0 – 26,0	19,8				1,0 – 509 <sup>(4)</sup>
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	300,0	200,0	39 – 127	110 – 160	50 – 140	42				2,9 – 147 <sup>(4)</sup>
Carbono Orgánico Total	COT	20,0	10,0	0,01 – 1	0,6 – 1,5	1,0 – 3,3	0,2				
Monóxido de Carbono	CO	50,0	n.a.	3,7 – 35	3 – 20	3,6 – 45	2,0				35,6 – 151,9 <sup>(4)</sup>
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal	Cd	0,1	0,05	0,0001 – 0,0065		0,0025	0,00002				
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	0,1	0,05	0,0001 – 0,05			0,003				
Berilio y sus compuestos, indicado como metal	Be	0,1	n.a.	Sin información							
Plomo + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn	1,0									
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te	1,0	0,5 <sup>(2)</sup>	0,002 – 0,005		0,075	0,002				

Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V	5,0								
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	20,0	10,0	0,07 – 6,5	2 – 6	6,5	3,6			
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	2,0	1,0	0,001 – 0,009			0,02			
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	5,0	n.a.	(1)		(1)				
Dioxinas y furanos	TEQ	0,2	0,1	< 0,02		0,001	0,001			
Ceniza de Fondo	[kg/ton]			246	180	110	150			N/A
Ceniza Volátil	[kg/ton]			26	96	120	70			
Digestato	[kg/ton]									990 <sup>(3)</sup>
Residuos Sólidos Totales	[kg/ton]			272	276	230	220			990 <sup>(3)</sup>
Residuos Sólidos Totales a Rellenos Sanitarios	[kg/ton]			30 <sup>(2)</sup>	100 <sup>(2)</sup>	130 <sup>(2)</sup>	80 <sup>(2)</sup>			990 <sup>(3)</sup>

Nota 1: bajo límite de detección

Nota 2: dependiendo de la legislación aplicable a la disposición de cenizas de incineración

Nota 3: considerando que no existe mercado para comercialización de digestato

Nota 4: considerando generación con motor de gas con abatimiento del 99% de los gases

### 3.3.4 Disponibilidad

Este análisis tiene por objetivo determinar la disponibilidad media de cada tipo de tecnología, en función de la cantidad de paradas de mantenimiento programadas requeridas, duración media de las paradas de mantenimiento anual, horas anuales de disponibilidad informada por los fabricantes, y las horas anuales de operación de diferentes plantas en operación.

### 3.3.5 Costo Operacional OPEX

Este análisis tiene por objetivo constatar los costos e ingresos propios para el funcionamiento de cada tecnología, excluyendo los costos financieros y de administración que dependen del modelo de negocio a implementar y no de la tecnología.

Con la finalidad de poder realizar las estimaciones de costos de operación, se definirán tres plantas tipos para cada tecnología:

- 1 línea de proceso, menor tamaño
- 1 línea de proceso, mayor tamaño
- 3 líneas de proceso, mayor tamaño

Para cada una de estas plantas tipo se presentarán los siguientes parámetros:

- Personal Requerido: se identificará el perfil y la cantidad de personal requerido para la operación y mantención normal.
- Consumo de servicios auxiliares: se presentarán valores típicos de consumo de energía en servicios auxiliares.
- Mantenimientos anuales: se presentarán valores típicos de cantidad y duración de las paradas de mantenimiento anual.
- Disponibilidad: en base a la información de plantas en servicio se presentarán los valores típicos de disponibilidad.
- Eficiencias típicas: se presentarán eficiencias típicas de generación de calor y energía eléctrica.
- Producción típica de vapor (cuando aplica).
- Producción típica de energía eléctrica.
- Ingresos esperados por comercialización de la energía eléctrica: se presentarán proyecciones de ingresos esperados por comercialización de la energía en base a proyecciones de precios de la energía tanto en mercado Spot como en Precio Nudo Estabilizado, según el tamaño de la planta.
- Ingresos esperados por comercialización de vapor, agua caliente o calefacción distrital, cuando la tecnología lo permita: se presentarán proyecciones de ingresos esperados por comercialización de la energía térmica en base a proyecciones de precios de servicios de calefacción distrital estimados.

- Costos de Operación y Mantenimiento: en base a los parámetros anteriormente presentados y valorización de salarios y servicios en Chile.
- Costo de disposición o tratamiento de residuos finales no comercializables.
- Ingresos por venta de residuos sólidos comercializables.

Además, se consideraran los eventuales ahorros en los costos de transporte de los RSD, comparando los trayectos actuales desde las comunas de origen de los residuos a los centros de disposición final actuales, versus el transporte a los eventuales puntos de emplazamiento de las futuras plantas. Sin evaluación más profunda se puede asumir como rango típico un costo de operación en alrededor de 6% del costo de inversión, números que Pöyry ha observado en los propios proyectos ejecutados y/o evaluados.

### **3.3.6 Costo de Inversión CAPEX**

Este análisis tiene por objetivo constatar los costos de implementación de una planta nueva en la Región Metropolitana de cada tecnología, excluyendo los costos financieros y de desarrollo que dependen del modelo de negocio a implementar y no de la tecnología.

En estos costos se incluirán los costos de inversión en la planta, infraestructura dentro de la planta (líneas de transmisión, caminos, líneas de calor/frío, y otros necesarios para la conexión en una ubicación ideal donde la infraestructura requerida está anexa a la planta), otros equipos adicionales, y la compra de los terrenos (en términos referenciales).

### **3.3.7 Vida Útil**

Este criterio tiene por objetivo presentar la vida útil media esperada de cada tecnología, así como los mantenimientos menores y mayores de componentes principales, teniendo en consideración que, por la juventud de muchas de éstas, no es un valor empírico, ya que en general ninguna de las plantas WTE ha alcanzado el término de su vida útil por razones técnicas.

### 3.4 Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones en cuanto al objetivo 2 del estudio, análisis comparativo de las diferentes tecnologías existentes para generación de energía a partir de RSD.

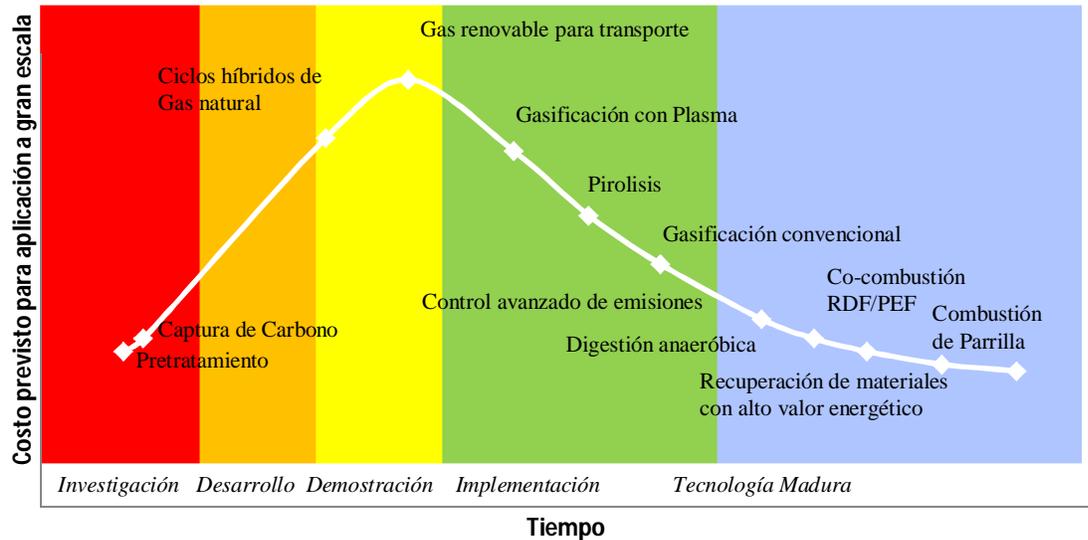
En la evaluación de las plantas WTE es posible simplificar las tecnologías en cinco procesos o componentes principales. Primero el **pre-tratamiento** donde se realiza una clasificación y homogeneización de los residuos si fuese necesario; segundo la **conversión** donde se realiza la transformación de los residuos en calor y/o gas; tercero la **recuperación energética** en la cual se convierte el calor/gas en energía comercializable; cuarto **distribución y uso final**; y quinto el **tratamiento de emisiones**.

Los métodos de pre-tratamiento pueden mejorar o viabilizar los procesos de recuperación energética según cada tecnología. Sin embargo, el costo de inversión, el consumo de energía, de químicos y las condiciones de operación sofisticadas (mantenimiento, control de olores, etc.) son el principal factor que dificulta su aplicación a gran escala. La economía de sistemas de pre-tratamiento y revalorización de algunos materiales también depende de la existencia de un mercado local establecido para reintegrar estos elementos en el mercado (economía circular) con tarifas atractivas. En cuanto a los RSD, sólo se aplican a escala industrial unos pocos métodos de pre-tratamiento mecánico de separación de los residuos comercializables valiosos y de homogenización si la tecnología así lo requiere. Además, para las plantas de digestión anaeróbica es normal que se utilicen etapas de pre-tratamiento biológico y térmico y pos tratamiento térmico del digestato para su comercialización. Con la aplicación de sistemas de pre-tratamiento, es posible modificar la caracterización de los residuos que alimentan una planta WTE, separando algunos residuos como reciclables, o por tipo, para su tratamiento en la planta donde son más adecuados. Sin embargo, todos estos sistemas tienen un impacto en el poder calorífico, y por lo tanto, en el desempeño de la planta, un costo de inversión y operación que deben ser considerados en la evaluación económica de cada proyecto.

En la actualidad existe una variedad de tecnologías de conversión con diferentes aplicaciones y ventajas, cada una de las cuales es adecuada para distintos tipos de residuos. Por ello, para seleccionar la tecnología más apropiada se debe tener en consideración la composición de los residuos de la Región Metropolitana, la cual se ha analizado en detalle en capítulo 2. Se puede concluir que la caracterización de RSD observado cabe dentro de los rangos normales que han sido procesados en las plantas WTE operando en el mundo. El poder calorífico de los residuos disponibles en la RM es aproximadamente de 10,94 MJ/kg.

Las tecnologías más desarrolladas y conocidas son las de combustión por parrilla y lecho fluidizado (ver Figura 3-36). La digestión anaeróbica, aunque tiene menos años en el mercado, ya se puede considerar una tecnología probada. Las otras tecnologías como gasificación convencional, que incluye turbinas a vapor y gas, y pirolisis, se encuentran desarrolladas para su uso con combustibles fósiles y biomasa, sin embargo, su aplicación con RSD todavía se considera en etapa de demostración e implementación a nivel industrial. Algunas de estas tecnologías se han establecido en mercados muy particulares, como la gasificación convencional en Japón con una situación significativamente diferente a la mayoría de los otros países con plantas WTE, debido al alto costo de disposición de residuos y altos precios de la energía. Cuando se empezaron a implementar estas tecnologías en otros países, se presentaron problemas significativos durante la

operación con un rendimiento inferior a lo presupuestado, llevando en algunos casos al cierre permanente de plantas. En el caso más grave, las deficiencias han resultado en fugas de químicos corrosivos, que produjeron el colapso de la estructura.<sup>97</sup>



**Figura 3-36: Madurez Tecnológica<sup>98</sup>**

Cabe destacar que para todas las tecnologías existe una economía de escala significativa en el rango de 30% al 50% entre el tamaño típico inferior de una sola línea, y una planta con tres líneas de proceso. El tamaño preliminar para realizar las evaluaciones económicas debe ser no menor al tamaño mínimo estándar con el que se ha comercializado la tecnología, es decir con una capacidad de 330.000 ton/año, lo cual representa cerca del 10% del total de residuos sólidos domiciliarios de la Región Metropolitana. Por otro lado, el tamaño óptimo está sujeto a una evaluación económica con respecto a su ubicación y la cantidad de municipios que participarán con sus residuos en el proyecto.

De las diferentes tecnologías disponibles, todas pueden generar energía eléctrica. Sin embargo, aquellas que pueden comercializar calor a un eventual sistema de calefacción distrital o uso industrial, pueden aumentar su rendimiento alcanzando un 85% de eficiencia total. Con el uso de este calor residual, se pueden eliminar o reemplazar otras fuentes de calor disminuyendo de esta forma las emisiones totales en la región, contribuyendo así a la descontaminación de la misma.

Con respecto al cumplimiento normativo de emisiones, Chile carece de una normativa específica para plantas WTE. Comparando la norma europea específica para estas plantas con la normativa nacional que aplicaría (Decreto 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente) se observa que la norma europea es más exigente para la mayoría de los parámetros.

<sup>97</sup> Planta de Gasificación Hamm-Uentrop, Alemania

<sup>98</sup> Feasibility Study on Solid Waste to Energy Technological Aspects, Yuzhong Tan, April 2013

Las tecnologías actualmente disponibles poseen sistemas de abatimiento de contaminantes capaces de cumplir con las más exigentes normativas ambientales, por lo que para generar una aceptación pública, es necesario informar y capacitar a la población.

Todas las tecnologías generan subproductos que requieren su disposición final en un relleno sanitario o pueden ser valorizados (cada tecnología en cada etapa del proceso genera residuos con distinto nivel de peligrosidad, los que deben ser evaluados caso a caso). Estos residuos representan entre un 20 - 30 % de los residuos originales en términos de masa y un 6 - 8% en términos de volumen.

Cabe destacar que en todos los países donde se han desarrollado (Singapur, Australia, entre otros) o se encuentran desarrollando (ciudad de México ha adjudicado recientemente un proyecto) como primera tecnología de conversión WTE proyectos de combustión de parrilla, ésta ha podido cumplir con los requerimientos técnicos y la normativa ambiental de cada país. Gracias a su simplicidad, robustez y flexibilidad con el combustible, la tecnología ha sido capaz de mantener una operación confiable y rentable en el tiempo adaptándose a los distintos cambios regulatorios. Por lo tanto, se recomienda enfocar el análisis en las siguientes etapas de este estudio a las tecnologías de combustión.

## 4 ETAPA 2 – OBJETIVO ESPECÍFICO 3

### 4.1 Requerimientos para las emisiones atmosféricas

El proceso de incineración de los RSD deja emisiones sólidas, líquidas y gaseosas, que deben ser tratadas para poder disminuir su impacto al medio ambiente. Dependiendo de la tecnología, una planta WTE de combustión puede emitir entre 4.500 a 6.000 m<sup>3</sup> de gas por tonelada de residuo procesado<sup>99</sup>, lo que para una planta de 330.000 ton anuales equivale a unos 200.000 a 270.000 m<sup>3</sup>/hora de gases, bajo condiciones normales de operación a plena carga. Dentro de estas emisiones, después del funcionamiento de los sistemas de control de emisiones de la planta, los principales compuestos emitidos son:

- Dióxido de Azufre, SO<sub>2</sub>
- Óxidos Nitrosos, NO<sub>x</sub>
- Mercurio, Hg
- Compuestos inorgánicos clorados, HCl

Por otro lado, en particular la Región Metropolitana, por la gran cantidad de fuentes de emisiones y sus condiciones particulares de ventilación, está declarada como zona saturada de acuerdo a las evaluaciones trianuales realizadas en la RM para el Ozono (O<sub>3</sub>), material particulado MP10 y MP2,5, por lo que se han implementado diversas acciones para controlar las emisiones generadas en la región. Dentro de estas acciones se enmarca el “Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago”, vigente desde octubre de 2016, que impone requerimientos ambientales adicionales. En Noviembre de 2017 fue publicada una actualización de este plan, que modifica los requerimientos con énfasis en el material particulado MP2,5.

A continuación se revisará la normativa relacionada a las emisiones atmosféricas que aplican en la Región Metropolitana.

#### 4.1.1 Decreto Supremo 4/1992. Norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales

En 1992, considerando que varias comunas de la Región Metropolitana estaban en condición de zona saturada por material particulado, se estableció la normativa de emisión de material particulado, en adelante MP (Decreto Supremo 4/1992, del Ministerio de Salud) para la Región Metropolitana, considerando sólo el MP superior a 10µm. Esta normativa aplica tanto a fuentes estacionarias puntuales como grupales.

Bajo esta normativa, una planta WTE por su naturaleza es clasificada como:

- Fuente nueva (posterior a 1992)
- Estacionaria (diseñada para operar en un lugar fijo)
- Puntual (emisión mayor a 1.000 m<sup>3</sup>/hora)

---

<sup>99</sup> Joint Research Centre, 2017, *Best Available Techniques, References Document on Waste Incineration*.

Y el límite del MP para estas fuentes es de 112 mg/Nm<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup> debe estar a 25 °C y 1 atm).

Además, se indican los requerimientos de monitoreo de emisiones de material particulado y su metodología de medición, que para el caso de una planta WTE serían monitoreados cada 12 meses mediante el método CH – 5, y se además establecen las exigencias para el humo visible, el cual no podrá exceder la densidad colorimétrica (o índice de ennegrecimiento) superior a 2 de la escala.

Respecto a las compensaciones, se indica que deberán compensar al menos el 100% de sus emisiones, y que estas compensaciones corresponden a un acuerdo entre privados, de modo tal que una de las partes efectúa una disminución de emisiones en la tasa en la que el otro las aumenta.

#### 4.1.2 **Decreto Supremo 29/2013. Norma de incineración, co-procesamiento y co-incineración**

El Decreto Supremo 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente define la norma de incineración, co-procesamiento y co-incineración. En esta normativa se establecen parámetros de emisiones ambientales a nivel nacional. Al no existir una normativa específica en Chile para plantas WTE, este decreto aplica a todas las instalaciones de incineración que utilicen combustibles distintos a los tradicionales de origen fósil.

En esta norma, además, se precisa qué se entiende por “incinerador”, definición que se indica en el Art2. Punto 10, letra h:

“Incinerador o instalación de incineración: 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”

Los valores límites de emisión para la incineración se muestran en la Tabla 4-1, los que al menos deben ser monitoreados una vez al año. Además se debe contar con un sistema de medición continuo de al menos los siguientes parámetros:

- Material particulado, MP
- Monóxido de carbono, CO
- Dióxido de azufre, SO<sub>2</sub>
- Óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>

Como condiciones de operación, en su artículo 7, tabla 5, se indica que en la zona de combustión la temperatura mínima debe estar en el rango de 850 °C y 1.100 °C, si procesa materiales con más de un 1% de cloro por dos segundos, lo que va en línea con un diseño típico de una planta de combustión, pero que genera inconvenientes a los procesos de pirólisis que no necesariamente trabajan en estas temperaturas.

**Tabla 4-1: Tabla de valores límites para incineración de acuerdo al DS 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente**

Criterios		Valor Límite [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Material Particulado	MP	30,0
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	50,0
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	300,0
Carbono Orgánico Total	COT	20,0
Monóxido de Carbono	CO	50,0
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 + Zinc y sus compuestos, indicado como metal, suma total	Pb + Zn	1,0
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, indicado como elemento, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te	1,0
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V	5,0
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	20,0
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	2,0
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	5,0
Dioxinas y furanos	TEQ	0,2

#### 4.1.3 Decreto Supremo 812/1994 del Ministerio de Salud

Esta norma complementa el mecanismo de compensaciones estableciendo los términos y procedimientos que aplican a la solicitud de aprobación al plan de compensaciones, no imponiendo restricciones adicionales a las emisiones.

#### 4.1.4 Norma europea para plantas WTE

En la Unión Europea dentro de la normativa de emisiones industriales, se indica una sección específica para las emisiones máximas para las plantas de WTE (Directiva 2010/75/EU *of the European parliament and of the council of 24 November 2010*, Anexo VI) donde se indican valores límites para cada contaminante.

Es importante considerar que estos valores son los máximos a nivel europeo, pero sobre ellos están las exigencias nacionales e incluso locales que cada planta debe cumplir. Normalmente en el desarrollo de un proyecto WTE, la comunidad donde se implementará la nueva planta impone los límites máximos como parte del desarrollo del proyecto, buscando la mejor tecnología disponible (*best available technique, BAT*).

**Tabla 4-2: Tabla de valores límites para incineración, norma europea**

Criterios		Valor Límite [mg/Nm <sup>3</sup> ]
Material Particulado	MP	10,0
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	50,0
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	200,0
Carbono Orgánico Total	COT	10,0
Monóxido de Carbono	CO	N/A
Cadmio y sus compuestos, indicado como metal	Cd	0,05
Mercurio y sus compuestos, indicado como metal	Hg	0,05
Berilio y sus compuestos, indicado como metal	Be	N/A
Plomo y sus compuestos, indicado como metal, suma total Arsénico + Cobalto + Níquel y sus compuestos, Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Pb + As + Co + Ni + Sb + Cr + Mn + V	0,5
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	10,0
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	1,0
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	N/A
Dioxinas y furanos	TEQ	0,1

En general estos valores representan una exigencia 100% mayor a la normativa nacional de incineración para los países europeos.

#### 4.1.5 Nuevo Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana

El Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana ha sido publicado el 11 de octubre de 2016. Contempla cambios a distintos sectores productivos, como transporte, residencial e industrial.

En el sector industrial, lo que busca este nuevo plan en términos generales es:

- Actualización de normas de MP, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>
- Metas de emisión para grandes establecimientos industriales
- Control de emisiones de amoníaco
- Rediseño del sistema de compensación de emisiones
- Norma de entrada para grupos electrógenos nuevos y exigencia de mantención anual para grupos en uso.

De estos cambios, el más significativo es el cambio de las consideraciones para el MP de 10 µm al 2,5 µm que afecta a las mediciones totales y al sistema de compensaciones.

**Cambio en el sistema de compensaciones:** Debido a lo complejo del sistema antiguo de compensaciones, se ha identificado la oportunidad de simplificarlo. Dentro de las modificaciones se busca establecer metas y reglas claras, reducir la ambigüedad y mejorar el nivel de cumplimiento.

**Estimación de emisiones a compensar:** Utilizando como referencia las emisiones de las plantas de combustión de parrilla operativas en Bielefeld<sup>100</sup>, que se detallan en la Tabla 4-3, se determinan las emisiones para una planta WTE en la RM. Debido a que no se tiene la información segregada sobre las emisiones de MP2,5 y MP10, se considera que el 100% del MP generado corresponde a MP2,5.

En negrita se indican las emisiones sujetas al plan de compensación en el caso conservador que la situación base sea de cero emisión. Además, cabe destacar que las emisiones que emita una planta dependen de la operación, los RSD entrantes, la tecnología y el diseño, entre otros factores de relevancia.

**Tabla 4-3: Emisiones anuales y compensación hipotética para RM. Operación según planta de Bielefeld.**

Ubicación	Bielefeld	Planta propuesta RM		
Capacidad ton RSD / año	388.226	330.000	MP equivalente o Compensaciones <sup>101</sup>	Emisión Máxima
Contaminante	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
NOx	51,3	43,61	<b>52,33</b>	<b>8</b>
SO2	4,43	3,77	4,52	10
MP2,5	0,82	0,70	0,84	2
NH3	-	-	-	-
MP2,5 equivalente		<b>7,11</b>		<b>2</b>
MP2,5 equivalente a compensar			<b>8,53</b>	

De los valores obtenidos se puede observar que las emisiones se exceden en NOx y MP 2,5 equivalente, sin embargo, bajo este escenario la normativa indica que se debe compensar solo el excedente de MP 2,5 equivalente en un 120%.

**Compensación de emisiones MP2,5:** Considerando que la planta proyectada de WTE requeriría reducir emisiones equivalentes a 8,53 ton anuales de MP2,5, y utilizando como referencia las emisiones de una estufa a leña de combustión lenta, se estima que para lograr dicha meta es necesario el recambio de 670 estufas, logrando una reducción total de 8,63 ton/año, ver Anexo H. Para la estimación de costos se considera el reemplazo de los calefactores a leña de combustión lenta por aire acondicionado tipo “inverter” de

<sup>100</sup> mvbielefeld, Emissionsbericht, 2015, Alemania.

<sup>101</sup> Se considera una compensación de 120% de las emisiones según indica PDA para proyectos que ingresen a SEIA.

24.000 BTU, considerando que el costo promedio del recambio es de 1.210 USD <sup>102</sup> la inversión requerida será de 810.700 USD lo que representa un 0,4% del costo de inversión del proyecto.

Para plantas WTE que generan vapor industrial, también es factible la compensación a través de la reducción de emisiones en otras industrias. Sin embargo, esto debe ser analizado caso a caso dependiendo de la ubicación de la planta, ya que las ubicaciones donde es económicamente viable la comercialización de vapor son limitadas, y se debe resolver el tema contractual de generar el compromiso vinculante de reducción de emisiones en las dependencias de una empresa externa a la planta WTE, incluyendo el decomisionamiento y/o chatarrización de las calderas reemplazadas.

Para plantas WTE que generan calor posible de transferir mediante sistemas de calefacción distrital, es factible la compensación a través de la reducción de emisiones en la calefacción domiciliaria. Utilizando como referencia las emisiones de una estufa a kerosene se estima necesaria la conexión al sistema de calefacción distrital de 85.300 hogares para lograr la reducción de emisiones de MP2,5 de 8,53 ton anuales requeridas para el proyecto analizado, lo que es superior a la capacidad de generación de calor de la planta tipo de 330.000 ton, que solo alcanzaría a abastecer a unos 78.000 hogares, logrando una reducción de solo 7.8 ton anuales, esa diferencia se puede compensar a través de otras formas como el reemplazo de calefactores a leña antes mencionado.

Un sistema de calefacción distrital en general es un proyecto independiente, aunque con una estrecha relación simbiótica con una planta WTE. Los costos de inversión dependen de múltiples factores ajenos a la planta WTE, y no pueden ser estimados con el suficiente nivel de confianza para la RM. Por esto, ésta alternativa de reducción de emisiones debe ser analizada para cada proyecto de forma particular.

El análisis completo de las estrategias de compensación de emisiones se encuentra disponible en el Anexo H de este documento.

**Otras emisiones a compensar:** adicional a las emisiones durante la etapa de operación, durante la etapa de construcción y abandono de la planta se generan una serie de emisiones, principalmente MP10 que deben ser evaluadas de acuerdo a la metodología, maquinaria y recursos en general a utilizar en cada caso. Esto debe ser parte integrante del estudio de impacto ambiental y debe ser mitigado de acuerdo a la naturaleza de la emisión.

**Otras reducciones no consideradas en el PPDA:** adicional a lo anterior, una planta WTE procesa los RSD que actualmente son transportados a los sitios de disposición autorizados en la RM, con lo cual se evita la emisión de diversos gases atmosféricos, ya sean gases considerados dentro del PPDA de Santiago como gases de efecto invernadero no considerado dentro del plan, como el metano. Estas reducciones de emisiones pueden ser derivadas tanto del sistema de transporte de los residuos como del proceso de descomposición de los mismos.

---

<sup>102</sup> Precio referencia Aire acondicionado tipo “Inverter”, marca ANWO suministrado por Enel distribución y un valor de instalación de 4 UF.

La estimación de estas reducciones depende intrínsecamente de la ubicación de la planta y de las comunas de origen de los RSD que serán tratados en ésta, por lo que deben ser evaluados caso a caso.

#### 4.1.6 Tratamiento de Gases de Combustión

Los fabricantes de tecnología WTE han desarrollado sus propios sistemas de tratamiento de gases de combustión de acuerdo a las características de los combustibles, tamaños de las plantas y exigencias que aplican a cada proyecto. De este proceso de continuo desarrollo se han patentado distintos sistemas, pero en general es posible clasificar las tecnologías en dos grupos principales para el tratamiento de gases.

- Proceso seco (o semi seco)
- Proceso húmedo

Independiente a los sistemas antes indicados, para el abatimiento de los óxidos nitrosos,  $\text{NO}_x$ , se utiliza la reducción no catalítica selectiva o la reducción catalítica selectiva.

##### 4.1.6.1 Proceso secos o semi-secos

Los sistemas de tratamiento de proceso seco tratan los gases a la salida del sistema de recuperación de energía. Está compuesto de dos etapas principales, la primera dedicada al control de polvo y la segunda a otras sustancias, como halógenos, sulfuros, metales y dioxinas, entre otros. Dependiendo de la temperatura de salida de los gases desde el proceso de recuperación energética, se puede requerir un sistema de control de temperatura. El orden o arreglo de los distintos sistemas dentro del proceso puede variar entre distintos fabricantes.

**Control de temperatura:** para la óptima operación de los sistemas de tratamiento, se requiere que los gases no excedan determinadas temperaturas, para ello el sistema debe contar con un sistema de enfriamiento el cual puede ser indirecto, como un intercambiador de calor, o directo, como sistemas de incorporación de aire o aspersion de agua en cuyo caso el proceso es semi-seco. Estos sistemas pueden ser un equipo independiente o estar incorporados a la etapa final de la recuperación energética.

**Control de polvo:** los sistemas de control de polvo o material particulado, MP, normalmente están dispuestos a continuación del control de temperatura. Su función principal es el retiro del material particulado. Dentro de estos sistemas se puede considerar:

- **Ciclón:** esta tecnología no es afectada por la temperatura, puede ser dispuesta de forma independiente (un ciclón) o en etapas (multi-ciclón), su tasa de abatimiento va de 50 a 90%. El gas entra tangencialmente y se hace girar. Las fuerzas centrífugas causan que el material particulado (cenizas volantes) se acerque a la pared del ciclón y caiga por gravedad hasta el fondo del mismo donde es retirado.<sup>103</sup>

---

<sup>103</sup> World Bank, Technical Guidance Report, 1999, *Municipal Solid Waste Incineration*,

- **Precipitador electroestático:** su operación se recomienda bajo los 350 °C, normalmente su instalación es en paquetes de filtros en serie, y su tasa de abatimiento va desde 98 a 99.5%. El gas es llevado a una caja en que una serie de placas colectoras suspendidas aterrizadas. Electrodo de descarga - cargados negativamente por DC rectificado de alto voltaje - están situados entre cada fila de placas. Esto genera un campo eléctrico, cargando las partículas y haciendo que migren a las placas, formando una capa de polvo. Las placas se agitan de vez en cuando, y el polvo cae en la tolva.<sup>103</sup>
- **Filtro de bolsa:** su operación se recomienda bajo los 200 °C (filtros de teflón), normalmente su instalación es en paquetes de filtros en serie y paralelo. El gas pasa a una caja, luego es aspirado o presionado a través de bolsas cilíndricas. Se forma una capa de polvo en la superficie de las bolsas. Esta capa luego es eliminada por varios mecanismos de agitación.<sup>103</sup>
- **Scrubber Venturi:** El gas acelera a través de una contracción (un Venturi), atomizando el agua inyectada. Las gotas de agua recogen las partículas de polvo, y las gotitas son subsecuentemente precipitadas en una cámara ciclónica de sedimentación.<sup>103</sup>

**Control de Halógenos, Sulfuros, Metales Volátiles y Dioxinas:** estos sistemas pueden lograr el retiro de distintos agentes en un solo proceso incorporando uno o más agentes al flujo de gas de emisiones. Los agentes más usados son el carbón activado en polvo y cal hidratada.

- Carbón activado en polvo: adsorbe los metales volátiles, dioxinas y furanos.
- Cal Hidratada: neutraliza los halógenos y sulfuros.

Los procesos secos tienen tres ventajas principales: son más sencillos de controlar, requieren menos agua, y no tienen gases visibles en la chimenea (con excepción de condiciones de baja humedad y temperatura bajo 0°C). La tendencia hoy día en proyectos nuevos es principalmente la aplicación de sistemas secos o semi-secos.

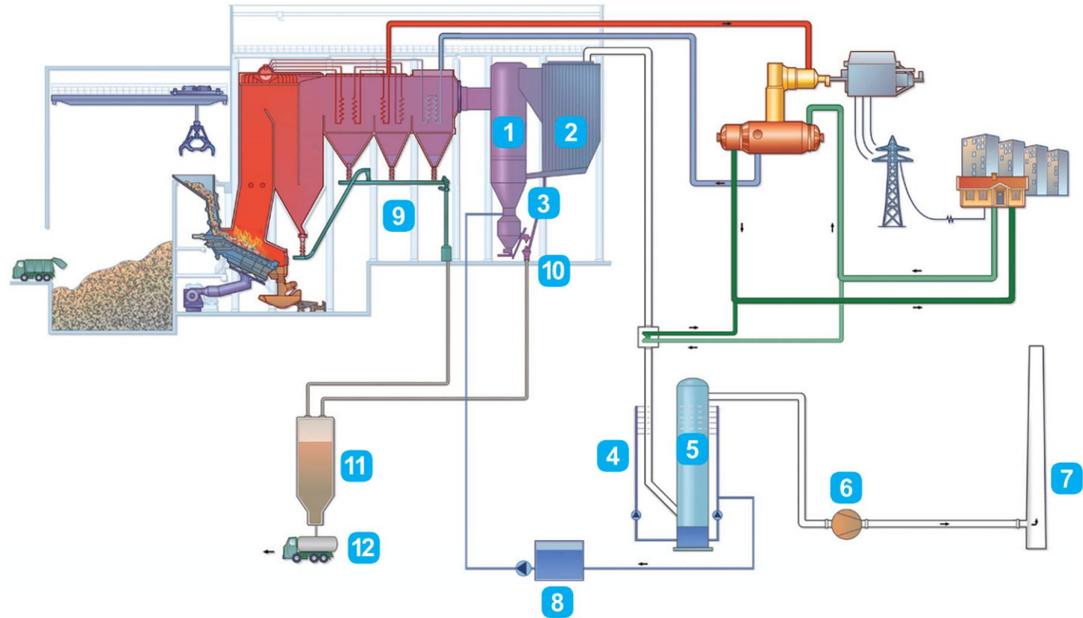


Figura 4-1: Esquema de tratamiento Seco / Semi-seco <sup>104</sup>

Dónde:

1. Reactor para absorción de gases ácidos
2. Filtro de bolsa
3. Recirculación de residuos
4. Enfriador
5. *Scrubber* (opcional)
6. Soplador
7. Chimenea
8. Tanque de agua procesada y manejo de residuos/ceniza
9. Sistema de transporte de cenizas de caldera
10. Sistema de transporte de residuos de limpieza de gases de combustión
11. Tanque de residuos de ceniza
12. Descarga de residuos de ceniza

#### 4.1.6.2 Procesos Húmedos

Los sistemas de tratamiento de proceso húmedo se basan en la incorporación de los gases a un ambiente saturado de agua en exceso. En esta condición los gases se verían expuestos a una serie de tratamientos físico químicos diseñados para lograr la transferencia de los distintos contaminantes desde el gas al agua.

**Control de Polvo:** el polvo o material particulado presente en los gases, es capturado por el agua incorporada en la cámara de enfriamiento y arrastrado al fondo de la cámara donde es bombeado a la planta de tratamiento de agua para su separación.

<sup>104</sup> Ramboll WTE, 2012, *Using waste as a resource*

Adicionalmente se puede incorporar un sistema de control de polvo seco tipo ciclón o precipitador electroestático antes de la entrada a la cámara de enfriamiento.

**Control de Halógenos:** estos son retirados fácilmente utilizando *scrubber* convencional o *scrubber venturi*, sin embargo se debe tener en consideración que el agua utilizada en esta parte del proceso, una vez retirados los halógenos, queda con propiedades muy ácidas lo que debe ser considerado en el diseño de los equipos (por corrosión en los elementos y equipos) y de los procesos de tratamiento de aguas de proceso.

**Control de Sulfuros:** estos son retirados en un *scrubber* específico donde se incorpora hidróxido de sodio diluido. También es factible la incorporación de cal diluida, sin embargo esto aumenta el tamaño del equipo.

**Control de Metales Volátiles:** la fracción soluble es retirada en el *scrubber venturi*, sin embargo para la fracción no soluble se debe considerar un sistema adicional:

- Precipitador electroestático húmedo: incorporándolo en serie al proceso
- Carbón activado: incorporándolo en el *scrubber* de control de sulfuros
- Peróxido de hidrógeno: incorporándolo en el *scrubber* de control de halógenos

**Control de Dioxinas y Furanos:** las dioxinas se trata con la incorporación de carbón activado en polvo previo a la saturación con agua, en cuyo caso el carbón luego de adsorber y absorber dioxinas y furanos, es retirado junto con el material particulado. Otro método consiste en la incorporación de paquetes o filtros de carbón activado en serie con el sistema, normalmente después del control de halógenos.

**Control de gases visibles:** una desventaja de esta tecnología es la necesidad de tratar los gases para eliminar los gases visibles (si se desean eliminar). Para ello se requiere implementar un sistema para recalentar los gases después del proceso de tratamiento de gases, con su demanda de energía correspondiente.

**Tabla 4-4: Sistemas principales de tratamiento de gases de combustión**

Descripción	Aplicación	Emisiones	Ventajas	Desventajas
Ciclón	Colector de polvo	500 mg/Nm <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple y robusto</li> <li>• Bajo CAPEX/OPEX</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja eficiencia con partículas finas</li> <li>• Alto desgaste</li> </ul>
Scrubber Venturi	Colector de polvo	~100 mg/Nm <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo CAPEX</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto OPEX</li> <li>• Corrosión</li> <li>• Genera aguas residuales saladas</li> </ul>
Filtro de bolsa	Colector de polvo	10 mg/Nm <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia</li> <li>• Capa de polvo también puede eliminar gases ácidos</li> <li>• CAPEX/OPEX intermedio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vulnerable a humedad y chispas</li> </ul>
Precipitador eléctrico	Colector de polvo	20-150 mg/Nm <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robusto</li> <li>• Bajo OPEX</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto CAPEX</li> <li>• No elimina gases ácidos</li> </ul>

En adición a estos sistemas, se pueden agregar procesos químicos con inyección de soluciones que reducen la cantidad y la concentración de contaminantes en los gases de combustión. Entre ellos son:

**Reducción no catalítica selectiva**, o en inglés *Selective Non Catalytic Reduction* (SNCR): en un proceso SNCR de óxidos de nitrógeno, reductores en una solución acuosa (agua amoniacal, urea) o en forma gaseosa (amoníaco) se inyectan en los gases de combustión. Se forman nitrógeno molecular, agua y dióxido de carbono. El rango óptimo de temperatura, donde se logra una notable reducción de  $\text{NO}_x$ , está entre 900 y 1.100 °C dependiendo de la composición de los gases de combustión.

**Reducción catalítica selectiva**, o en inglés *Selective Catalytic Reduction* (SCR): el proceso SCR reduce químicamente  $\text{NO}_x$  en nitrógeno molecular y vapor de agua. Se inyectan amoníaco o la urea en el conducto, aguas abajo de la unidad de combustión. El gas residual se mezcla con el reactivo y entra en un módulo reactor que contiene un catalizador. El gas de combustión caliente y el reactivo difunden a través del catalizador. El reactivo reacciona selectivamente con el  $\text{NO}_x$  dentro de un rango específico de temperatura y en presencia del catalizador y del oxígeno.

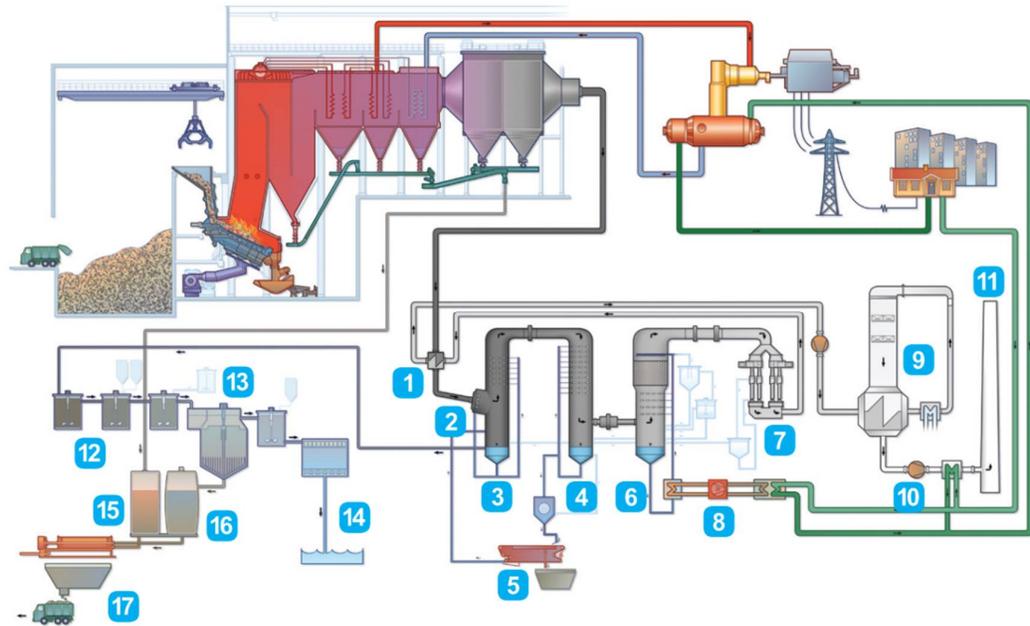


Figura 4-2: Esquema sistema húmedo<sup>104</sup>

Dónde:

1. Intercambiador de gas
2. Enfriador
3. *Scrubber* de HCl
4. *Scrubber* de SO<sub>2</sub>
5. Deshidratador de yeso
6. Condensador de gases de combustión
7. *Scrubber de venturi*
8. Bomba de absorción de calor
9. Precipitador electrostático
10. Soplador
11. Chimenea de tratamiento de aguas residuales
12. Neutralización y precipitación de aguas residuales
13. Espesador de lodo
14. Descarga de agua residual de ceniza
15. Tanque de descarga de ceniza
16. Tanque de lodo
17. Descarga de ceniza

## **4.2 Requerimientos para ruido y olores**

### **4.2.1 Ruido**

#### **4.2.1.1 Descripción general**

Los procesos de pre-tratamiento y conversión dentro de una planta de WTE generan ruido y vibraciones comparables a cualquier otra instalación industrial o central térmica de generación eléctrica. Una de las principales fuentes de ruido son las operaciones de descarga y tratamiento de los residuos, por lo que esta área siempre se debe encontrar contenida en una instalación cerrada. Otras instalaciones como los sistemas de tratamiento de gases (tuberías, SCR, intercambiadores de calor, etc.), sistemas de refrigeración, subestaciones y otras instalaciones auxiliares, pueden estar expuestas a la normativa local.

Los procesos que tienen mayor impacto en la generación de ruidos y vibraciones son:

- Tránsito de vehículos de transporte de residuos e insumos
- Pre-tratamiento mecánico (trituración, clasificación)
- Sistema de refrigeración (especialmente sistemas de refrigeración por aire)
- Conjunto turbina generador
- Transporte y tratamiento de cenizas de fondo y volante
- Bombas de inyección de combustible (sistema de arranque del proceso)
- Compresores y/o sopladores del sistema de inyección de aire
- Ventiladores
- Transformadores de potencia

A continuación se presentan las intensidades, en el punto de emisión, de algunos equipos comunes en plantas WTE. Cabe destacar que se pueden tomar medidas de mitigación que permiten bajar considerablemente estos niveles, de manera de cumplir con la normativa chilena e internacional. Además, los valores indicados en la norma se refieren al punto de medición, es decir se mide la inmisión lo que depende principalmente de la distancia desde la fuente de ruido.

**Tabla 4-5: Ejemplos de fuentes de emisión de ruido y su correspondiente intensidad<sup>105</sup>**

Fuente de ruido	Intensidad [db (A)]	Tipo de emisión
Válvula de alivio atmosférico de caldera	110	Intermitente
Turbina	95	Continuo
Generador eléctrico	95	Continuo
Excitatriz	93	Continuo
Bomba de agua	85	Continuo
Ventilador	95	Continuo
Torre de enfriamiento	85	Continuo

#### 4.2.1.2 Mitigación

Normalmente el diseño de una planta moderna considera una instalación completamente cerrada, cuya función es contener y amortiguar los ruidos y vibraciones de los distintos procesos. Adicionalmente, este diseño ayuda a la contención de fuga de gases (evitando emisiones de olor) desde los residuos del bunker de almacenamiento temporal de residuos. También, para minimizar ruidos se pueden dejar distancias adecuadas, de manera que éstos se atenúen, por absorción de aire o por medios de obstrucción, al llegar al medio receptor.

Actualmente esto no indica un problema real en las plantas dispuestas en Europa, puesto que es un asunto que se puede manejar fácilmente con un diseño adecuado de la planta, donde en muchos casos no implica construcciones costosas. Además, se pueden tomar medidas adicionales para mitigar el ruido durante la noche (21 a 7 hrs.) tales como:

- No utilizar equipamiento externo como montacargas.
- No realizar entregas de RSD con camiones.
- No realizar limpiezas en el tratamiento de gases.

En muchas ciudades de Europa las plantas son instaladas en recintos industriales o comerciales, sin que se generen mayores problemas. En el proyecto Winterthur, a cargo de Pöyry Suiza, se realizó un estudio de emisión e inmisión de ruidos, el cual arrojó los resultados de máxima intensidad medida en el día, que se indican en la Figura 4-3: Estudio de emisión e inmisión de ruidos en proyecto de Winterthur, Suiza. Fuente: Estudio realizado por Pöyry Suiza.

en donde las estaciones PI indican decibeles medidos en Puntos de Inmisión, mientras que las estaciones PE indican las respectivas mediciones de ruido en los Puntos de Emisión. Cabe destacar que las fuentes de mayor emisión de ruido son principalmente calderas, filtros y motores, que su valor de intensidad sin mitigación está entre los 95 a 98 dB.

<sup>105</sup> Tianjin Environmental Impact Assessment Center and Dynagreen, 2014, *Dynagreen Waste to Energy Project IEE for the Jixian Waste to Energy Plant, China*

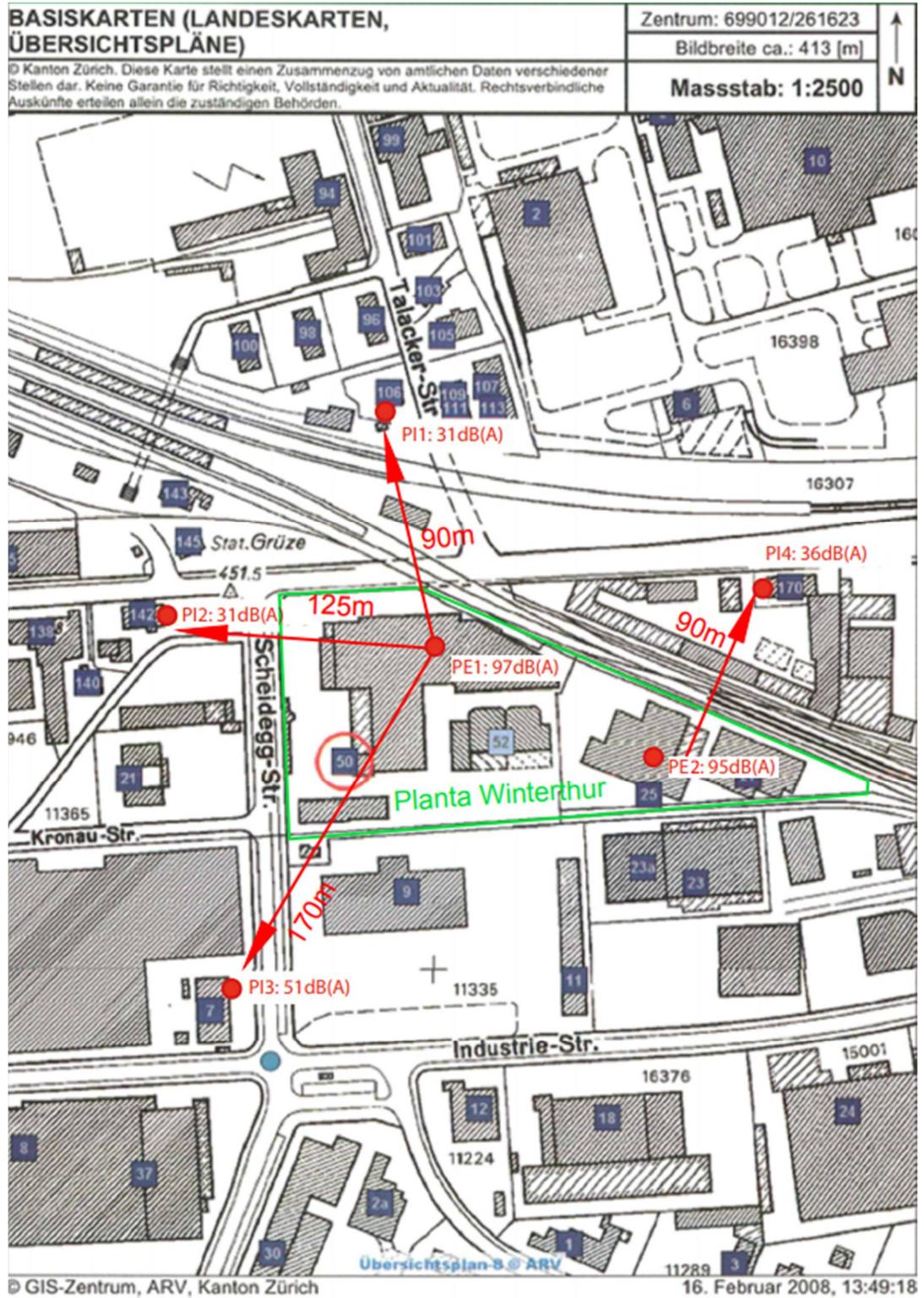


Figura 4-3: Estudio de emisión e inmisión de ruidos en proyecto de Winterthur, Suiza. Fuente: Estudio realizado por Pöyry Suiza.

### 4.2.1.3 Normativa

La normativa para ruidos emitidos en Chile está determinada por el Decreto Supremo N°38/2014 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece los límites de ruidos generados por fuentes fijas o móviles. Cabe destacar que la norma indica diferencias de ruido permisible dependiendo de la hora de emisión y zona en la que se encuentre la fuente. Los niveles de máximo ruido permitido se enlistan en la Tabla 4-6 y deben ser medidos mediante procedimientos que indican normas de la IEC (del inglés *International Electrotechnical Commission*). Las mediciones de ruido deben ser medidas en la propiedad donde se encuentre el receptor, en el lugar, momento y condición de mayor exposición de ruido. La normativa clasifica los niveles máximos por zonas, las cuales son detalladas a continuación:

**Tabla 4-6: Niveles máximos permitidos de Presión Sonora Corregida (NPC) en db (A).**

Zona	Uso de suelo permitido	de 7 a 21 hrs.	de 21 a 7 hrs.
Zona I	Residencial, espacio público y/o área verde.	55	45
Zona II	Zona I, en adición de equipamiento en cualquier escala.	60	45
Zona III	Zona II, además de actividades productivas y/o de infraestructura.	65	50
Zona IV	Actividades productivas y/o de infraestructura.	70	70

Nota 1: todas las zonas están ubicadas en límites urbanos. En el caso de zonas rurales, se utiliza el mínimo valor entre el ruido de fondo (sin fuente emisora) más 10 dB y NPC para zona III de tabla.

Nota 2: para mayores detalles sobre el procedimiento de medición y nomenclatura, ver referencia <sup>106</sup>.

Según lo anterior, el ejemplo utilizado de la planta ubicada en Winterthur, Suiza solo superaría la normativa chilena, en caso de estar ubicada en Zona I, II y III en emisión de ruido nocturno. Fácilmente se podría cumplir la normativa tomando medidas de mitigación indicadas en la sección 4.2.1.2.

## 4.2.2 Olor

### 4.2.2.1 Descripción general

Es una característica o cualidad de una sustancia que hace que sea perceptible por el olfato. Algunos expertos lo definen como “La percepción cuando uno o más químicos entran en contacto con los nervios receptores para el estímulo del olfato”. La detección de esta característica depende de la sensibilidad olfativa de cada individuo.

Debido a la complejidad y variabilidad de este hecho, se han diseñado métodos y normas que permiten medirlos. Entre los métodos, generalmente se dispone de personal entrenado en laboratorios, que clasifican los olores por intensidad, frecuencia, duración, tono y localización. Además, en algunos métodos utilizan encuestas sobre percepción de la gente y posibles quejas vecinales.

<sup>106</sup> Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2014, *Decreto 38: Norma de emisión de ruidos*.

#### 4.2.2.2 Mitigación

En una planta WTE normalmente se dispone de una instalación cerrada para la descarga y pre-tratamiento de los residuos.

Se pueden tomar una serie de medidas para mitigar o controlar los problemas relacionados con el olor, tales como:

1. Localización de planta en un lugar suficientemente lejano de la comunidad.
2. Almacenamiento de residuos que se pueden pudrir rápidamente en contenedores o bolsas para minimizar su descomposición.
3. Alteración química de los residuos con mayor producción de hedor.
4. En plantas de incineración se puede disponer de una instalación cerrada, en donde se maneje la toma de gases y se utilicen en el proceso de combustión, para luego ser quemado y adicionalmente ser tratado antes de su emisión al ambiente.

#### 4.2.2.3 Normativa

Actualmente hay dos normas importantes que siguen en perfeccionamiento: la norma europea<sup>107</sup>, que opera por olfatometría dinámica, y la alemana<sup>108</sup>, que opera por inspecciones en campo con panel de 12 personas durante un año (más costoso).

La norma europea define una metodología y procedimientos específicos, donde se definen valores umbrales de inmisión de olor generado por diversas actividades. Estos valores se miden en una medida propia, la  $OU_E$ , que se define como la cantidad de sustancia fétida, que cuando es vaporizada en un metro cúbico de gas neutral, en condiciones normales, induce una reacción psicológica en los órganos del olfato, en al menos la mitad de los miembros del panel evaluador. En la Tabla 4-6 se muestran los valores límite de olores.

La normativa nacional existente en materia de olores posee escasas disposiciones. No existe una norma específica para olores o compuestos relacionados con éstos, a excepción de la Norma de Emisión de Compuestos TRS (de las siglas en inglés, *Total Reduced Sulphur*), que para este caso no aplica.

Generalmente, el proceso de emisión de olores en una planta WTE está determinado principalmente por los siguientes motivos:

- La descarga de residuos por parte de los camiones.
- El tipo y volumen del material descargado.
- Localización del recinto, especialmente si la instalación está cercana al público general.
- El pre-tratamiento realizado.
- Gases emitidos por relleno sanitario de la instalación (si es que cuenta con ella). Se tiene especial cuidado con el sulfuro de hidrógeno por su significativo aporte al olor. Secundariamente, aportan al hedor el dióxido de sulfuro, amoníaco y metano.

<sup>107</sup> UNE-EN 13725, Calidad del aire. Determinación de la concentración de olor por olfatometría dinámica, 2004.

<sup>108</sup> VDI 3940, *Measurement of odour by field inspection*, 2006.

- Disposición de aguas residuales.

**Tabla 4-7: Valores máximos de intensidad de olor, para norma Europea UNE-EN 13725.**

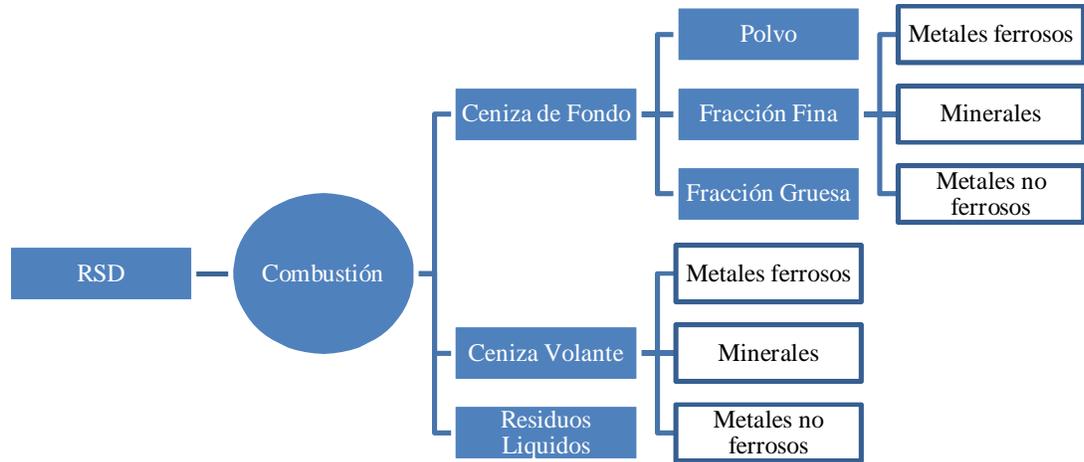
Actividad	Valor objetivo de la inmisión (percentil 98 de las medias horarias durante un año)
Actividades de gestión de residuos	3 OU <sub>E</sub> /m <sup>3</sup>
Aprovechamiento de subproductos de origen animal	
Destilación de productos de origen vegetal y animal	
Mataderos	
Fabricación de pasta de papel	
Actividades ganaderas	5 OU <sub>E</sub> /m <sup>3</sup>
Aprovechamiento de subproductos de origen vegetal	
Tratamiento de productos orgánicos	
Sistemas de saneamiento de aguas residuales	
Instalaciones alimentarias	7 OU <sub>E</sub> /m <sup>3</sup>
Producción de aromas y fragancias	
Secado de productos vegetales	

### 4.3 Requerimientos para residuos

El proceso de incineración de los RSD genera, aparte de emisiones atmosféricas, residuos sólidos y líquidos que deben ser tratados para disminuir su impacto al medio ambiente y valorizados o dispuestos en instalaciones autorizadas conforme a su peligrosidad. Los principales tipos de residuos finales en una planta WTE son:

- Ceniza de fondo
- Ceniza volante
- Residuos líquidos

Los porcentajes de cada tipo de residuo dependen principalmente de la entrada del tipo de RSD, la tecnología de incineración y el pre-tratamiento realizado. En la Figura 4-4 se muestra un flujograma por tipos de residuos del proceso de incineración, subdividiendo la ceniza de fondo en tres subcategorías por el rango de tamaño de partículas, siendo las partículas más finas el polvo.

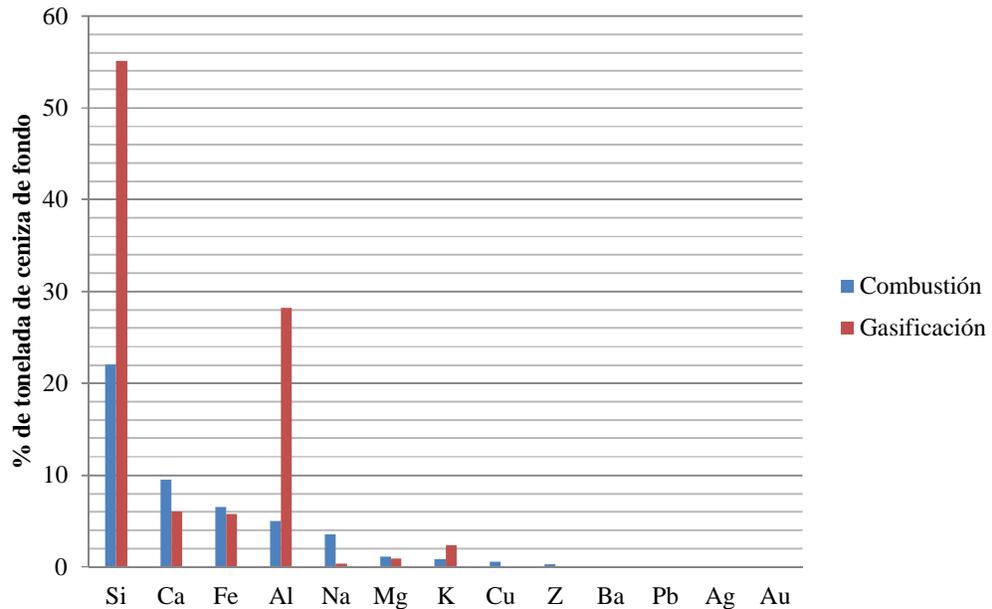


**Figura 4-4: Tipos de residuos del proceso de incineración (Elaboración propia)**

### **4.3.1 Ceniza de fondo**

#### **4.3.1.1 Descripción general**

La ceniza de fondo es el principal residuo generado por la incineración de RSD. Normalmente representa el 24.6% del peso total entrante de residuos, para el caso de combustión por parrilla, y el 15% para gasificación. Este residuo está compuesto por material particulado que se deposita gravitacionalmente al fondo de la cámara de combustión. La composición aproximada de la ceniza de fondo se muestra en la Figura 4-5.



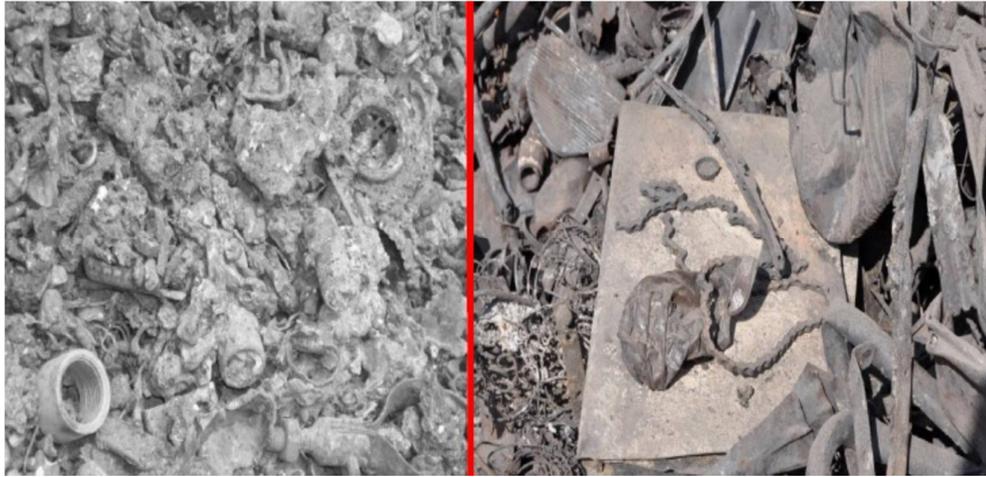
**Figura 4-5: Composición promedio de compuestos en ceniza de fondo, para el caso de tecnologías de incineración por parrilla y gasificación<sup>109,110</sup>**

Cabe destacar que la composición promedio de los compuestos en ceniza de fondo depende de los materiales de entrada al incinerador. Hay dos sistemas de descarga de residuos, estos son los que se detallan a continuación.

- a) Descarga húmeda: En este caso las cenizas caen a un baño de agua, el cual asegura el enfriamiento de la ceniza, minimiza el polvo presente y lo hace más fácil de manejar. La ceniza es removida por presión mediante un pistón. Luego de esto, se deben utilizar sistemas de clasificación para la recuperación de materiales que son explicados más adelante.
- b) Descarga seca: La escoria es descargada sin el uso de agua. En consecuencia, los metales son enfriados o enviados mediante una correa transportadora a un ambiente alcalino. En este caso los minerales no se apilan junto con los metales, facilitando su posterior separación. Este es el mejor método para una extracción de metales más eficiente.

<sup>109</sup> ISWA, 2016, *Bottom ash from WTE plants: Metal recovery and utilization*.

<sup>110</sup> M. Aineto, A. Acosta, 2006, *Thermal expansion of slag and fly ash from coal gasification in IGCC plant*.



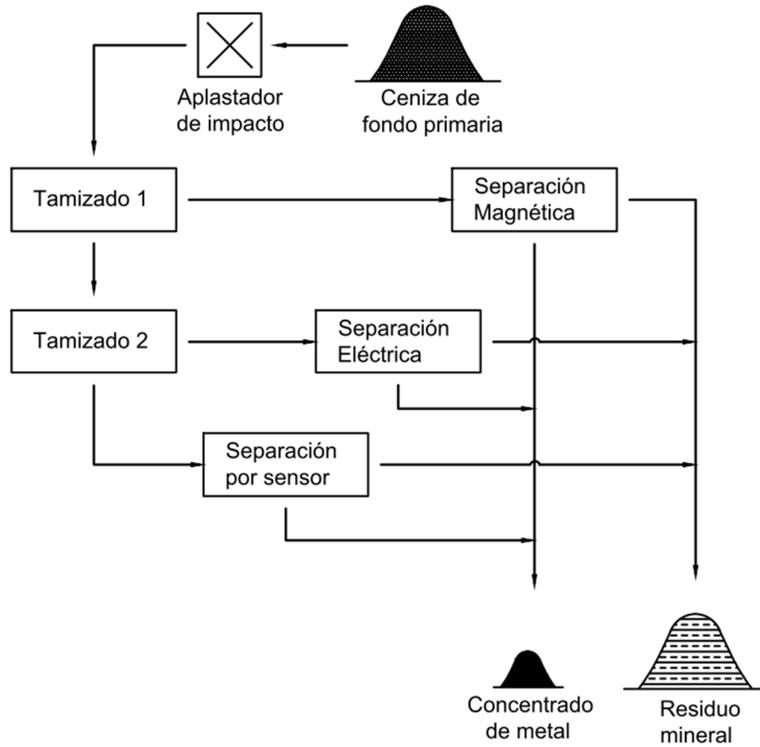
**Figura 4-6: Comparación de descarga húmeda (izquierda) versus seca (derecha). Fuente: Martin GmbH, 2015, *Energy and resource recovery from WTE plants***

#### **4.3.1.2 Tecnologías para recuperación de componentes**

En la Figura 4-7 se aprecia que la ceniza de fondo debe pasar inicialmente por un proceso aplastador de impacto y de tamizado, de manera de reducir el tamaño de la ceniza, para luego pasar por el proceso de clasificación de materiales, que se basa principalmente en la separación de componentes dependiendo de:

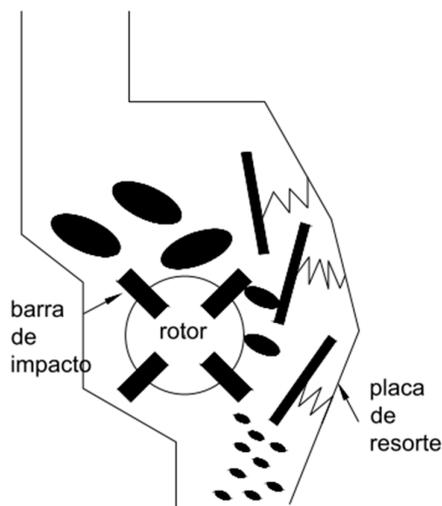
- Densidad
- Forma física
- Susceptibilidad magnética
- Susceptibilidad eléctrica

Estas técnicas de clasificación son detalladas a continuación:



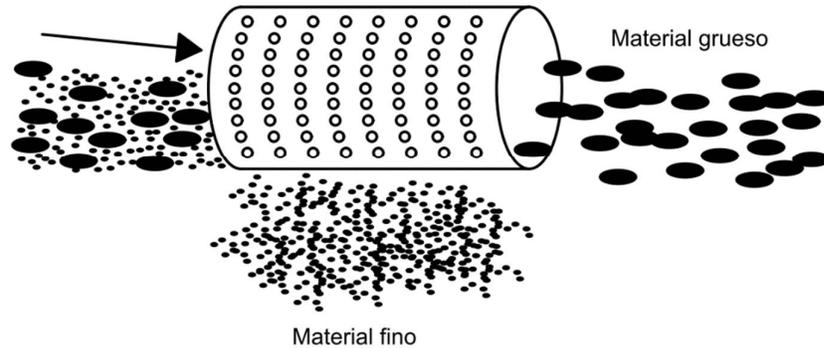
**Figura 4-7: Diagrama de flujo simplificado de los procesos utilizados para separación de ceniza de fondo (Elaboración propia)**

1. Aplastador de impacto: El rotor impacta los residuos a aproximadamente 1.000 rpm, por lo cual estos son reducidos en tamaño. Es el primer paso de reducción de ceniza de fondo. El modo de funcionamiento se muestra en la Figura 4-8.



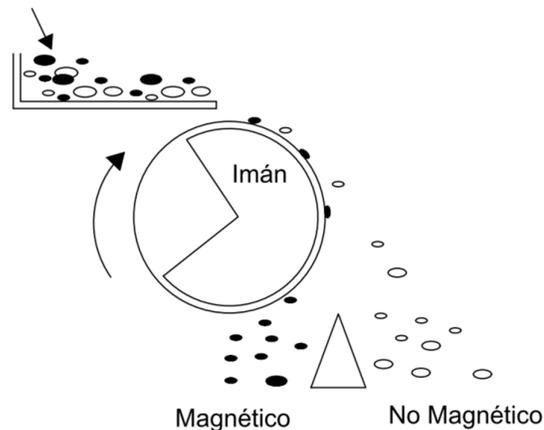
**Figura 4-8: Funcionamiento de aplastador de impacto (Elaboración propia)**

2. Tamizado: Para remover metales es muy importante fraccionarlos a través de la técnica de tamizado. El tipo de tamizado generalmente es realizado con un tambor rotatorio con perforaciones o con una pantalla vibratoria.



**Figura 4-9: Proceso de tamizado (Elaboración propia)**

3. Separación magnética: Este método separa los materiales con contenido de hierro, respecto de no férricos y minerales. Hay varios tipos, sin embargo los más comunes son de tipo tambor y por disposición de imán por encima del paso de los materiales.



**Figura 4-10: Separación magnética (Elaboración propia)**

4. Separación eléctrica: Es una técnica para separar metales no magnéticos que son buenos conductores de electricidad. Se disponen de imanes en un rotor por el cual pasa la correa con la ceniza de fondo. Éstos a su vez, generan un campo magnético rotatorio que induce corrientes en los materiales conductores de electricidad. Luego, esta corriente produce fuerzas repulsivas que causan que los materiales sean repelidos por el rotor tal como muestra la Figura 4-11.

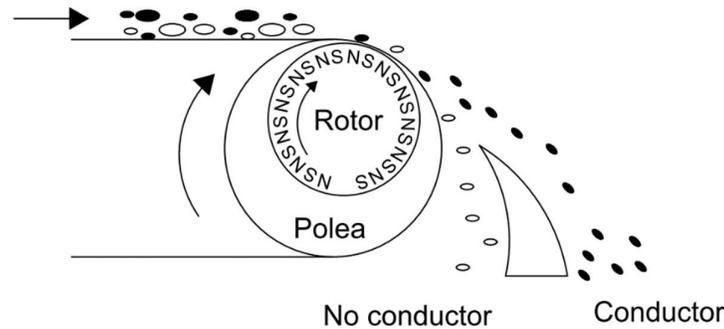


Figura 4-11: Esquema de separación eléctrica (Elaboración propia)

5. Tecnología de sensor:

- Clasificación por inducción: esto se utiliza principalmente para separar el acero inoxidable, ya que no es magnético y tiene baja conductividad eléctrica. Esto funciona por medio de inducción magnética. Al localizar el metal, éste se remueve por medio de un pulso de aire comprimido. Se utiliza luego de la separación magnética y eléctrica.
- Clasificación por rayos X: El principio de funcionamiento es similar al de inducción, pero en vez de reconocer metales, se reconoce la forma del material, como por ejemplo monedas.

6. Molienda: Permite mejorar el desempeño de la separación de metales, además permite obtener minerales para ser utilizados como adición en construcciones.

4.3.1.3 Usos

Luego de los tratamientos de la ceniza de fondo, se podría utilizar como material de construcción siempre y cuando se cuente con la autorización del organismo competente en la materia, sustituyendo el material árido fino que debe utilizar en la preparación del hormigón, debido a que se ha demostrado que las cenizas tienen mayor capacidad de resistir cargas pesadas que la gravilla. Para esto se debe tener especial cuidado, para que los residuos no entren en contacto con la superficie, tratando de minimizar la lixiviación.

Tabla 4-8: Cantidad de metales presentes en ceniza de fondo, y precio de mercado<sup>111</sup>

Metal	Cantidad [kg/ton]	Precio estimado [USD/kg]
Fe	31,4	0,14
Al	16,1	0,93
Cu	2,2	4,64
Zn	0,9	0,85
Pb	0,3	1,24
Ag	0,004	313
Au	0,0004	32.037

<sup>111</sup> ISWA, 2015, *Bottom ash from WTE plants: Metal recovery and utilization.*

Como parte del proceso de tratamiento de cenizas es normal contar con sistemas de retiro de metales. Estos procesos tienen como objetivo garantizar que las cenizas sean adecuadas para su disposición final en rellenos sanitarios. Por otro lado, al existir en Chile un mercado establecido de compra de metales, es factible obtener beneficios económicos de la venta de los metales recuperados de estos procesos de tratamiento.

Algunos usos de la ceniza de fondo son:

- **Material de construcción:** la ceniza se utiliza en reemplazo de un porcentaje de las gravillas y arenas utilizadas en la preparación del hormigón
- **Construcción de rellenos sanitarios:** la ceniza se utiliza como árido para la preparación de la superficie de fondo donde se instala la membrana impermeable; para las superficies de tránsito de camiones dentro del relleno; y para la cobertura final de los residuos dentro del relleno sanitario
- **Construcción de caminos:** la ceniza se utiliza en reemplazo de un porcentaje de las gravillas y arenas utilizadas en la base estabilizada y como agregados en la mezcla del hormigón de la carpeta de rodadura de calles, caminos y autopistas

**Tabla 4-9: Usos principales de ceniza de fondo por país**<sup>112 113</sup>

País	Uso principal
Bélgica	Material de construcción
Republica Checa	Construcción de rellenos sanitarios
Dinamarca	Construcción de caminos
Francia	Construcción de caminos
Alemania	Material de construcción
Italia	Material de construcción y Construcción de rellenos sanitarios
Países Bajos	Construcción de caminos
Noruega	Construcción de rellenos sanitarios
Suiza	Construcción de rellenos sanitarios
España	Construcción de caminos
Suecia	Material de construcción y Construcción de rellenos sanitarios
Reino Unido	Material de construcción y Construcción de caminos
Estados Unidos	Construcción de caminos y Construcción de rellenos sanitarios

<sup>112</sup> ISWA, “Management of Bottom Ash from WTE Plants”, An overview of management options and treatment methods, 2006

<sup>113</sup> University of Central Florida, Department of Civil, Environmental, and Construction Engineering, “Evaluating the Use of Waste-to-Energy Bottom Ash as Road Construction Materials”, 2014.

En la Tabla 4-9 se presenta un resumen del uso de ceniza de fondo para una selección de países donde se ha analizado este aspecto con respecto a la ceniza de procedencia de plantas WTE. Cabe destacar que solamente en EE.UU. existen varios programas de investigación como se puede reutilizar la ceniza de fondo en el contexto de economía circular y con el objetivo de reducir la cantidad de material depositado después del proceso de combustión de los RSD. En los países europeos existen diferentes opiniones y objetivos con respecto a la reutilización de ceniza o de los residuos de plantas WTE en general. Los países líderes en este aspecto son Dinamarca y Países Bajos donde el objetivo es eliminar disposición final en relleno sanitario a cero. Varios países han podido enviar su ceniza de fondo para rellenar antiguas mineras de sal en Alemania. Recientemente se está observando una tendencia que se están instalando plantas que están tratando específicamente cenizas de plantas WTE para su acondicionamiento que permite reutilizar este material (Basel, Suiza, 300.000 ton/año).

### 4.3.2 Ceniza volante

#### 4.3.2.1 Descripción general

Normalmente este término pertenece al principal componente de los residuos del sistema de tratamiento de gases, debido a que representa la mayor porción de masa de polución total del sistema, generalmente el 2.5% del peso de los RSD que entran al proceso de incineración, para el caso de combustión de parrilla, y el 7% para gasificación. La ceniza volante está compuesta por material particulado fino de los gases de escape. Estudios recientes comprueban que al desarrollar mejores sistemas de control de emisiones y de polución se pueden reducir en gran parte varios elementos de la ceniza volante.

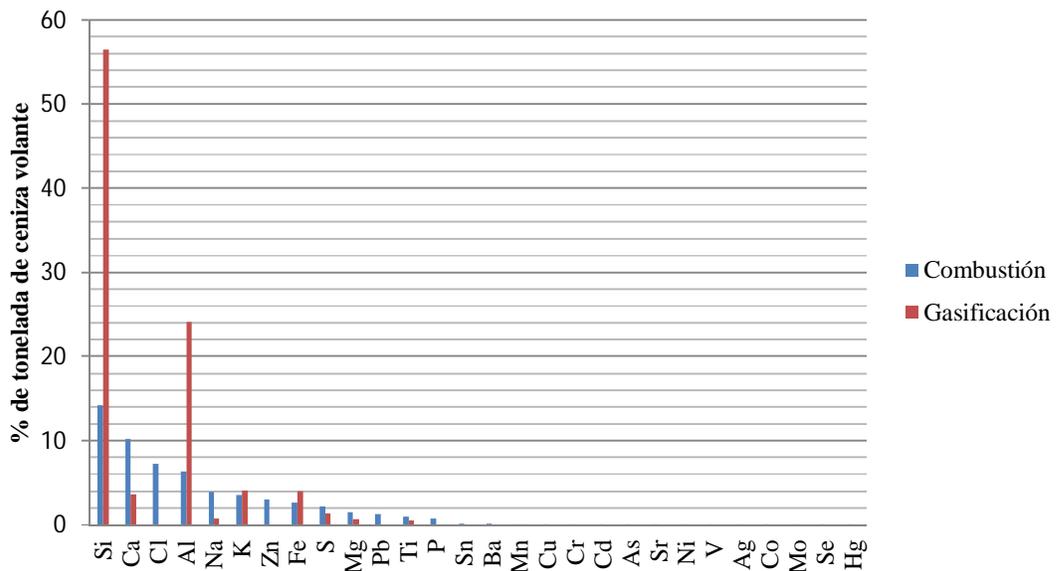


Figura 4-12: Composición promedio de ceniza volante, para el caso de tecnologías de incineración por parrilla y gasificación.<sup>114</sup>

<sup>114</sup> E. Kalogirou, N. Themelis, P. Samaras, 2010, *Fly ash characteristics from Waste to Energy facilities and process for ash stabilization.*

#### 4.3.2.2 Tecnologías para tratamiento y manejo de residuos<sup>115</sup>

La tecnología de tratamiento puede ir acompañada de un cambio físico o químico de las propiedades de los residuos. Según el principio de operación, las tecnologías se pueden dividir básicamente en:

**Extracción y separación:** Proceso que involucra la extracción y separación de componentes específicos en los residuos, en particular extracción de sales y metales pesados. Los procesos son relativamente simples, sin embargo, en algunos casos van acompañados de procesos de estabilización química o de solidificación. Sus principales métodos comerciales son:

- Lavado en agua: Se mezcla agua con residuos del sistema de tratamiento de gases en una suspensión extremadamente alcalina, con pH cercano a 11-13. La mayoría de las sales pueden ser extraídas, aunque los metales pesados no.
- Lavado en ácido: En muchos aspectos es similar al método anterior, sin embargo, en este caso el pH es de 3 a 6. Con este medio es posible remover sales y la mayoría de metales pesados. Este método puede ir acompañado con procesos como tratamiento térmico o solidificación.

**Estabilización química:** Proceso que involucra unión e inmovilización de contaminantes por reacciones químicas. Estos tipos de técnicas son relativamente sencillas y tienen la ventaja de que mejoran las propiedades de lixiviado de residuos. La principal desventaja es la generación de sal y metales que contienen las aguas de procesos.

- Estabilización por FeSO<sub>4</sub>: Se añaden óxidos de hierro a un residuo en suspensión para incrementar la capacidad de absorber metales pesados. La técnica involucra varios pasos: primero se extraen las sales y se mezcla con FeSO<sub>4</sub>, luego se produce la oxidación de Fe por precipitación, se ajusta el pH alrededor de 10-11, para finalmente retirar el agua presente.
- Estabilización por CO<sub>2</sub>: Proceso similar a la estabilización por FeSO<sub>4</sub>, con la diferencia que este caso es especial para metales como el Pb, Cd y Zn. Los metales son unidos a los carbonatos, lo que produce un componente sólido y estabilizado especial para que los polulantes sean depositados en rellenos sanitarios.
- Estabilización por PO<sub>4</sub>: Similar a los casos anteriores, se unen metales pesados con minerales de fosfato. Este proceso es relativamente seco, solo se incorpora un poco de agua para evitar limpiar el polvo.

**Solidificación:** Proceso que involucra la unión física y encapsulamiento de residuos, y en algunos casos también estabilización química. Su principal enfoque es minimizar la lixiviación de metales pesados luego de la deposición final.

- Estabilización de cemento: Es la técnica más utilizada para el tratamiento de la ceniza volante. El principal inconveniente de este método es el requerimiento de utilizar una alta tasa de cemento/ceniza resultando en un aumento de masa. Puede

---

<sup>115</sup> ISWA, 2008, *Management of APC residues from WTE plants*.

ser utilizado en conjunto con lavado en ácido para cumplir con normativas de lixiviación.

- **Vitrificación:** Utiliza la fundición de una mezcla de residuos y la adición de elementos para fabricar vidrios (por ejemplo, Si). La mezcla es calentada aproximadamente a alrededor de los 1300-2000°C. En este proceso, los residuos son bordeados por el material vidrioso que los encapsula.
- **Fundición:** Este proceso es similar al proceso de vitrificación, sin embargo no se utilizan materiales vidriosos. Para esto se utiliza las diferencias de temperatura de fundición de los metales con el fin de separarlos. En algunos casos se añade materia orgánica de modo de añadir energía al proceso.

**Tabla 4-10: Principales procesos para control de ceniza volante. Cabe destacar que estos procesos están comercialmente disponibles<sup>114</sup>.**

Proceso	Cambio de peso %	Costo USD/ton
Solidificación de cemento	+20-50	29-58
Vitrificación	+30-50	116-580
Fundición	-	116-580
Lavado ácido + tratamiento térmico	-20	116-232
Estabilización por FeSO4	-10	75
Estabilización por CO2	-10-20	93
Estabilización por PO4	+10-20	29

#### 4.3.2.3 Usos

En general las cenizas volantes no son revalorizadas y principalmente solo son tratadas y dispuestas de acuerdo a la legislación de cada país. Sin embargo se han desarrollado algunos usos considerado que el contenido de ceniza volante es similar al del cemento Portland (por ejemplo Ca, S, Al, Si), por lo que dependiendo de su calidad<sup>116</sup>, puede ser utilizada en reemplazo de un porcentaje del cemento (similar al cemento puzolánico y cemento siderúrgico disponibles en Chile), (no confundir con solidificación con cemento); o una vez estabilizado se puede utilizar como agregado fino a la mezcla del hormigón o asfalto en reemplazo del polvo de roca mejorando la distribución granulométrica de los áridos utilizados. Sin embargo, la ceniza volante no puede sustituir completamente al cemento por su contenido de sales y potencial generación de hidrógeno. Estos usos dependen de la calidad de la ceniza y deben estar aprobados por la legislación de cada país, aunque para el caso particular de Chile no existe normativa al respecto. Entre las aplicaciones comunes se pueden destacar las siguientes:

- **Aplicaciones para cemento:** Se utilizan las cenizas volantes como sustituto de un porcentaje del cemento para construcción de prefabricados. Ejemplos de estos son bloques de protección en bahías, arrecifes artificiales y elementos para cimientos.

<sup>116</sup> Norma Japonesa de calidad de ceniza volante JIS-A-6201

- **Materiales de relleno:** Para ser utilizados en autopistas, barreras de ruido, instalaciones de puertos, etc. Este tipo de aplicación no es muy aceptado debido a aspectos medio ambientales.
- **Asfalto:** Las cenizas volantes tienen propiedades que permiten rellenar el asfalto con un máximo aceptado de 25% de esta. Para esto se deben estabilizar los residuos y minimizar la lixiviación.
- **Capacidad de neutralización:** La naturaleza alcalina de la ceniza volante permite neutralizar los materiales ácidos presentes en residuos. Luego de este proceso, los productos sólidos restantes son dispuestos en rellenos sanitarios.

Los usos antes mencionados requieren de sistemas de control de la calidad de la ceniza rigurosos, y en general se encuentran en etapas tempranas de desarrollo para su uso en cenizas de plantas WTE. En continuación de este estudio no se está considerando ninguna reciclaje o venta de ceniza volante y se calcula el costo para su disposición final en un relleno de seguridad.

#### 4.3.3 Normativa para emisiones de ceniza

El Decreto Supremo N°148/2004 del Ministerio de Salud establece que se aprueba el reglamento sobre manejo de residuos peligrosos. A partir de esto, se fijan las condiciones mínimas a las que se debe someter la descarga de ceniza en plantas WTE. La norma establece que se deben cumplir con las concentraciones máximas permisibles (CMP), al aplicar el test de toxicidad por lixiviación que indica la norma. Este valor está en [mg/l]. Alternativamente a este test, se puede demostrar que la composición en forma seca ([mg/kg]) de los residuos, en un laboratorio acreditado por la Autoridad Sanitaria, no excede a la normativa del Test de lixiviación multiplicada por 20. En este contexto, para caracterizar las cenizas se deberá ejecutar un programa de monitoreo de éstas, dando cumplimiento a las exigencias establecidas en la Resolución Exenta N° 292/2005 que "Fija las Metodologías de Caracterización de Residuos Peligrosos" del Ministerio de Salud.

Además, la normativa europea para residuos peligrosos tiene distintas concentraciones exigidas para los elementos y compuestos, en el test de lixiviación. En consecuencia, para efectos de comparar las emisiones de las tecnologías WTE, se define un valor objetivo a cumplir, que será el mínimo valor entre las normativas para cada elemento o compuesto. Luego, se aplica la misma metodología para determinar la el valor objetivo seco.

**Tabla 4-11: Comparación entre norma chilena y europea, de manejo de residuos peligrosos, con respecto de descargas de ceniza de fondo y volante para principales tecnologías WTE**

Sustancia	Norma chilena Test toxicidad de lixiviación <sup>117</sup>	Norma EU <sup>118</sup>	Valor objetivo Test Lixiviación	Valor objetivo seco
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/kg]
Arsénico	5	2,5	2,5	50
Cromo	5	7	5	100
Mercurio	0,2	0,2	0,2	4
Plomo	5	5	5	100
Selenio	1	0,7	0,7	14
Bario	100	30	30	600
Benceno	0,5		0,5	10
Cadmio	1	0,5	0,5	10
Clorhidratos	S.I.	2.500	2.500	50.000
Fluorhídricos	S.I.	50	50	1000
Cobre	S.I.	10	10	200
Sulfatos	S.I.	5.000	5.000	100.000
Antimonio	S.I.	0,5	0,5	10
Molibdeno	S.I.	3	3	60
Níquel	S.I.	4	4	80
Zinc	S.I.	20	20	400
Solidos Totales Disueltos	S.I.	10.000	10.000	N/A
Carbón Orgánico Total	S.I.	100	100	2.000

Es por esto que se compararán las emisiones de las tecnologías, con respecto al valor objetivo del cual se tengan datos empíricos. Por ejemplo, los Test de Lixiviación son comparados directamente con la CMP que establece la norma, sin embargo, en caso que se tenga información solo de muestras de laboratorio en forma seca, se compara con el valor objetivo seco. Para los elementos y compuestos no considerados en la normativa nacional, serán considerados los valores de la norma europea.

En resumen, el Decreto Supremo N°148/2004 señala que se debe hacer el Test de Lixiviación a las cenizas volantes. En caso de que no cumplan con los límites señalados, se deben depositar en un relleno de seguridad. Por lo tanto, a continuación se considera que las cenizas volantes se depositarán en un relleno de seguridad con sus costos asociados en el OPEX.

<sup>117</sup> Ministerio de Salud, 2004, *Decreto 148: aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos*, Chile.

<sup>118</sup> Official Journal of the European Communities, 2003, *establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills*, UE.

#### 4.3.4 Residuo líquido

##### 4.3.4.1 Descripción general

En una planta WTE, se generan residuos líquidos en diferentes partes del proceso, algunos propios de la planta y otros que dependen de la tecnología de tratamiento de gases de combustión:

- Percolados en el Bunker de almacenamiento
- Agua de procesos de tratamiento de gases
- Agua de lavado de pisos de la planta
- Agua de procesos de pre-tratamiento (si los hubiese)

Estas aguas deben ser tratadas conforme a su origen y composición, sin embargo, en una planta moderna, las aguas tratadas no son descartadas fuera de la planta, sino que son íntegramente reutilizadas. Las únicas pérdidas de agua en una planta moderna son en forma de humedad en los gases de escape y en el contenido de humedad de las cenizas.

##### 4.3.4.2 Tratamientos básicos

Los tratamientos básicos que deben tener las aguas residuales son los siguientes:

- a) Físicos: En este caso se remueven los elementos sólidos, usualmente pasando a través de pantallas que filtran escombros y partículas sólidas. Además, los sólidos que son más pesados que el agua son sacados por gravedad.
- b) Biológicos: Es retirada la materia orgánica con la adición de bacterias u otros organismos pequeños. Si se añade oxígeno a las aguas residuales, las masas de los microorganismos crece y rápidamente metabolizan los polulantes orgánicos.
- c) Químicos: Se utilizan químicos para crear cambios en polulantes que incrementan la capacidad de remover en procesos físicos. En algunos casos los químicos utilizados reaccionan con componentes de las aguas residuales, para formar compuestos más pesados, y consecuentemente más fáciles de retirar.

##### 4.3.4.3 Normativa

Una planta WTE que presente Residuos Líquidos Industriales (RILES) deberá cumplir los siguientes decretos:

Decreto 90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Para el caso de instalación en la Región Metropolitana, solo aplicaría la normativa respecto a descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales. Ver Tabla 4-12.

Decreto 609: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. En este caso se considera que la planta cuenta con tratamiento de aguas servidas.

**Tabla 4-12: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales y descarga de efluentes que se efectúan a redes de alcantarillado que cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas<sup>119</sup>**

Contaminantes	Unidad	Límite máximo cuerpos fluviales	Límite máximo aguas servidas
Aceites y grasas	mg/L	20	150
Aluminio	mg/L	5	10 (1)
Arsénico	mg/L	0,5	0,5
Boro	mg/L	0,75	4 (1)
Cadmio	mg/L	0,01	0,5
Cianuro	mg/L	0,2	1
Cloruros	mg/L	400	-
Cobre total	mg/L	1	3
Coliformes fecales o termotolerantes	NMP/100ml	1.000	-
Índice de fenol	mg/L	0,5	-
Cromo Hexavalente	mg/L	10	0,5
DBO5	mg O2/L	35	300
Fósforo	mg/L	10	10-15
Fluoruro	mg/L	1,5	-
Hidrocarburos	mg/L	10	20
Hierro disuelto	mg/L	5	-
Manganeso	mg/L	0,3	4
Mercurio	mg/L	0,001	0,02
Molibdeno	mg/L	1	-
Níquel	mg/L	0,2	4
Nitrógeno amoniacal	mg/L	-	800
Nitrógeno Total Kjeldah	mg/L	50	-
Pentaclorofenol	mg/L	0,009	-
PH	Unidad	6,0-8,5	5,5-9,0
Plomo	mg/L	0,05	1
Poder espumógeno	mm	7	7
Selenio	mg/L	0,01	-
Sólidos sedimentables	ml/L 1h	-	20
Sólidos suspendidos totales	mg/L	80	300
Sulfatos	mg/L	1.000	1.000(2)
Sulfuros	mg/L	1	5
Temperatura	°C	35	35
Tetracloroetano	mg/L	0,04	-
Tolueno	mg/L	0,7	-
Triclorometano	mg/L	0,2	-
Xileno	mg/L	0,5	-
Zinc	mg/L	3	5

<sup>119</sup> Decreto 90 y Decreto 609

Nota 1: Si la concentración media del contaminante presente en la captación de agua del establecimiento industrial (distribuida por el prestador de servicio sanitario o de fuente propia) fuere mayor a la indicada en la tabla, el límite máximo del contaminante presente en la descarga será igual a la concentración presente en la captación.

Nota 2: Se aceptarán concentraciones entre 1.000 y 1.500 mg/L cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- a) pH = 8 – 9
- b) Temperatura del residuo industrial líquido (°C)  $\leq$  temperatura de las aguas receptoras.

Como en general las plantas no cuentan con sistema de descarga de riles, no se cuenta con mediciones para poder comparar con la normativa.

#### 4.4 **Requerimiento de permisos ambientales**

Un proyecto de WTE, entra al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental bajo dos criterios de la Ley 19.300, artículo 10:

- Letra c.) Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW
- Letra o.5) Plantas de tratamiento y/o disposición de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios y estaciones de transferencia y centros de acopio y clasificación que atiendan a una población igual o mayor a 5.000 habitantes

Los efectos de una planta en general son reducidos, pero de no ser diseñada, construida y operada adecuadamente, una planta WTE puede tener riesgos para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de sus emisiones, por lo que a juicio del consultor esto debe ser considerado en el diseño, en los planes de operación, y analizado dentro de un proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, como un Estudio de Impacto Ambiental, EIA, el cual deberá considerar al menos los siguientes procesos de evaluación:

- Proceso de consulta ciudadana
- Evaluación respecto a su impacto en el instrumento de planificación territorial (PLADECO u otro)
- Evaluación respecto a su impacto con las Estrategias de Políticas y Planes Regionales
- Evaluación de compatibilidad territorial (ubicación)
- Evaluación Sectorial

##### 4.4.1 **Proceso de consulta ciudadana**

Es importante considerar, que cualquier proyecto de esta envergadura requiere de una licencia social para su ejecución, para ello es imprescindible contar con un adecuado plan de difusión del proyecto.

Las tecnologías de valorización energética o WTE, han evolucionado en el tiempo y actualmente son consideradas dentro de las pirámides de jerarquía de manejo de residuos.



**Figura 4-13: Estrategia jerarquizada en el manejo de residuos**

Pero esto requiere de un proceso de educación de la población, e idealmente la implementación de estos proyectos dentro de un programa de prevención, reutilización y reciclaje que disminuya los residuos destinados a esta planta.

#### **Evaluación respecto a su impacto en el instrumento de planificación territorial**

Una de los principales obstáculos con el desarrollo de un proyecto WTE es su integración con la comuna donde se emplazará. La selección de la ubicación de una planta debe ser realizada en conjunto con la autoridad debido a sus impactos, positivos y negativos que tendrá en el sector inmediato de su emplazamiento.

Dentro de los impactos más significativos a considerar dentro de la evaluación están:

- Impactos en el sistema de transporte urbano
- Impactos en el desarrollo industrial cercano

El flujo constante de camiones de residuos domiciliarios que van hacia la planta, generan un impacto sobre el sistema de transporte que debe ser considerado. Es por esto que se debe tener una estrategia de planificación vial en conjunto con la autoridad, de manera de optimizar rutas en función de minimizar impacto vial, costos de transporte y recolección y evaluando mejoramiento en rutas existentes.

Las plantas WTE, en general y en particular las de tecnologías de combustión son una fuente económica de calor y vapor industrial, lo que es ideal para algunos sectores industriales. Este vapor solo puede ser entregado en las cercanías de la planta. De la misma forma, es factible aprovechar esto en un sistema de calefacción distrital, pero se requiere la implementación del sistema de distribución de calor lo que escapa del alcance de este estudio de factibilidad.

#### **4.4.2 Evaluación Sectorial**

La Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, dispone que el titular de cualquier proyecto y actividad que sea sometido al SEIA se encuentre obligado a identificar la normativa ambiental aplicable a su proyecto o actividad, y a señalar el modo en que dará cumplimiento a la misma.

Si el proyecto o actividad es calificado favorablemente por la autoridad competente, la resolución que ésta emita certificará que dicho proyecto o actividad cumple con la normativa de carácter ambiental aplicable.

Por otra parte, la misma Ley establece que todos los permisos o pronunciamientos de carácter ambiental que deban o puedan emitir otros organismos del Estado respecto de proyectos o actividades sometidos al SEIA, deberán ser otorgados a través de este sistema.

El Título VII del Reglamento del SEIA lista los permisos ambientales sectoriales y señala los requisitos para su otorgamiento y los contenidos técnicos y formales para acreditar su cumplimiento.<sup>120</sup>

Cada una de las subsecretarías debe realizar la evaluación de los aspectos de su competencia dentro del proyecto y de los permisos sectoriales mixtos que correspondan.

Como mínimo un proyecto de WTE deberá gestionar el Permiso Ambiental Sectorial, en adelante PAS, 140: Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier planta de tratamiento de basuras y desperdicios de cualquier clase o para la instalación de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios de cualquier clase, y el Permiso Ambiental Sectorial Mixto, en adelante PASM, 142 y 161: Permiso para todo sitio destinado al almacenamiento de residuos peligrosos y Calificación de instalaciones industriales y de bodegaje. El PAS 140: Principal y más completo documento que se debe preparar, el cual al menos debe contener:

- Descripción y planos del sitio.
- Descripción de variables meteorológicas relevantes.
- Descripción del sistema de monitoreo de la calidad del agua subterránea.
- Estimación y caracterización cualitativa y cuantitativa de los residuos a tratar.
- Diseño de la planta de tratamiento que incluya diagrama de flujo, las unidades y equipamiento.
- Formas de abatimiento de emisiones y de control y manejo de residuos.
- Descripción del sistema de manejo de rechazos.
- Descripción del tipo del bunker de almacenamiento (indicando capacidad máxima de almacenamiento).
- Especificaciones técnicas de las características del bunker de almacenamiento y medidas de protección de condiciones ambientales.
- Descripción del sistema perimetral de intercepción y evacuación de escorrentías superficiales.
- Descripción del sistema de recolección y evacuación de las aguas que precipiten sobre la planta.

---

<sup>120</sup> <http://sea.gob.cl/documentacion/permisos-autorizaciones-ambientales>

- Plan de verificación y seguimiento de los residuos a ser tratados y rechazados.
- Plan de contingencias.
- Plan de emergencia.
- Programa de control de parámetros críticos de la operación de la planta.
- Plan de medición y monitoreo de emisiones gaseosas.

Dependiendo de la ubicación y condiciones propias de sitio de emplazamiento del proyecto, pueden ser necesarios los siguientes PAS y PASM.

- En el caso de desarrollarse el proyecto en las inmediaciones de un cuerpo de agua que pudiese ser afectado durante la construcción operación o abandono del proyecto se deberá realizar un levantamiento de línea base de la fauna íctica, la cual dependiendo de sus características puede requerir realizar pesca de investigación en cual caso aplica el PAS 119: Permiso para realizar pesca de investigación.
- Además, si el proyecto considera otras obras sobre el cauce podrían aplicar otros PASM, como:
  - Captaciones de agua con estructuras con una profundidad mayor a 5 m u obras de conducción de agua con canoas o sifones, en cuyo caso aplica, PASM 155: Permiso para la construcción de ciertas obras hidráulicas.
  - Desvíos o modificaciones del cauce natural, en cuyo caso aplica PASM 156: Permiso para efectuar modificaciones de cauce.
  - Defensa de las riberas en cuyo caso aplica PASM 157: Permiso para efectuar obras de regularización o defensa de cauces naturales.
- El caso de desarrollarse en las afueras de la ciudad en terrenos fuera de los límites urbanos, aplicaría el PASM 160: Permiso para subdividir y urbanizar terrenos rurales o para construcciones fuera de los límites urbanos.
- Si durante el desarrollo o construcción del proyecto se identifica algún cuerpo de agua subterráneo en la zona de construcción del bunker aplica el PAS 125: Permiso para la ejecución de labores mineras, en sitios donde se han alumbrado aguas subterráneas en terrenos particulares o en aquellos lugares cuya explotación pueda afectar un caudal o la calidad natural del agua.
- Si durante el desarrollo o construcción del proyecto se encontrasen elementos de patrimonio cultural de valor antropológico o paleontológico aplica el PASM 132: Permiso para hacer excavaciones de tipo arqueológico, antropológico y paleontológico.

Dependiendo del diseño de la planta, pueden ser necesarios los siguientes PAS y PASM.

- Si la planta no considera su conexión con la red de aguas servidas (o alcantarillado municipal), y en cambio considera una solución de alcantarillado particular, aplica el PAS 138: Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra pública o particular destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de desagües, aguas servidas de cualquier naturaleza.

- Si la planta no considerase la recuperación de las aguas dentro del proceso, y en cambio considerase por alguna razón la evacuación de los RILes categorizados como no peligrosos, entonces aplicaría el PASM 139: Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra pública o particular destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros.
- Los sistemas de tratamiento, los sistemas de tratamiento de gases de emisión, generan residuos peligrosos, los que deben ser almacenados y transportados, dependiendo de quien realiza el transporte de residuos peligrosos (personal propio o empresa especializada externa) aplicarían el PASM 143: Permiso para el transporte e instalaciones necesarias para la operación del sistema de transporte de residuos peligrosos, respectivamente.
- Las plantas WTE dependiendo de la tecnología y su diseño pueden eliminar y/o reciclar distintos tipos de residuos peligrosos, en tal caso aplicarían los PASM 144 y/o 145: Permiso para instalaciones de eliminación de residuos peligrosos y Permiso para el sitio de reciclaje de residuos peligrosos.

Para mayor información, ver Anexo G.

## 4.5 Variables determinantes para ubicación de una planta WTE

### 4.5.1 Aspectos principales

La selección de la ubicación óptima para una planta WTE es un proceso muy complejo y tiene muchos factores de influencia en su evaluación. Un aspecto fundamental es la aceptación pública y la involucramiento de las municipalidades y autoridades en este proceso. Como aún no existen antecedentes en Chile<sup>121</sup> para proyectos reales, ejecutados y operativos, también hay que considerar un proceso de participación ciudadana y capacitación, difusión de información con respecto a la tecnología y sus implicancias en la cercanía del proyecto, para asegurar el apoyo y por ende, evitar retrasos en el desarrollo del proyecto.

Por el lado técnico hay que considerar los siguientes aspectos claves para determinar la mejor ubicación de un proyecto WTE, algunos de ellos son excluyentes para el desarrollo exitoso:

- **Áreas protegidas y uso de suelo:** no se puede ubicar el proyecto donde legalmente se prohíba construir una planta WTE, ni en cercanía a un área protegida. En la RM los distintos Planes Reguladores de cada comuna rigen este requerimiento en primera instancia.
- **Disponibilidad del terreno:** El terreno en evaluación debe estar disponible por lo menos por 40 años (se recomienda, 60 años). Este criterio debe ser analizado en las fases futuras de evaluación del proyecto, con terrenos ya identificados.

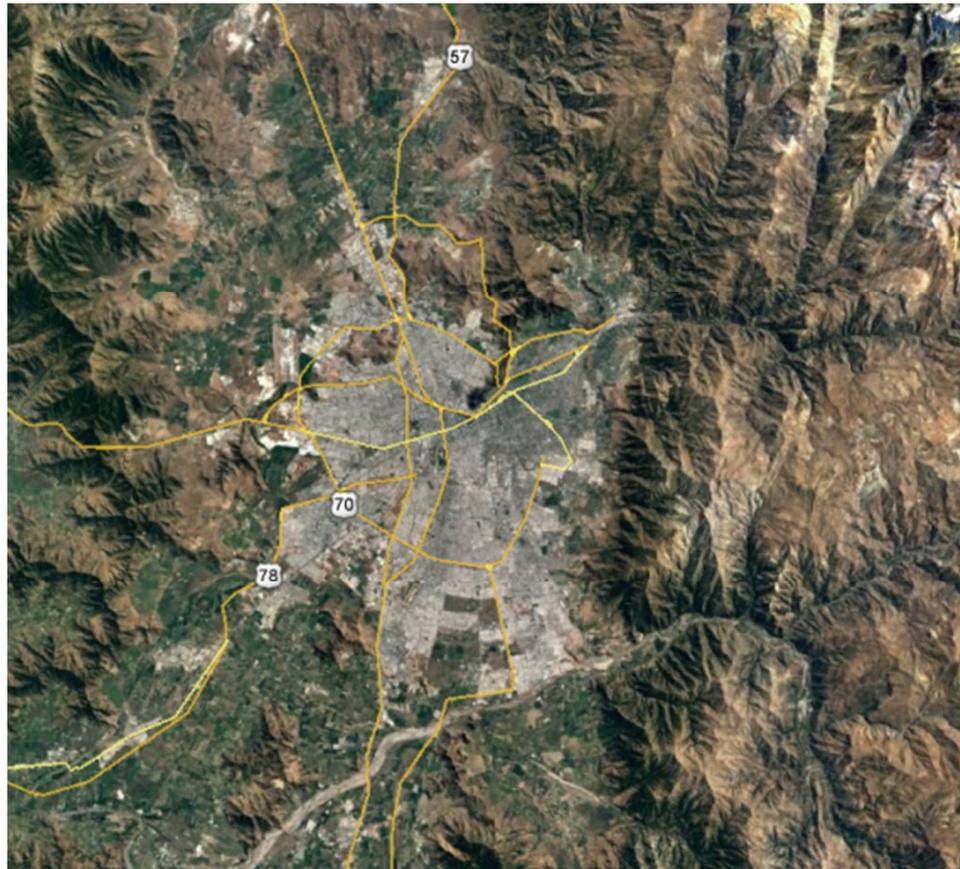
---

<sup>121</sup> A la fecha de edición de este informe se encuentra ingresado al SEA el proyecto WTE Araucanía, en la IX Región el cual presenta diversas observaciones ambientales antes de su ejecución por lo que no puede ser considerado aun como un caso exitoso en Chile.

- **Impactos ambientales:** los impactos ambientales en términos generales se pueden comparar con la situación actual de una zona, considerando la implementación de un proyecto WTE. Estos impactos deberán ser descritos en un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y ser presentados al SEIA. En primer lugar, hay que cumplir con la normativa y leyes vigentes. Alternativamente, se puede optar para estándares más altos que la norma para minimizar el impacto de las emisiones, las cuales incluyen:
  - *Emisiones atmosféricas:* su impacto está definido por el sistema de tratamiento de los gases de combustión.
  - *Emisiones líquidas sanitarias:* el impacto está controlado por el sistema de tratamiento de aguas servidas o destinadas a una red de alcantarillado para su tratamiento en la planta de tratamiento externa.
  - *Emisiones líquidas de procesos:* si las hubiere, ya que en general las aguas residuales de los procesos internos de la planta WTE son reutilizadas dentro de la planta, y solo se pierden como el contenido de humedad de las cenizas y como vapor en los gases de emisión.
  - *Ruido:* el ruido es controlado primariamente con la edificación que contiene todos los equipos, la arquitectura interior, y la aislación antiruido específica de los equipos que tienen las mayores emisiones. El ruido principalmente será generado por el tráfico de camiones de recolección de los RSD y los equipos utilizados para el funcionamiento de la planta. Es por esto que, el incremento de ruido en zonas poco pobladas (rurales) es mayor en comparación con zonas industriales o con alta densidad de población (sector central).
  - *Olor:* las instalaciones de la planta WTE pueden emitir olores que son originados desde las zonas de descarga, zona de acopio de RSD, las zonas de acopio de residuos finales (líquido y sólido) y de las emisiones atmosféricas.
  - *Emisiones sólidas:* las emisiones sólidas se refieren a los residuos finales del proceso de combustión o gasificación, que se están acumulando en la planta para su disposición final en un relleno sanitario. Dependiendo del diseño y la operación de la planta se pueden generar emisiones sólidas en forma de polvo, dependiendo principalmente de la forma de cierre del equipamiento de la planta. Lo mismo puede pasar si las vías de maniobra interior de la planta no se mantienen limpias (efecto similar a construcciones).
  - *Tráfico adicional:* como se mencionó anteriormente, debido a la concentración de camiones de residuos, se espera un aumento de tráfico en las cercanías de la planta. Este tráfico genera emisiones de gases de escape, ruido y congestión en las vías de acceso. Por lo tanto, es importante que estas vías de acceso tengan suficiente capacidad para absorber este tráfico adicional, sin generar mayores inconvenientes a los vecinos. Eso puede significar que los accesos deban ser modificados por la cantidad y peso de los vehículos que pasarán. Otra medida que puede ser considerada, es limitar el horario de entrada a los camiones de recolección, lo que permite que el tráfico no sea mayormente afectado durante el día.
- **Aspectos sociales:** la variedad de aspectos sociales es muy amplia, y solo se puede describir a nivel cualitativo sin tener un proceso de participación ciudadana.

Además, el resultado depende mucho en qué sector y con qué nivel socio-económico se llevará a cabo dicho proceso. Las inquietudes suelen ser diferente entre estos grupos.

- **Usuarios secundarios:** Los usuarios cercanos a la planta podrían ser beneficiados por la venta de energía, ya sea en forma de calor, electricidad o vapor para procesos industriales. Debido a las pérdidas asociadas a la transmisión de la energía, resultaría más beneficioso situar una planta en una zona industrial o urbana que en una zona rural.
- **Distancia:** se intenta minimizar las distancias entre los centros de generación de residuos y la planta. Además, se requiere una buena accesibilidad en los ejes principales de transporte, concentrando el tráfico en rutas adecuadas para el tipo de vehículos (ver Figura 4-14). Con esto se evitan obras que incrementen la capacidad de tráfico.

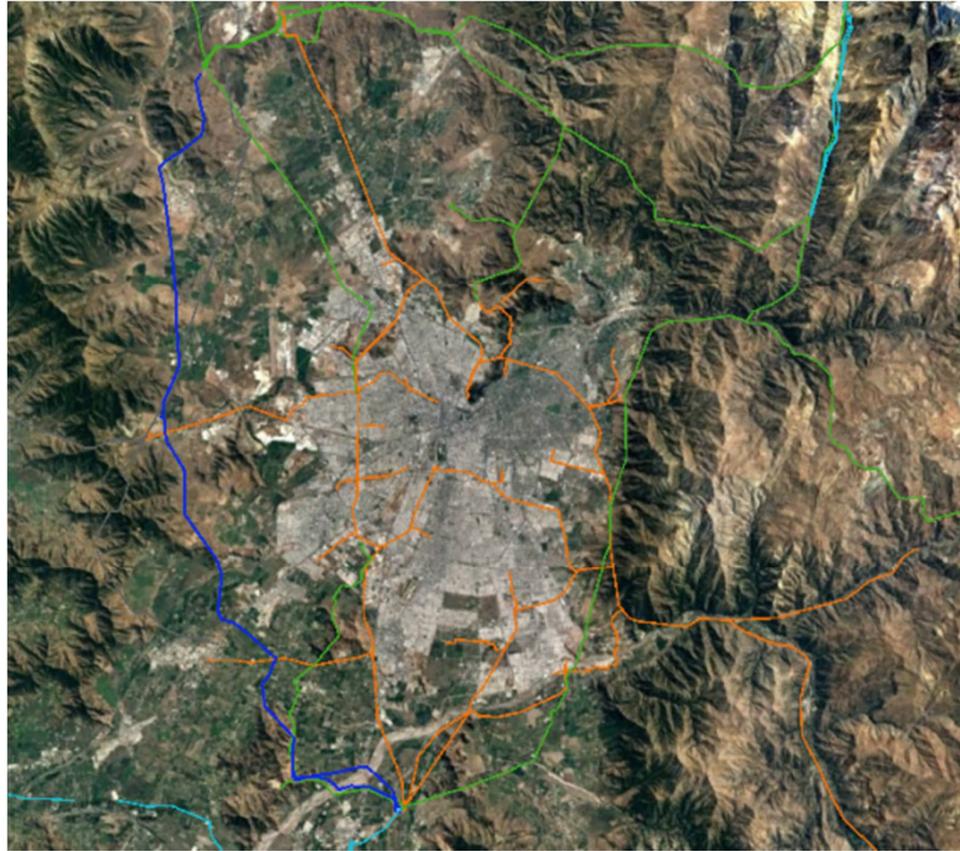


**Figura 4-14: Ejes principales de la RM (Elaboración propia)**

- **Espacio de reserva:** Idealmente el terreno seleccionado tendrá espacio para una segunda o tercera línea de procesamiento para una futura extensión. Considerando la cantidad anual de residuos generados en Santiago, que es de 3 a 4 millones toneladas (según escenarios), es importante considerar espacio para futuras extensiones e incrementos en la capacidad de la planta WTE. Este criterio puede

favorecer ubicaciones en la periferia y en zonas rurales, donde la densidad de edificación es menor que en zonas centrales.

- **Condiciones geotécnicas:** Las estructuras de la planta WTE requieren un subsuelo adecuado y suficientemente resistente a las cargas de los equipos. Si el suelo es demasiado duro o rocoso puede causar costo adicional en la fase de construcción. Por otro lado, un suelo muy débil puede significar esfuerzos adicionales. En el caso de Santiago, en general existen condiciones favorables con un subsuelo bastante uniforme, que permite excavaciones sin muchas medidas de fortificación de excavaciones sin problema hasta 10 m, mayormente sin presencia de agua. Sin embargo, hay que revisar bien estas condiciones, caso por caso con los estudios correspondientes en las siguientes fases de desarrollo de un proyecto específico.
- **Condiciones meteorológicas:** Aunque los sistemas de tratamiento de los gases de combustión tienen una alta eficiencia, es importante que la ubicación de la planta tenga una adecuada ventilación natural (velocidad de viento suficiente) para la dispersión de las emisiones atmosféricas. Además, según la topografía de Santiago se sabe que acumula contaminantes atmosféricos, especialmente en el periodo de invierno. Por lo tanto, este factor debe ser bien evaluado cuando se compararán diferentes sitios.
- **Interconexión:** Este criterio incluye los criterios de conexión de la planta. Tiene que contar con una subestación elevadora para conectarse a algún punto de alta tensión del Sistema Eléctrico Nacional (idealmente en 110 kV o mayor para minimizar las pérdidas). También, se debe definir el punto de disposición de agua potable, servida, de procesos, además del acceso vial y/o ferroviario. Estas interconexiones también se pueden organizar como parte del proyecto de desarrollo, pero habrá que incluir los costos en el CAPEX del mismo. Es por esto, que su significancia en la evaluación del sitio es considerada baja. En general, obviamente, se busca un lugar donde ya existan estos servicios o donde la inversión adicional sea mínima.



**Figura 4-15: Principales líneas de transmisión. Líneas azules son de 500kV, verdes de 220kV y naranjas 110kV (Elaboración propia)**

- **Arquitectura:** Dependiendo de la zona pueden existir diferentes requerimientos con respecto a la apariencia de la planta. En zonas industriales la arquitectura puede limitarse a lo mínimo necesario, en comparación con una ubicación más central o cerca de zonas residenciales. También, depende si se está pensando en una utilización secundaria con acceso público o público limitado como uso turístico para visitas guiadas o funciones educacionales para generar conciencia en el manejo de residuos (ejemplo de esto ocurre en Zúrich, Suiza). es importante considerar que estos usos incrementan el CAPEX y OPEX.

#### 4.5.2 Selección de ubicaciones

En esta sección se intenta definir y comparar tres ubicaciones genéricas e hipotéticas con respecto a sus características principales, como nivel de centralidad o distancia de centros de generación y disposición de RSD, principalmente con el objetivo de ilustrar el efecto de costos en transporte.

Para ello se ha separado la RM en tres sectores:

- Zona Rural: compuesta por las provincias Cordillera, Talagante, Chacabuco, Maipo y Melipilla, excluyendo las comunas de San Bernardo y Puente Alto.

- Zona Urbana: compuesto por el Gran Santiago considerando la provincia de Santiago con sus 32 comunas además de las comunas de San Bernardo y Puente Alto.
- Polos de alta densidad: compuesto por los centros de alta densidad habitacional, comercial o industrial dentro del gran Santiago.

#### 4.5.2.1 Zona Rural

Las comunas rurales tienen como característica principal la mayor distancia desde el centro de la RM.

**Producción de residuos:** Las municipalidades en este sector, por su tamaño y baja densidad, no producen suficientes RSD para soportar una planta WTE de capacidad típicamente comercial. Para viabilizar una planta deberá contar con alianzas con otras comunas vecinas hasta conseguir una cantidad suficiente de RSD (330.000 t/año o más) lo que deberá considerar dentro de la evaluación los costos de transporte desde éstas a la planta.

**Accesibilidad y disponibilidad de terrenos:** La accesibilidad desde ejes principales debe ser simple, debido al menor flujo vehicular y disponibilidad de terrenos en las inmediaciones de las vías principales. La interconexión con la red de transmisión puede requerir una línea de mayor tamaño por la mayor distancia a una subestación adecuada. Sin embargo, existe disponibilidad de espacio para su construcción. La disponibilidad de terrenos adecuados para la implementación de una planta es mayor.

**Emisiones:** El cambio en cantidad total de las emisiones en la zona tiende a ser mayor en comparación con ubicaciones más industrializadas, dado que el sector en general tiene un bajo nivel de emisiones e inmisiones.

**Fuentes de ingresos:** La demanda de calor en estas zonas en general no alcanza un nivel económico para comercializar el calor del proceso de combustión. Tampoco existe una industria con requerimiento de vapor de proceso. Por lo tanto, las únicas fuentes de ingreso de una planta WTE en este ambiente sería la venta de electricidad a la red, la tarifa de disposición y posiblemente la venta de materiales recuperados, en caso que el modelo de negocio resulte favorable incluir un sistema de pre-tratamiento.

**Arquitectura:** En esta zona no se han identificado requisitos especiales de arquitectura para la planta.

#### 4.5.2.2 Zona Urbana

La zona urbana cuenta con una alta probabilidad de situarse cercana a nodos de alto tráfico, como intersecciones de la ruta 5 y tramos del anillo de Américo Vespucio u otras autopistas que se conecten o crucen.

**Producción de residuos:** En este sector hay varias municipalidades vecinas, que generan suficiente RSD para establecer una asociación de municipios para desarrollar un proyecto de este tipo.

**Accesibilidad y disponibilidad de terrenos:** En este tipo de sectores existen varias subestaciones que permiten conectar la central a la red con líneas cortas. El acceso a servicios básicos (camino, transporte público, alcantarillado, etc.) no generaría costos

adicionales dado que ya existen en estas zonas. La disponibilidad de terreno puede ser limitada, pero todavía hay una oferta suficiente en las zonas industriales que incluso tienen espacio de reserva para una posible extensión posterior.

**Emisiones:** en esta zona las emisiones originadas por el transporte de los residuos tienden a ser menores en comparación con ubicaciones rurales debido a la mayor cercanía respecto a los puntos de generación de residuos, siendo posible ubicar la planta en una zona industrial existente cerca de ejes principales..

**Fuentes de ingresos:** en las zonas industriales o zonas mixtas es posible encontrar una adecuada demanda de calor y/o vapor que pueden ser comercializados como ingreso adicional a la venta de energía eléctrica.

**Arquitectura:** Los requisitos arquitectónicos siguen siendo menos exigentes siempre y cuando se pueda emplazar en un sector industrial, manteniendo un carácter pragmático con costos limitados.

#### 4.5.2.3 Polos de alta densidad

La ubicación en polos de alta densidad habitacional, comercial o industrial tiene como característica principal minimizar las distancias de transporte de los residuos recolectados y permitir maximizar las ventas de calor o vapor.

**Producción de residuos:** La ubicación central garantiza la mayor disponibilidad de residuos con los menores costos de transporte, logrando importantes ahorros en transporte con sus reducciones en costo y emisiones asociadas.

**Accesibilidad y disponibilidad de terrenos:** La posibilidad de encontrar un terreno adecuado, con suficiente superficie y disponible es baja y conllevaría un proceso administrativo complicado.

**Emisiones:** La planta, en esta ubicación, muy probablemente tendrá que cumplir con los estándares más altos con respecto a las emisiones y otros aspectos medioambientales como ruido y olores. Las limitaciones espaciales pueden requerir un diseño compacto y por lo tanto un CAPEX más alto.

**Fuentes de ingresos:** La cercanía de zonas con alta densidad residencial y posiblemente industria permitiría una óptima venta de calor y/o vapor para calefacción distrital/procesos industriales.

**Arquitectura:** la planta estaría cerca de muchos asentamientos urbanos y posiblemente en una ubicación casi emblemática, muy afecta a discusión pública. Por ende, los requerimientos a la arquitectura serían más exigentes que en las otras ubicaciones.

#### 4.5.2.4 Reducción de costos por ubicación

A partir de la construcción de la planta WTE, en alguna de las zonas referenciales descritas, es posible determinar lo que se podría ahorrar en costos por transporte. Al disponer de una planta mejor ubicada logísticamente, se consiguen ahorros considerables como lo muestran las siguientes tablas, que depende de la zona de instalación de la planta. Cabe mencionar que estos datos son referenciales y deben ser evaluados caso a caso.

Esto no sólo trae un ahorro económico, sino también hay menor emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente, pues el funcionamiento de camiones es reducido en distancia, y probablemente en tiempo. Los resultados obtenidos son presentados a continuación. Para mayores detalles del cálculo revisar Anexo H.

**Tabla 4-13: Cálculos referenciales de ahorro por transporte y disposición de residuos en relleno sanitario, por ubicación de planta.**

	Ahorro por Distancia [km/año]	Ahorro por Costos [MUSD/año]	Ahorro por Costos [USD/ton]	Ahorro de CO <sub>2</sub> [ton/año]	Ahorro de CO <sub>2</sub> [%]
Ubicación Rural	57.230	5,970	19,9	41	3,5
Ubicación Urbana	4.514.360	15,489	48,4	3.237	86,1
Ubicación Polos de alta densidad	5.664.490	21,654	71,0	4.061	97,1

Según la Tabla 4-13, se observa un aumento de los ahorros a medida que la instalación de la planta WTE se ubica en un municipio más céntrico. Esto, debido a que principalmente a que las comunas más céntricas tienen mayor densidad de población, y por lo tanto, generan mayor cantidad de RSD. Además, cada municipio podría tratar la basura de sus vecinos más cercanos, reduciendo significativamente las distancias que actualmente se recorren hasta los rellenos sanitarios. Por otra parte, esta reducción de distancia está casi directamente relacionada con la disminución de emisión de CO<sub>2</sub>.

### 4.5.3 Comparación cualitativa de ubicaciones

Se ha realizado una evaluación cualitativa de potenciales ubicaciones para el proyecto de WTE. Estas evaluaciones se han hecho en base a la experiencia del consultor gestionando proyectos en distintas etapas de desarrollo. Cabe destacar que la siguiente evaluación es sólo a nivel cualitativo con ubicaciones genéricas a nivel referencial.

En esta sección se comparan las ubicaciones de forma cualitativa con respecto a los criterios definidos al inicio de esta sección. La evaluación es relativa entre las opciones definidas en la sección anterior.

**Tabla 4-14: Tabla comparativa de ubicaciones típicas**

Criterio	Ubicación rural	Ubicación urbana	Ubicación Polos de alta densidad
Ambiental	Las emisiones atmosféricas adicionales que se producirían respecto a la situación actual son considerables, debido a que en estas zonas por lo general no hay grandes industrias ni gran cantidad de vehículos, que son las principales fuentes de emisión.	Las emisiones atmosféricas adicionales en la zona serían menos considerables que en el escenario rural, por el hecho de estar cercano a muchas industrias	Las emisiones atmosféricas adicionales serán considerables debido a la alta densidad de población cercana, y la saturación presente en la zona
Usuarios secundarios	Principalmente zonas residenciales, poca industria, por lo tanto, será difícil aprovechar toda la energía de la que dispone la planta.	Principalmente zonas industriales, donde es posible la venta de vapor y/o calor. Posiblemente zonas residenciales suficientemente cerca para calefacción distrital.	Zonas residenciales de alta densidad y comerciales con consumo de calor/refrigeración. Además, transporte público con consumo constante de electricidad y calor.
Distancia	La ubicación rural implica que algunas municipalidades estarán alejadas para entregar sus RSD a una planta con este emplazamiento, disminuyendo la viabilidad del proyecto.	La ubicación urbana permitiría incluir los RSD de varias municipalidades o transportarlos desde las estaciones de transferencia manteniendo la viabilidad del proyecto.	La ubicación en polos de alta densidad permite reducir las distancias recorridas por los camiones de recolección desde los municipios cercanos, que por su alta densidad habitacional y/o industrial incrementan la cantidad de RSD disponibles.
Espacio de reserva	Buena posibilidad para espacio de reserva.	Posibles opciones de espacio de reserva.	Poca flexibilidad para extensiones, escasez de espacio de reserva.

Condiciones meteorológicas	Ventilación en términos generales no posee problema en las municipalidades rurales.	Dependiendo de la ubicación se debería evaluar la eficiencia de la ventilación natural y definir la altura suficiente de la chimenea.	Altura de edificios existentes requeriría una chimenea más alta para cumplir con las normas y para tener buena ventilación de los gases de combustión.
Condiciones geotécnicas	Condiciones en general favorables en la RM, evaluación individual por sitio seleccionado.	Condiciones en general favorables en la RM, evaluación individual por sitio seleccionado.	Condiciones en general favorables en la RM, evaluación individual por sitio seleccionado, posiblemente más complejo cuando se ubica cerca de edificios existentes.
Interconexión - Líneas de Transmisión - Agua de proceso - Aguas residuales - Accesibilidad vial - Accesibilidad ferrovial	Las interconexiones deberían ser establecidas como parte del proyecto dado que se encuentra lejos de zonas habilitadas. La conexión a la red de transmisión también puede ser más compleja dependiendo de la municipalidad y ubicación final.	En términos generales hay buena accesibilidad en esta zona, con servicios y ejes principales cercanos, lo cual disminuye la inversión adicional que esto significa para el proyecto.	En general buena accesibilidad de servicios y ejes de transporte. Por otro lado, existe el riesgo de que el acceso a estos servicios ya esté saturado, y por lo tanto, no pueda asumir más capacidad.
Arquitectura	Exigencias medias dado que no estaría ubicado en zona expuesta al público o central.	Exigencias menores por estar ubicada en una zona industrial, semi-residencial.	Posibles exigencias mayores debidas a su ubicación central y cercanía a zonas de alta densidad de población.

Nota: al momento de realizar la selección de un sitio se debe considerar dentro de la evaluación los posibles impactos sobre la comunidad más inmediata a las instalaciones del proyecto.

#### 4.6 Conclusiones

Las principales conclusiones en cuanto al objetivo 3 del estudio, identificación y análisis de los requisitos ambientales que debe cumplir una planta WTE, se explican a continuación.

De la evaluación de los requerimientos ambientales, se observa que para las emisiones de gases es factible aplicar la norma de incineración, co-procesamiento y co-incineración, la que cubre todos los compuestos relevantes para la aplicación con este tipo de tecnologías. Sin embargo, al realizar el análisis comparándolo con la norma europea específica para las emisiones de plantas WTE, existe una diferencia importante en las magnitudes aceptadas para cada parámetro, siendo la norma europea más exigente que la norma nacional, puesto que para la mayoría de los parámetros, los valores máximos permitidos en la norma europea son la mitad de los indicados en la norma nacional. Es importante considerar que la normativa europea es utilizada en los distintos países miembros como el criterio más amplio a cumplir y varios países, e incluso localidades, tienen normas y exigencias más estrictas para la implementación de este tipo de tecnologías, donde en general se busca exigir rangos cercanos a lo que es posible conseguir con la mejor tecnología disponible (BAT). En referencia a las normas específicas que aplican a la RM, en particular para las emisiones de NO<sub>x</sub>, las exigencias son aún mayores. Por esto, se recomienda que para la evaluación de alguna futura planta basada en tecnologías WTE se solicite la aplicación del criterio más estricto entre las tres normativas.

Las emisiones de residuos sólidos en plantas WTE corresponden a las cenizas de fondo y volantes. El Decreto 148 del Ministerio de Salud, donde se establecen los parámetros para la clasificación de residuos peligrosos, al ser genérico para todos los residuos no considera todos los parámetros relevantes para las cenizas y necesita ser complementado. Aun así, se concluye que las cenizas de fondo deben ser depositadas en rellenos sanitarios y las cenizas volantes en rellenos de seguridad.

Las emisiones como ruido y olor, deben ser consideradas en el proceso de evaluación de un futuro proyecto WTE, no obstante, como tecnología estas se encuentran debidamente resueltas con el diseño de las obras civiles y los sistemas de aire de la planta.

Los residuos líquidos generados dentro de una planta WTE con tecnología moderna son reutilizados íntegramente, sin existir RILes. Otras emisiones como aguas lluvias y aguas servidas sí deben ser consideradas.

Por el tipo y envergadura del proyecto, necesariamente debe ser sometido al proceso de evaluación de impacto ambiental, a juicio del consultor con un estudio de impacto ambiental por sus potenciales riesgos a la salud de la población y sobre la calidad de los recursos naturales (Ley 19.300, Art. 11 causales "a" y "b", Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos y efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire respectivamente). Dentro de este estudio se identificó que la influencia de este tipo de proyectos con respecto al plan de desarrollo comunal es significativo, por lo que durante la planificación de un posible proyecto WTE las estimaciones de tamaño y la selección de la ubicación de la planta deben ser consensuadas con la autoridad local previo al inicio del proceso de evaluación ambiental.

De forma referencial, se identificaron tres ubicaciones tipo dentro de la Región Metropolitana donde se podría instalar la planta WTE: ubicación rural, en la periferia de la ciudad; ubicación urbana, en una zona semi central; y polos de alta densidad, en la zona central.

La ubicación rural tiene como característica principal la mayor distancia desde el centro de la RM. Las municipalidades en este sector, por su densidad poblacional, no producen suficientes RSD para abastecer a una planta con una capacidad típicamente comercial (aprox. 330.000 t/año), por lo cual, los RSD adicionales para alcanzar los requerimientos de la planta deberán ser transportados desde otras municipalidades. La demanda de calor y vapor en estas zonas en general no alcanzan un nivel económicamente atractivo, por lo que las únicas fuentes de ingreso serían la venta de electricidad a la red y los ingresos por la tarifa de disposición de RSD. Por otro lado, la ubicación con baja densidad de población reduce el riesgo de oposición social a un proyecto WTE.

La ubicación urbana cuenta con una alta probabilidad de situarse cercana a nodos de alto tráfico, como intersecciones de la ruta 5 y tramos del anillo de Américo Vespucio u otras autopistas que se conecten/crucen. En este sector existen varias municipalidades que generan suficientes cantidades de RSD como para abastecer una planta con una capacidad típicamente comercial. En esta ubicación hay zonas industriales, donde es posible encontrar una adecuada demanda de calor y/o vapor que pueden ser comercializados como ingreso adicional a la venta de energía eléctrica, rentabilizando el proyecto.

La ubicación en un polo de alta densidad garantiza la mayor disponibilidad de residuos con menores costos de transporte, logrando importantes ahorros en transporte y en sus emisiones asociadas. La cercanía de zonas con alta densidad residencial y posiblemente industrial, permitiría vender calor y/o vapor, sin embargo, la planta en esta ubicación muy probablemente tendrá que cumplir con los estándares más altos con respecto a las emisiones atmosféricas y otros aspectos medioambientales. La probabilidad de encontrar un terreno adecuado y disponible en ésta ubicación es baja, por lo que las limitaciones espaciales pueden requerir un diseño compacto y por lo tanto un CAPEX más alto. Además, la planta estaría cerca de muchos asentamientos urbanos y posiblemente en una ubicación casi emblemática, muy afecta a discusión pública, por ende, los requerimientos en arquitectura serían más exigentes que en las otras ubicaciones.

## 5 ETAPA 2 – OBJETIVO ESPECÍFICO 4

### 5.1 Evaluación técnico-económica comparativa entre tecnologías

El siguiente capítulo tiene por objetivo la evaluación de las diferentes alternativas tecnológicas disponibles para el aprovechamiento energético de los RSD de acuerdo a los supuestos y criterios definidos en el capítulo 3.3.

Los criterios de evaluación se clasificarán en dos grupos: criterios excluyentes, que son requisitos mínimos para la implementación y operación de una determinada tecnología, y criterios ponderados, los cuales serán evaluados de forma independiente para cada tecnología a fin de poder compararlas de manera cuantitativa.

Las tecnologías que pasen los criterios excluyentes serán evaluadas según los siguientes criterios ponderados:

- Cumplimiento normativo ambiental (emisiones atmosféricas, residuos industriales líquidos y cenizas), 30%
- Disponibilidad, 5%
- Costos Operacionales, 30%
- Costos de Inversiones, 30%
- Vida Útil, 5%

#### 5.1.1 Madurez Tecnológica

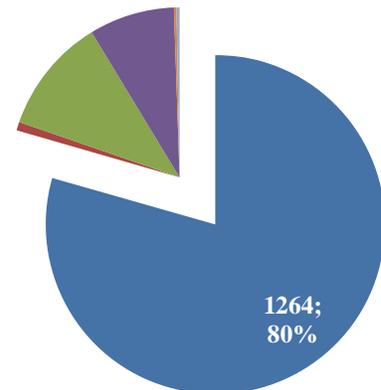
A continuación se presenta la evaluación de cada una de las tecnologías en términos de madurez tecnológica, cuantificando el número de plantas en operación, potencia instalada y disponibilidad de información de calidad y confiable de la operación de estas plantas.

##### 5.1.1.1 Combustión con Parrilla

La tecnología de combustión de parrilla está presente desde inicios del siglo XX<sup>122</sup>. Aunque las primeras plantas solo buscaban la eliminación de la basura por medio de la incineración, rápidamente fueron utilizadas como fuente de energía para otros usos.

Es la tecnología con mayor cantidad de años de experiencia en operación de plantas y de acuerdo con la información disponible, esta tecnología está presente en todos los países que ya están realizando el aprovechamiento energético de los RSD.

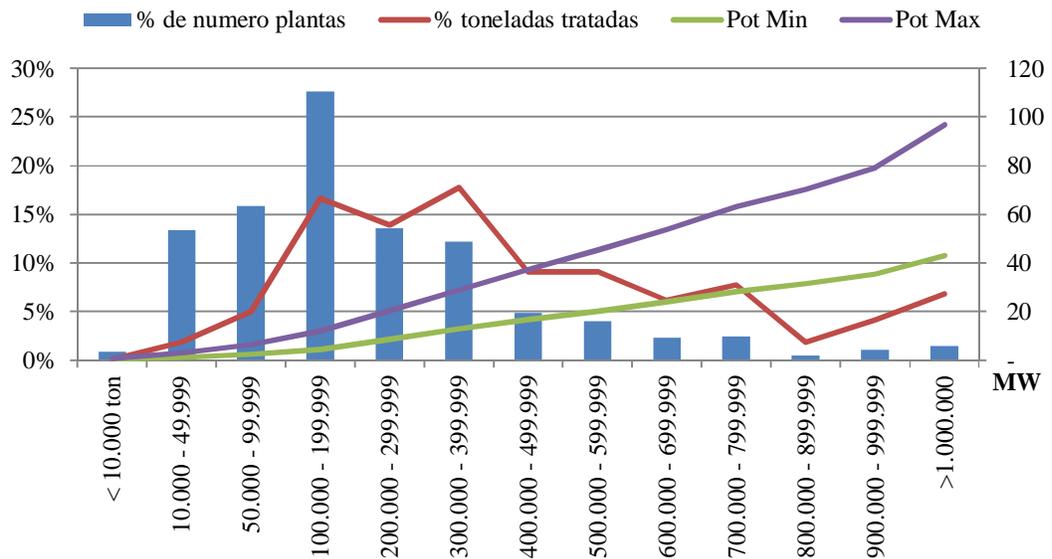
Esta tecnología cuenta con una capacidad instalada



**Figura 5-1** Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada

<sup>122</sup> H Kleis & S. Dalager. *100 years of Waste incineration in Denmark*, Babcock & Wilcox y Ramboll

en el mundo para tratar más de 135 millones de toneladas anuales de residuos, (información al año 2017, Anexo F). En la Figura 5-2 se presenta una distribución del porcentaje de plantas y de toneladas totales tratadas por tamaño de plantas, así como el rango de potencia instalada.



**Figura 5-2: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de combustión por parrilla.**

En el gráfico anterior se puede observar la distribución de las plantas de acuerdo a su capacidad en toneladas tratadas anuales y su potencia máxima y mínima en base de un valor inferior y superior de poder calorífico. Las plantas de capacidades entre 100.000 y 400.000 ton/año son las que mayor porcentaje de RSD tratan en la respectiva tecnología, alcanzando niveles de potencia entre los 15 MW y los 40 MW, dependiendo del poder calorífico de los RSD entregados en la planta. Este tamaño coincide con los tamaños típicos de una línea de los proveedores de esta tecnología, que tienen diseños estandarizados entre 150.000 hasta 330.000 ton/año.

En el desarrollo de este estudio no se ha encontrado registros recientes de fracasos en proyectos implementados con esta tecnología, por lo que se considera una tecnología madura y confiable, siendo recomendada como la primera tecnología a implementar en países que están iniciando proyectos de aprovechamiento energético de los residuos<sup>123</sup>.

Para la evaluación de esta tecnología se cuenta con información confiable de diversas fuentes. En particular la información más relevante para esto proviene de:

- **Registro de emisiones de las plantas en operación comercial:** se utilizarán los reportes públicos de emisiones, debido que en la mayoría de los países donde se encuentran implementadas, el monitoreo y reporte de emisiones se encuentra normado y el acceso a la información es público.

<sup>123</sup> N. Themelis et al, *Guidebook for the application of Waste to Energy technologies in Latin America and the Caribbean*, Earth Engineering Center Columbia University

- **La información de costos de operación (OPEX):** el consultor cuenta con múltiples asesorías y evaluaciones realizadas a diversas plantas<sup>124</sup>. Se utilizará información agregada, no obstante, la información particular de cada estudio y evaluación no será entregada por acuerdos de confidencialidad vigentes con terceras partes.
- **La información de costos de inversión (CAPEX):** el consultor cuenta con valores de inversión de otros proyectos y cuenta con ofertas no vinculantes de cuatro proveedores de tecnología para una planta prototipo de cada tamaño propuesto en el presente estudio, con valores para Santiago.<sup>125</sup>

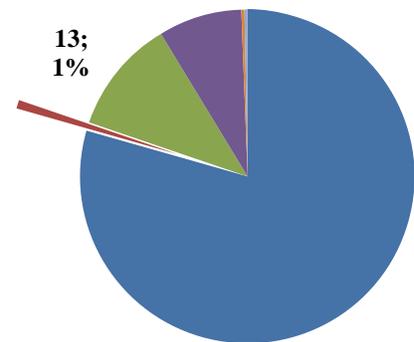
→ *Tecnología cumple con todos los criterios de análisis de aplicación*

### 5.1.1.2 Combustión en Horno Rotatorio

La tecnología de combustión de horno rotatorio está presente en la industria hace años, aunque su aplicación principal está ligada a la industria de elaboración del cemento.

A pesar de que se han encontradas 13 plantas de combustión con horno rotatorio para RSD, son más usadas para el tratamiento de residuos peligrosos y residuos clínicos. Esta tecnología normalmente es un sistema secundario para el tratamiento de una fracción de los residuos dentro de un sistema integral de tratamiento de residuos junto con otras tecnologías de WTE.

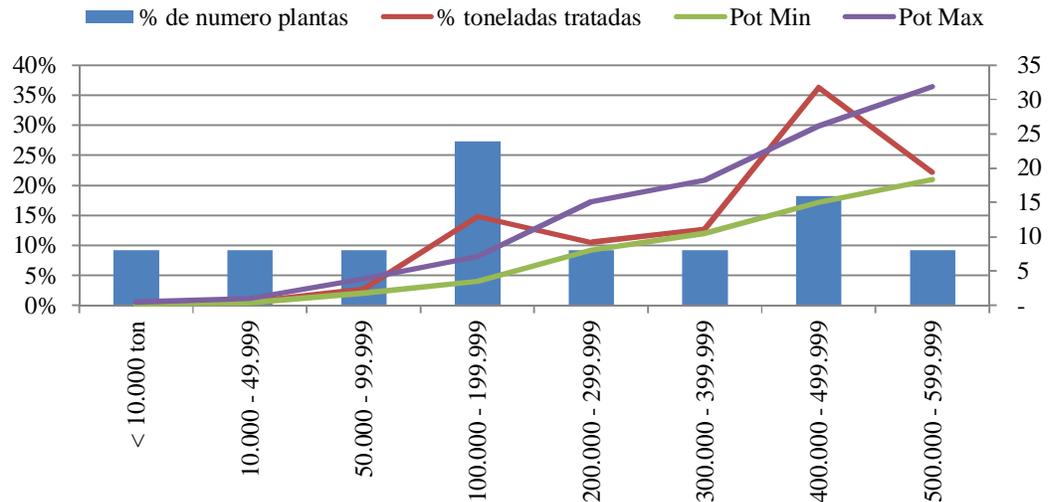
Esta tecnología cuenta con una capacidad instalada en el mundo para tratar más de 2,8 millones de toneladas anuales (información al año 2017, Anexo F) de residuos sólidos domiciliarios. En la Figura 5-4 se presenta una distribución del porcentaje de plantas y de toneladas totales tratadas por tamaño de plantas, así como el rango de potencia instalada.



**Figura 5-3: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada**

<sup>124</sup> Asesorías y evaluaciones realizadas por el grupo Pöyry a más de 150 plantas ubicadas en Norteamérica, Europa y Asia.

<sup>125</sup> Información específica de cada una de las ofertas no será entregada por acuerdos de confidencialidad donde los oferentes permiten utilizar solo información parcial de sus ofertas.



**Figura 5-4: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de horno rotatorio.**

En el gráfico de la Figura 5-4, se aprecia un mayor número de plantas para el rango de capacidad de planta entre 100.000 a 200.000 ton/año, sin embargo, la mayor cantidad de RSD tratados se concentra en el rango de capacidad de planta entre 400.000 a 500.000 ton/año. Para un mismo rango de capacidad de planta, la potencia nominal es ligeramente menor respecto al caso de combustión por parrilla. Se destaca que el análisis de esta tecnología es menos general, debido a la escasa cantidad de plantas existentes actualmente.

En el desarrollo de este estudio no se ha encontrado registros de fracasos en proyectos implementados con esta tecnología, por lo que se considera una tecnología madura y confiable.

Para la evaluación de esta tecnología se cuenta con información confiable de diversas fuentes<sup>126</sup>, en particular la información más relevante proviene de:

- **Registro de emisiones de las plantas en operación comercial:** se utilizarán los reportes públicos de emisiones, debido que en la mayoría de los países donde se encuentran implementadas, el monitoreo y reporte de emisiones se encuentra normado y el acceso a la información es público.
- **Costos de operación (OPEX):** el consultor cuenta con múltiples asesorías y evaluaciones realizadas a diversas plantas. Se utilizará información agregada, no obstante, la información particular de cada estudio y evaluación no será entregada por acuerdos de confidencialidad vigentes con terceras partes.
- **Costos de inversión (CAPEX):** el consultor cuenta con valores de inversión de otros proyectos que serán usados como valores referenciales.

→ *Tecnología cumple con todos los criterios de análisis de aplicación*

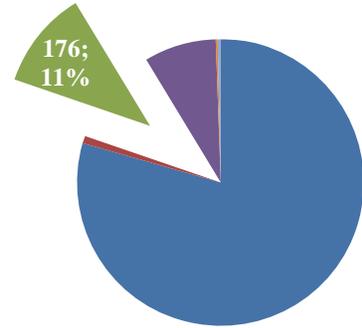
<sup>126</sup> Asesorías y evaluaciones realizadas por el grupo Pöyry a 5 plantas ubicadas en Norteamérica, Europa y Asia..

**5.1.1.3 Combustión de Lecho Fluidizado**

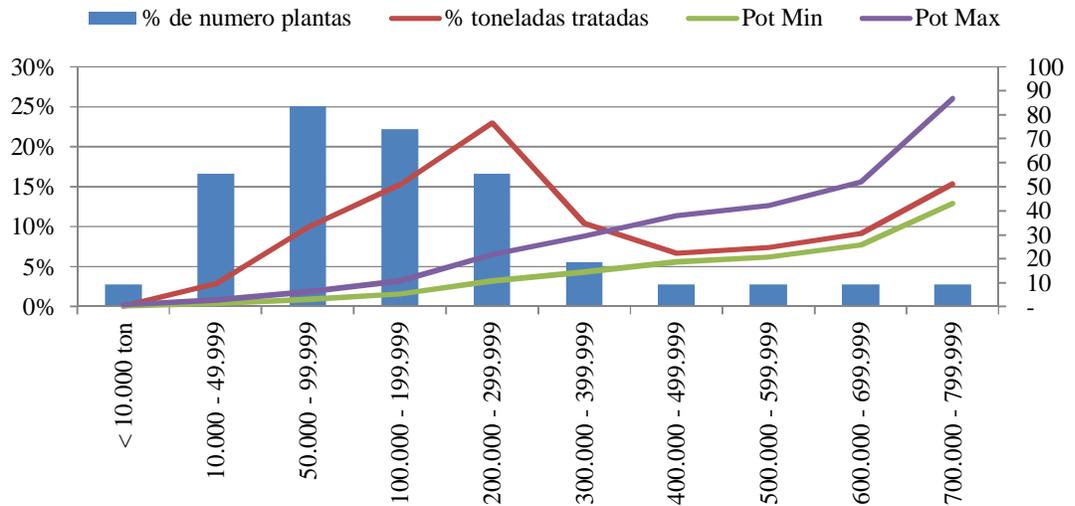
La tecnología de combustión de lecho fluidizado está presente en la industria hace años aunque su aplicación principal está ligada a la generación eléctrica con uso de carbón y más recientemente a biomasa.

La combustión de lecho fluidizado cuenta con un número significativo de plantas que utilizan RSD como combustible principal en operación (176).

Esta tecnología cuenta con una capacidad instalada en el mundo para tratar más de 6,6 millones de toneladas anuales de residuos (información al año 2017, Anexo F). En la Figura 5-6 se presenta una distribución del porcentaje de plantas y de toneladas totales tratadas por tamaño de plantas, así como el rango de potencia instalada.



**Figura 5-5: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada**



**Figura 5-6: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de lecho fluidizado.**

De las 176 plantas que operan actualmente, se destaca de la Figura 5-6 que la mayor cantidad de estas corresponde a capacidades entre 10.000 a 300.000 ton/año. La mayor cantidad de RSD tratados se encuentra en la línea de capacidad de 200.000 a 300.000 ton/año. La potencia nominal aumenta progresivamente a partir de la línea de capacidad mayor a 600.000 ton/año, aunque se tiene una escasa cantidad de plantas instaladas para generalizar.

En el desarrollo de este estudio no se han encontrado registros de fracasos en proyectos implementados con esta tecnología, por lo que se considera una tecnología madura y confiable.

Para la evaluación de esta tecnología se cuenta con información confiable de diversas fuentes<sup>127</sup>, en particular la información más relevante proviene de:

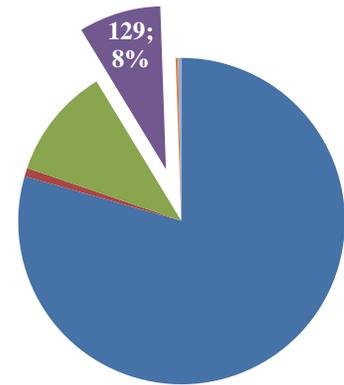
- **Registro de emisiones de las plantas en operación comercial:** se utilizarán los reportes públicos de emisiones, debido que en la mayoría de los países donde se encuentran implementadas, el monitoreo y reporte de emisiones se encuentra normado y el acceso a la información es público.
- **Costos de operación (OPEX):** el consultor cuenta con múltiples asesorías y evaluaciones realizadas a diversas plantas. Se utilizará información agregada, no obstante, la información particular de cada estudio y evaluación no será entregada por acuerdos de confidencialidad vigentes con terceras partes.
- **Costos de inversión (CAPEX):** el consultor cuenta con valores de inversión de otros proyectos y cuenta con tres ofertas no vinculantes de distintos proveedores de tecnología para una planta prototipo de cada tamaño propuesto en el presente estudio, con valores para Santiago.<sup>128</sup>

→ *Tecnología cumple con todos los criterios de análisis de aplicación*

#### 5.1.1.4 Gasificación convencional con turbina a vapor

Al igual que la combustión de lecho fluidizado la tecnología de gasificación convencional con utilización de caldera y turbina a vapor está presente en la industria hace años aunque su aplicación principal está ligada a la generación eléctrica con uso de carbón y más recientemente a biomasa.

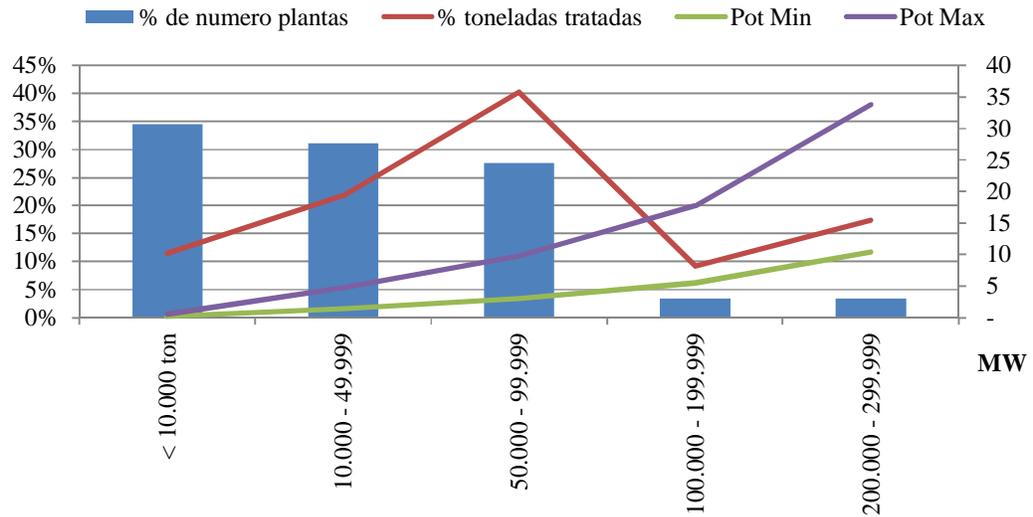
La gasificación convencional con turbina a gas cuenta con un número significativo de plantas que utilizan RSD como combustible principal en operación (129), sin embargo, se encuentran altamente concentradas en Japón (122) donde las condiciones del mercado de la disposición final de los residuos y la comercialización de la energía son muy particulares, principalmente debido a los altos costos de transporte y la escasa disponibilidad de sitios para emplazar rellenos sanitarios. Esta tecnología cuenta con una capacidad instalada en el mundo para tratar más de 2,9 millones de toneladas anuales de residuos. En la Figura 5-8 se presenta una distribución del porcentaje de plantas y de toneladas totales tratadas por tamaño de plantas, así como el rango de potencia instalada.



**Figura 5-7: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada**

<sup>127</sup> Asesorías y evaluaciones realizadas por el grupo Pöyry a más de 20 plantas ubicadas en Norteamérica, Europa y Asia.

<sup>128</sup> Información específica de cada una de las ofertas no será entregada por acuerdos de confidencialidad donde los oferentes permiten utilizar solo información parcial de sus ofertas.



**Figura 5-8: Porcentaje de número de plantas y toneladas tratadas por capacidad de tratamiento anual para tecnología de gasificación convencional con turbina a vapor.**

De la cantidad total de plantas instaladas para esta tecnología, se muestra en la Figura 5-8 que en su mayoría corresponden a proyectos de pequeña capacidad. Hay una alta dispersión en cuanto a potencia de generación debido a su baja madurez tecnológica actual.

Debido a sus relativos bajos costos de inversión y operación se han desarrollado varios proyectos en Europa, Estados Unidos y Australia. Sin embargo, solo 6 plantas fuera de Japón se encuentran en operación comercial, mientras que las otras han tenido diversos problemas durante sus etapas de implementación y operación. A continuación se presenta una selección de casos de experiencia con mayor información disponible:

- Hamm-Uentrop, Alemania: daño por corrosión al equipamiento y a la estructura del edificio, hasta el colapso del techo y la chimenea.
- Dargavel, Escocia: se encontró en operación desde 2009 al 2012 cuando le fue retirada la licencia ambiental debido al incumplimiento constante de las emisiones, incumplimiento de la generación eléctrica y por lo tanto incumplimiento con contratos de entrega de electricidad, y algunos eventos de incendio durante la operación.
- Green Bay, EE.UU.: el proyecto original no consideraba ningún tipo de chimenea, sin embargo, una vez ejecutado, el proyecto tenía una estructura de chimenea que excedía la altura máximas de la ciudad. El proyecto se terminó desistido en la corte.
- New Earth Solutions, Inglaterra: este proyecto consistente en seis plantas entre 8.000 a 100.000 toneladas anuales, presentaban un desempeño menor a lo proyectado en todas las plantas debido a costos de operación y mantenimiento por sobre lo proyectado. La empresa se declaró en quiebra en 2016.
- Karlsruhe, Alemania: esta planta presentó numerosos problemas incluyendo, baja disponibilidad (~20%), baja o nula producción de energía eléctrica, incumplimientos a la normativa ambiental en las emisiones atmosféricas y al

agua, sobre consumo de agua para los procesos, alta corrosión incluyendo el desprendimiento de elementos estructurales, causando peligro de derrumbe y explosión. Finalmente la planta fue cerrada en 2004 después de 5 años sin entrar en operación comercial. El propietario actual EnBW (Energía Baden-Württemberg) aún se encuentra en discusión el futuro de las instalaciones que en la actualidad se encuentran en desuso.

- Wollongong, Australia: durante tres años de comisionamiento y puesta en servicio, no pudieron cumplir la normativa ambiental de emisiones, excediendo hasta 13 veces los valores límites. El proyecto se quedó sin fondos en 2004.

Para la evaluación de esta tecnología se cuenta con información de diversas fuentes, con distintos niveles de confianza, en particular la información más relevante proviene de:

- **Emisiones de las plantas en operación comercial:** aunque existe información de las 6 plantas en operación en Europa, estas representan un segmento muy bajo de las plantas instaladas, pues no ha sido posible para el consultor obtener información confiable de las plantas instaladas en Japón.
- **Costos de operación (OPEX):** el consultor cuenta con información de operación de algunas plantas con esta tecnología. Se utilizarán valores reales pero no es posible indicar a qué planta corresponde cada dato debido a acuerdos de confidencialidad<sup>129</sup>, además, ésta información será complementada con la información de procesos comunes en base a otras tecnologías. Por ello, estos valores deben ser considerados solo como referenciales.
- **Costos de inversión (CAPEX):** el consultor cuenta con valores de inversión de otros proyectos y cuenta con dos ofertas no vinculantes de distintos proveedores de tecnología para una planta prototipo de cada tamaño propuesto en el presente estudio, con valores para Santiago.<sup>130</sup> Sin embargo, algunos de los casos de fracaso han estado relacionados a los sobrecostos durante la etapa de construcción, comisionamiento, puesta en servicio y operación.

→ *Tecnología no cumple con los criterios de análisis de aplicación, por lo que el consultor no puede considerarla como una tecnología madura y apta para su condición actual. Sin embargo, considerando su bajo costo de inversión, al menos siete de las quince plantas que se han instalado en Europa se encuentran en operación comercial. Por lo tanto, se considera que esta tecnología está al borde de madurez, y vale la pena evaluarla en el futuro cercano como una opción para su consideración en una licitación para una planta WTE en Santiago.*

<sup>129</sup> Se utilizará información agregada, información particular de cada estudio y la evaluación no será entregada por acuerdos de confidencialidad vigentes con terceras partes.

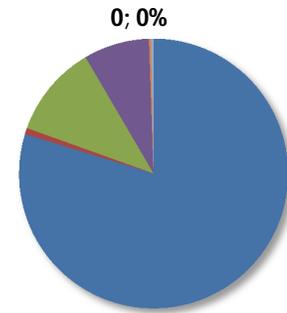
<sup>130</sup> Información específica de cada una de las ofertas no será entregada por acuerdos de confidencialidad donde los oferentes permiten utilizar solo información parcial de sus ofertas.

**5.1.1.5 Gasificación convencional con turbina a gas**

Aunque teóricamente la gasificación convencional de RSD para la generación de *syngas* y su posterior utilización en una turbina a gas o motor a gas es posible, en la actualidad no existe ninguna planta en operación comercial con esta tecnología para su uso con RSD.

Al no encontrarse evidencia de plantas en operación comercial la información disponible de emisiones, costos de operación y costos de implementación es solo de carácter teórico o de proyectos piloto.

→ *Esta tecnología no cumple con los criterios de madurez de tecnología requerida por el mandante.*

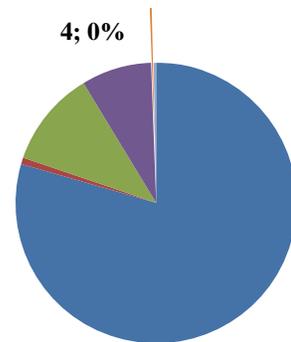


**Figura 5-9: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada**

**5.1.1.6 Gasificación con Plasma**

La gasificación por plasma o gasificación asistida por plasma es la tecnología más reciente en la recuperación energética. Por la alta temperatura del proceso de gasificación (5.000 a 15.000 °C) se garantiza la destrucción de casi todos los elementos nocivos presentes en los residuos.

La gasificación por plasma cuenta con un número reducido de plantas en operación comercial (4), sin embargo éstas se encuentran concentradas en Japón (3) y Corea del Sur (1), donde las condiciones del mercado de la disposición final de los residuos y la comercialización de la energía son muy particulares principalmente debido a los altos costos de transporte y la escasa disponibilidad de sitios para emplazar rellenos sanitarios.



**Figura 5-10: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada**

Se han desarrollado varios proyectos en Europa, Norte América, Australia y Asia, sin lograr entrar en operación comercial. Sólo 1 planta fuera de Japón se encuentra en operación comercial, mientras que las otras han tenido diversos problemas durante sus etapas de implementación y operación. A continuación se presenta una selección de casos de experiencia:

- Teesside, Inglaterra, Gasificación con Plasma: la empresa contaba con contrato para proveer electricidad por medio de dos plantas de gasificación – WTE, después de dos años de operación de la primera planta y el inicio de construcción de la segunda abandonaron el proyecto, por dificultades técnicas en el diseño y la operación. Actualmente se encuentra en construcción una nueva planta de combustión de parrilla.
- Ottawa, Canadá, Gasificación con Plasma: se encontró en operación desde 2008 al 2011, durante los cuales las emisiones estaban excediendo los límites. Durante estos años tuvieron variados problemas de operación con una disponibilidad de

un 25%, y durante los cuales sólo lograron un rendimiento del 27% de lo proyectado.

Para la evaluación de esta tecnología no se cuenta con información confiable del desempeño ambiental de las plantas en operación en Japón y Corea del Sur, mientras que las plantas instaladas en Inglaterra y Canadá nunca lograron los niveles de emisión y condiciones de operación en términos de costo, generación y disponibilidad esperados.

→ *Esta tecnología no cumple con los criterios de madurez de tecnología requerida por el mandante.*

### 5.1.1.7 Pirólisis

Al igual que la combustión de lecho fluidizado y la gasificación convencional, la pirólisis está presente en la industria hace varios años, pero para su uso en otros procesos y con materiales distintos a los RSD.

La pirólisis cuenta con un número reducido de plantas en operación comercial (5), sin embargo, se encuentran altamente concentradas en Japón donde las condiciones del mercado de la disposición final de los residuos y la comercialización de la energía son muy particulares, principalmente debido a los altos costos de transporte y la escasa disponibilidad de sitios para emplazar rellenos sanitarios.

Dentro de los casos que tuvieron problemas podemos mencionar:

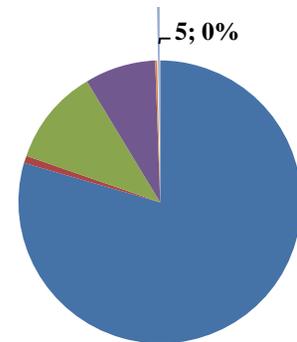
- Seamer Carr, Inglaterra, Pirólisis: esta planta fue construida, pero nunca terminó su proceso de comisionamiento y puesta en servicio.

Para la evaluación de esta tecnología no se cuenta con información confiable del desempeño ambiental de las plantas en operación en Japón, mientras que las plantas instaladas en Inglaterra y Canadá nunca lograron los niveles de emisión y condiciones de operación en términos de costo, generación y disponibilidad esperados. Por lo tanto, no están incluidos en la planilla de plantas operativas.

→ *Esta tecnología no cumple con los criterios de madurez de tecnología requerida por el mandante.*

### 5.1.1.8 Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica se encuentra presente desde el siglo IX, y en el siglo XX ya en uso industrial. Aunque es difícil obtener el número total de plantas de digestión destinadas solo a RSD, sólo en Europa existen más de 244 plantas en operación con RSD, y muchas otras destinadas a otros tipos de residuos orgánicos e instalaciones pequeñas no consideradas plantas por su tamaño.



**Figura 5-11: Número de plantas instaladas y porcentaje de participación de tecnología evaluada**

Aunque a nivel internacional esta tecnología es considerada una tecnología de disposición y no de recuperación energética, por su bajo factor de recuperación de energía (directiva europea 2008/98/EC establece que las operaciones con factor de recuperación R1 superior a 60% son operaciones de recuperación energética<sup>131</sup>, mientras que las inferiores<sup>132</sup> solo son operaciones de manejo y disposición de residuos), es muy utilizada de forma complementaria a las tecnologías WTE en sistemas de gestión integrada de residuos para el tratamiento de la fracción orgánica.

→ *Tecnología cumple con todos los criterios de análisis de aplicación.*

---

<sup>131</sup> Waste Framework Directive 2008/98/EC R1 Annex II

<sup>132</sup> Waste Framework Directive 2008/98/EC D10, Annex I

### 5.1.2 Análisis de Combustibles

En esta tabla se presentan los requerimientos generales de los residuos para su utilización en las distintas tecnologías, el nivel de éxito de la aplicación de la tecnología con los RSD sin pre-tratar, y con pre-tratamiento, y finalmente su idoneidad para el tratamiento de los RSD de la Región Metropolitana. Según se observa en la Tabla 5-1, las tecnologías de gasificación y pirólisis son raramente utilizadas para tratar RSD.

**Tabla 5-1: Los requerimientos para las distintas tecnologías**

Descripción	RSD RM	Combustión			Gasificación		Otros		
		Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma	Pirólisis	DA
					Turb. Vapor	Turb. a Gas			
Tamaño máximo [mm]	~1.000	50 a 500	50 a 500	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	50
Poder calorífico típico [MJ/kg]	~ 10	8 – 11	8 – 10	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF]	8 – 20 [RDF]	N/A
Pre-tratamiento requerido		SM (< 500 mm)	SM (< 500 mm)	TR	TR – CA				
Pre-tratamiento opcional		SM – TR	SM – TR	CA – CM	CM	CM	CM	CM	CM – Ter – QM – B
<b>Resumen aplicación exitosa en RSD</b>									
Sin pre-tratamiento		++	-	--	--	--	--	--	-
Con pre-tratamiento		++	+	+	--	--	--	--	++
		<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>	N/A	N/A	N/A	N/A	<b>Cumple</b>

SM: Separación mecánica de elementos grandes  
 TR: Trituración  
 CA: Clasificación Automática  
 CM: Clasificación Manual  
 Ter: Pre-tratamiento Térmico  
 QM: Pre-tratamiento Químico  
 B: Pre-tratamiento Biológico

++: Utilizado ampliamente  
 +: Se utiliza  
 -: Normalmente no se utiliza  
 --: Rara vez utilizado

### 5.1.3 Análisis cumplimiento ambiental

#### 5.1.3.1 Cumplimiento emisiones de gases

Para la evaluación de cumplimiento de emisiones atmosféricas se utilizará el menor valor entre la normativa chilena, europea y el Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana, este valor para objeto de este documento será llamado “Valor Objetivo”.

Parámetro <sup>(1)</sup>		DS. 29	EU	P.D. RM	Normativa a utilizar	Valor Objetivo
Material Particulado	MP	30,0	10,0	20	EU	<b>10,0</b>
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	50,0	50,0	15 a 22 <sup>(2)</sup>	EU	<b>15 a 22</b>
Óxidos de Nitrógeno	NO <sub>x</sub>	300,0	200,0	122	P.D. RM	<b>122,0</b>
Carbono Orgánico Total	COT	20,0	10,0	N/A	EU	<b>10,0</b>
Monóxido de Carbono	CO	50,0	N/A	114	NCh	<b>50</b>
Cadmio y sus compuestos (como metal)	Cd	0,1	0,05	N/A	EU	<b>0,05</b>
Mercurio y sus compuestos (como metal)	Hg	0,1	0,05	N/A	EU	<b>0,05</b>
Berilio y sus compuestos (como metal)	Be	0,1	N/A	N/A	NCh	<b>0,1</b>
Plomo + Zinc y sus compuestos (como metal) suma total	Pb + Zn	1,0	0,5 <sup>(3)</sup>	N/A	EU	<b>0,5<sup>(3)</sup></b>
Arsénico + Cobalto + Níquel + Selenio + Telurio y sus compuestos, suma total.	As + Co + Ni + Se + Te	1,0		N/A	EU	
Antimonio + Cromo + Manganeso + Vanadio, suma total.	Sb + Cr + Mn + V	5,0		N/A	EU	
Compuestos inorgánicos clorados gaseosos indicados como ácido clorhídrico	HCl	20,0	10,0	N/A	EU	<b>10,0</b>
Compuestos inorgánicos fluorados gaseosos indicados como ácido fluorhídrico	HF	2,0	1,0	N/A	EU	<b>1,0</b>
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	5,0	N/A	N/A	NCh	<b>5,0</b>
Dioxinas y furanos	TEQ	0,2	0,1	N/A	EU	<b>0,1</b>

Nota 1: unidades en mg/Nm<sup>3</sup> con excepción de Dioxinas y furanos que están en ng/Nm<sup>3</sup>.

Nota 2: norma en ng/J, conversión depende de Nm<sup>3</sup> de gas por tonelada de RSD según tecnología (4.500 a 6.500 Nm<sup>3</sup>/ton)

Nota 3: no incluye Zinc, Selenio, ni Telurio.

La comparación de emisiones se realizará en función de las emisiones medias de las tecnologías comparando la concentración de cada parámetro respecto al valor objetivo antes definido. Es decir, si la concentración de material particulado en la combustión de parrilla es de 1,6 mg/Nm<sup>3</sup>, y el valor objetivo es de 10 mg/Nm<sup>3</sup>, será evaluado como 16% de emisión. Para la comparación entre tecnologías se utilizará el promedio de los porcentajes de emisión.

Parámetro		Combustión			Otras
		Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	DA <sup>(3)</sup>
MP	<b>10,0</b>	1,6 (16%)	1,43 (14%)	1,05 (11%)	
SO <sub>2</sub>	<b>15 a 22</b>	11,5 (77%)	22,5 (150%)	15,0 (68%)	1,0 – 509 <sup>(2)</sup>
NO <sub>x</sub>	<b>122,0</b>	83,0 (68%)	135 (111%)	95 (78%)	2,9 – 147 <sup>(2)</sup>
COT	<b>10,0</b>	0,51 (5%)	1,05 (11%)	2,15 (22%)	
CO	<b>50</b>	19,4 (39%)	11,5 (23%)	24,3 (49%)	35,6 – 151,9 <sup>(2)</sup>
Cd	<b>0,05</b>	0,0033 (7%)	S/I	0,0025 (5%)	
Hg	<b>0,05</b>	0,025 (50%)	S/I	S/I	
Be	<b>0,1</b>	S/I	S/I	S/I	
Pb + As + Co + Ni + Sb + Cr + Mn + V	<b>0,5<sup>(2)</sup></b>	0,0035 (1%)	S/I	0,075 (15%)	
HCl	<b>10,0</b>	3,29 (33%)	4,0 (40%)	6,5 (65%)	
HF	<b>1,0</b>	< 0,01 (<1%)	S/I	S/I	
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	<b>5,0</b>	( <sup>1)</sup> )	S/I	( <sup>1)</sup> )	
TEQ	<b>0,1</b>	< 0,02 (<20%)	S/I	< 0,01 (10%)	
% de cumplimiento		29%	58%	36%	N/A
Puntuación		<b>23.6</b>	<b>8.6</b>	<b>20</b>	

Nota 1: Bajo límite de detección

Nota 2: Considerando generación con motor de gas con abatimiento del 99% de los gases

Nota 3: La digestión anaeróbica por el tipo de proceso, se encuentra sometida a una legislación diferente al resto de las tecnologías de WTE.

### 5.1.3.2 Cumplimiento de normativa para ceniza de fondo

En la Tabla 5-2 se muestran los valores de descarga de ceniza de fondo para las principales tecnologías establecidas en el mundo. Debido a la disponibilidad de información, la tecnología de gasificación se compara con el valor objetivo del test de lixiviación. Se destaca que no hay incumplimiento de normativa por parte de las tecnologías involucradas.

**Tabla 5-2: Comparación entre valor objetivo de residuos peligrosos en toma de muestras y test de lixiviación, con respecto a descarga de ceniza de fondo para principales tecnologías WTE (Elaboración propia)**

Sustancia	Valor objetivo seco	Parrilla <sup>133</sup>	Lecho fluidizado <sup>134</sup>	Valor objetivo Lixiviación	Gasifica. <sup>135</sup>
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/l]	[mg/l]
Arsénico	<b>50</b>	0,00032	9,8	<b>2,5</b>	<0,001
Cromo	<b>100</b>	0,0118	32,2	<b>5</b>	<0,02
Mercurio	<b>4</b>	S.I.	<0,03	<b>0,2</b>	<0,0005
Plomo	<b>100</b>	0,221	7,5	<b>5</b>	<0,005
Selenio	<b>14</b>	0,00201	S.I.	<b>0,7</b>	<0,001
Bario	<b>600</b>	1,43	240	<b>30</b>	S.I.
Benceno	<b>10</b>	S.I.	S.I.	<b>0,5</b>	S.I.
Cadmio	<b>10</b>	S.I.	<0,3	<b>0,5</b>	<0,001
Clorhidratos	<b>50.000</b>	908	S.I.	<b>2.500</b>	S.I.
Fluorhídricos	<b>1.000</b>	S.I.	S.I.	<b>50</b>	S.I.
Cobre	<b>200</b>	0,00633	22,7	<b>10</b>	S.I.
Sulfatos	<b>100.000</b>	S.I.	S.I.	<b>5.000</b>	S.I.
Antimonio	<b>10</b>	0,026	S.I.	<b>0,5</b>	S.I.
Molibdeno	<b>60</b>	0,000974	<1	<b>3</b>	S.I.
Níquel	<b>80</b>	S.I.	18,5	<b>4</b>	S.I.
Zinc	<b>400</b>	0,0294	73,5	<b>20</b>	S.I.
Sólidos Totales Disueltos	NA	S.I.	S.I.	<b>10.000</b>	S.I.
Carbón Orgánico Total	<b>2.000</b>	10,3	S.I.	<b>100</b>	S.I.

### 5.1.3.3 Cumplimiento de normativa para ceniza volante

En este caso se muestran los test de lixiviación, de ceniza volante, para tecnologías de parrilla, lecho fluidizado y gasificación. Además, se muestra el rango de valores que

<sup>133</sup> University of Rome, 2015, *LCA of management strategies for RDF incineration and gasification bottom ash based on experimental leaching data.*

<sup>134</sup> University of Oulu, 2006, *Sequential leaching of heavy metals and sulfur in bottom ash and fly ash the co-combustion of materials at a municipal district heating plant, Finland.*

<sup>135</sup> Nippon Steel Engineering Co, 2012, *Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system.*

define el BAT (del inglés *Best Available Technology*) en el caso de plantas de incineración por parrilla.

**Tabla 5-3: Comparación entre valor objetivo de residuos peligrosos en Test de lixiviación, con respecto a descarga de ceniza volante para principales tecnologías WTE (Elaboración propia)**

Sustancia	Valor Objetivo Lixiviación	Parrilla <sup>136</sup>	Lecho Fluidizado <sup>137</sup>	Gasificación convencional <sup>135, 138</sup>		BAT <sup>139</sup>
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Arsénico	2,5	0,009	<0,001	<0,001	0,09	0,01-0,05
Cromo	5	0,35	<0,004	<0,02	0	0,05-0,03
Mercurio	0,2	0,012	<0,00005	<0,0005	S.I.	0,001-0,01
Plomo	5	9,18	2,83	<0,005	0	0,02-0,08
Selenio(Se)	0,7	S.I.	<0,001	<0,001	S.I.	S.I.
Bario (Ba)	30	0,32	S.I.	S.I.	0	S.I.
Benceno	0,5	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
Cadmio (Cd)	0,5	0,81	<0,001	<0,001	0	0,005-0,03
Clorhidratos	2500	S.I.	953	S.I.	S.I.	S.I.
Fluorhídricos	50	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
Cu	10	0,48	<0,1	S.I.	0	0,03-0,15
Sulfatos	5000	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
Antimonio (Sb)	0,5	S.I.	S.I.	S.I.	0,1	S.I.
Molibdeno	3	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.
Níquel	4	0,016	S.I.	S.I.	0,388	0,03-0,15
Zinc	20	4,02	0,5	S.I.	0,011	0,01-0,5
Sólidos Totales Disueltos	10000	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	10,0-30,0
Carbón Orgánico Total	100	S.I.	S.I.	S.I.	S.I.	15,0-40,0

En la Tabla 5-3 se muestra que los residuos de ceniza volante de la combustión de parrilla serían catalogados como peligrosos, debido a que se superan los niveles de plomo según la normativa europea y chilena, y el cadmio según norma europea. Sin embargo, estos datos muestran resultados discretos de plantas puntuales. En general, las cenizas volantes en todas las tecnologías son consideradas un residuo peligroso que debe ser sometido a ensayo caso a caso.

<sup>136</sup> Ying Xu, Yu Chen, 2015, *Leaching heavy metals in municipal solid waste incinerator fly ash with chelator/biosurfactant mixed solution.*

<sup>137</sup> Kyoto University, 1999, *Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes.*

<sup>138</sup> Universidad de Castilla, 2005, *Production of lightweight aggregates from coal gasification fly ash and slag.*

<sup>139</sup> Joint Research Centre, 2017, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration, UE.*

#### 5.1.3.4 Cumplimiento de RILes

Las plantas modernas con sistemas de tratamiento de gases de combustión secos o semi secos, cuentan con sistemas de tratamiento dentro de la planta y reutilizan las aguas en el proceso, por lo que las únicas emisiones corresponden a las aguas de consumo humano que se descargan al sistema de aguas servidas. Por lo tanto, no hay emisiones industriales líquidas emitidas por la planta, disminuyendo la posibilidad de impacto aguas debajo del proyecto. En consecuencia, no se ha evaluado el cumplimiento de RILes, ya que no hay RILes por evaluar.

#### 5.1.3.5 Resumen

Según el análisis de impacto ambiental para las diferentes tecnologías, y con los criterios definidos anteriormente, se obtienen los puntajes que se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 5-4: Puntaje de impacto ambiental para diferentes tecnologías.**

Criterios	Combustión			Gasificación		Pirólisis	DA
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional			
				Turbina a Vapor	Turbina a Gas		
<b>Puntaje</b>	<b>18.5</b>	<b>6.8</b>	<b>15.7</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>15</b>

#### 5.1.4 Disponibilidad

Este análisis tiene por objetivo determinar la disponibilidad media de cada tipo de tecnología, en función de la cantidad de paradas de mantenimiento programadas requeridas, duración media de las paradas de mantenimiento anual, horas anuales de disponibilidad informada por los fabricantes, y las horas anuales de operación de diferentes plantas en operación<sup>140</sup>. Así, la fórmula utilizada para el cálculo de la disponibilidad es:

$$Disponibilidad(AF) = \frac{Horas\ disponible\ (AH)}{Horas\ totales\ (PH)} \times 100^{141}$$

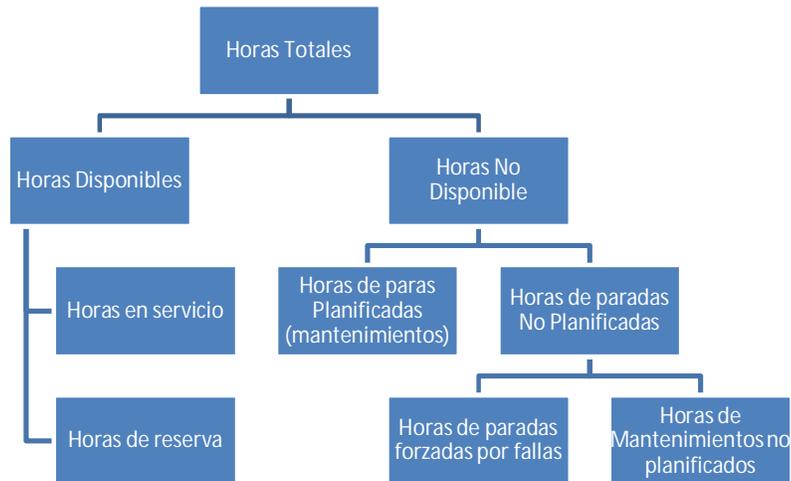
Dónde:

- Horas totales PH: (*Period Hours*) es el número de horas totales en el periodo de estudio, en este caso de un año calendario.
- Horas disponibles AH: (*Available Hours*) es el número de horas en que la planta se encuentra disponible para generar energía.

<sup>140</sup> Ofertas técnicas presentadas por proveedores en procesos de licitaciones de plantas WTE, informes anuales de operación de propietarios

<sup>141</sup> Traducción del estándar de la sociedad de ingenieros eléctricos de potencia, IEEE, Definiciones usadas para reportar la confiabilidad, disponibilidad y producción de unidades generadoras eléctricas, IEEE Std. 726-2006, Capítulo 8.6 Factor de disponibilidad.

- Estado disponible: (*Available*) es cuando la planta se encuentra con la capacidad de comenzar a generar energía, independiente de cuánta energía puede generar o de la que está entregando en ese momento.



**Figura 5-12: Designación de horas<sup>142</sup>**

**Tabla 5-5: Horas anuales de disponibilidad por tecnología.**

	Combustión			Gasifica. Conven. Turbina. a Vapor	DA
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.		
Horas de operación comprometidas por fabricantes	7.500 a 8.000	7.500 a 8.000	7.500 a 8.000	7.500 a 8.000	~ 8.500
Horas de operación informadas	7.500 a 8.200	7.500 a 8.200	7.500 a 8.200	S/I	7.500 a 8.600
Disponibilidad porcentual	91%	91%	91%	91%	97%
<b>Puntaje</b>	<b>4,7</b>	<b>4,7</b>	<b>4,7</b>	<b>4,7</b>	<b>5</b>

Debido a que los procesos de licitación obligan en general a contar con una determinada cantidad de horas de servicio al año de acuerdo a la BAT (~8000 horas), los distintos operadores tienden a programar sus mantenimientos y exigir en sus propios procesos de licitación de suministros de equipos disponibilidades que les permitan cumplir con estos requerimientos, con la excepción de la DA, la que por su número reducido de equipos y relativa simplicidad técnica tiene menores fallas y mantenimientos de menor duración, lo que resulta en una mayor disponibilidad.

<sup>142</sup> Traducción del estándar de la sociedad de ingenieros eléctricos de potencia, IEEE, Definiciones usadas para reportar la confiabilidad, disponibilidad y producción de unidades generadoras eléctricas, IEEE Std. 726-2006, Capítulo 6, figura 3

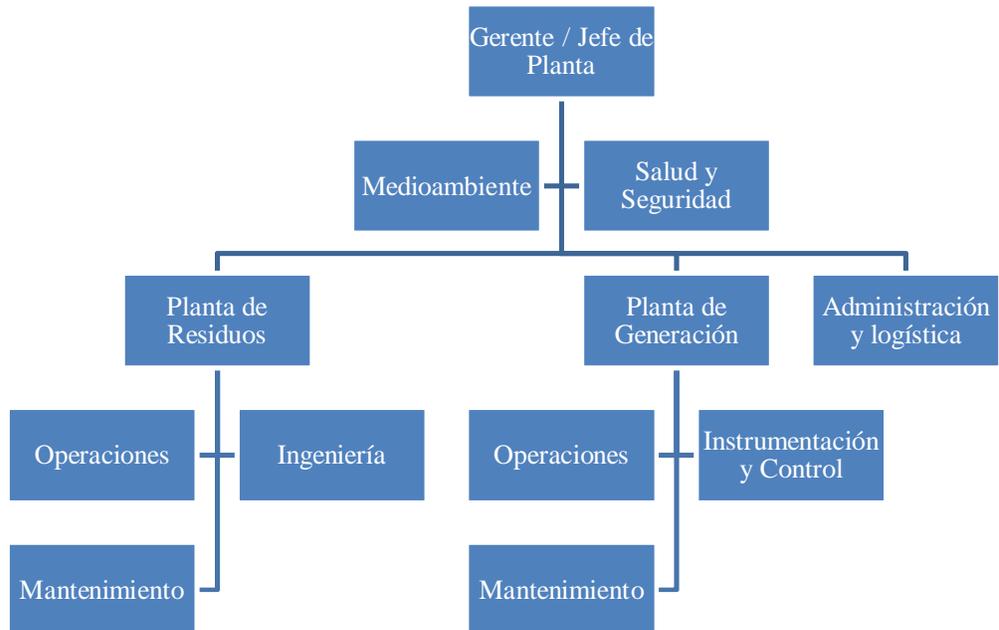
**5.1.5 Costo Operacional OPEX**

Este análisis tiene por objetivo comparar los costos e ingresos propios para el funcionamiento de cada tecnología, excluyendo los costos financieros y de administración que dependen del modelo de negocio a implementar y no de la tecnología.

Para la comparación se eligió una planta tipo con una capacidad total de 330.000 toneladas anuales de RSD en cada tecnología, que representa el tamaño típico de una línea grande de tratamiento (ver capítulo 3.3.5). La configuración de cada planta es diferente en términos de capacidad y número de líneas de procesos para cada tecnología, pero con una capacidad total similar.

**5.1.5.1 Personal**

Se ha considerado una estructura tipo para el personal de operación y mantenimiento de la planta:



**Figura 5-13: Organigramma típico de operadores en una planta WTE**

Las dotaciones y requerimientos del personal para cada cargo varían según la demanda de cada tecnología. La dotación de personal entre las tecnologías WTE es bastante similar mientras que una planta de digestión anaeróbica requiere muchos menos recursos humanos para su operación y mantenimiento.

**Tabla 5-6: Dotación de personal entre las tecnologías**

Elemento	Combustión			Gasificación Convencional Turbina a Vapor	D.A.
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluidizado		
Gerente de Planta	1	1	1	1	1
Planta de Residuos					
- Operaciones	8	12	8 <sup>(1)</sup>	8	3
- Ingeniería	1	1	1 <sup>(1)</sup>	1	
- Salud y Seguridad	1	1	1	1	
- Mantenimiento	10	12	12 <sup>(1)</sup>	12	
Planta de generación					3
- Medioambiente	1	1	1	1	
- Operaciones	4	8	4	4	
- Mantenimiento	4	12	4 <sup>(1)</sup>	4	
- Sistema de control e instrumentación	1	1	1	1	
Administración					
- Asistente	1	1	1	1	
- Recursos Humanos	1	1	1	1	
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>51</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>7</b>

Nota 1: Se considera profesionales con un mayor nivel de estudios y experiencia para esta tecnología.

El detalle del análisis del personal se encuentra en el Anexo I.

### 5.1.5.2 Mantenimiento

El mantenimiento se divide en mantenimiento rutinario y mayor (en inglés *overhauls*). Además, se han considerado costos por los consumibles de procesos como tratamiento de gases de combustión, combustible de arranque del proceso, etc. Estos valores se han calculado con porcentajes típicos del CAPEX.

### 5.1.5.3 Otros costos

Dentro de los costos de operación se consideran:

- Los consumos eléctricos de servicios auxiliares, que se obtienen descontándolos de la energía eléctrica generada a fin de obtener sólo la energía eléctrica disponible para comercialización.
- La disposición final de los residuos sólidos de cada tecnología aplicando los precios actuales de relleno sanitario y rellenos de seguridad en la RM.
- Los insumos, considerando materiales y consumibles.

#### 5.1.5.4 Resumen

Los puntajes obtenidos, para diferentes tecnologías según costos de operación y mantenimiento, se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 5-7: Puntaje por tecnología de costos de operación y mantenimiento**

Criterios	Combustión			Gasificación			Pirólisis	DA
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
				Turbina a Vapor	Turbina a Gas			
<b>Puntaje</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>28.2</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>30</b>

Para esta evaluación se han comparado los costos de las tecnologías excluyendo la DA, debido a que son significativamente menores. Por lo mismo, la DA ha sido evaluada con el 100% del puntaje, al igual que la mejor de las otras tecnologías.

#### 5.1.6 Costo de Inversión CAPEX

Este análisis tiene por objetivo constatar los costos de implementación de una planta de cada tecnología en la Región Metropolitana, excluyendo los costos financieros y de desarrollo que dependen del modelo de negocio a implementar y no de la tecnología.

En estos costos se incluirán los costos de inversión en la planta, infraestructura dentro de la planta (líneas de transmisión, caminos, líneas de calor/frío, y otros necesarios para la conexión en una ubicación ideal donde la infraestructura requerida está anexa a la planta), otros equipos adicionales, y la compra de los terrenos (en términos referenciales).

**Tabla 5-8: Inversión de capital CAPEX**

	Combustión			Gasificación Convencional Turbina a Vapor	D.A.
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluidizado		
Tipología de planta	1 línea mayor tamaño 330.000 ton/año	3 líneas mayor tamaño 300.000 ton/año	1 línea mayor tamaño 300.000 ton/año	3 líneas mayor tamaño 330.000 ton/año	3 líneas mayor tamaño 300.000 ton/año
Costo de Inversión [MMUSD]	180	800	250	130	15
Inversión por tonelada [USD/ton]	545	2.667	833		50
<b>Puntaje</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>14.2</b>	<b>N/A</b>	<b>30</b>

### 5.1.7 Vida Útil

Este criterio tiene por objetivo presentar la vida útil media esperada de cada tecnología, así como los mantenimientos menores y mayores de componentes principales, teniendo en consideración que por la juventud de muchas de éstas no es un valor empírico, ya que en general, ninguna de las plantas WTE ha alcanzado el término de su vida útil por razones técnicas.

**Tabla 5-9: Vida útil aproximada de los componentes principales por tecnología**

Elemento	Combustión			Gasificación Convencional o Turbina a Vapor	D.A.
	Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.		
Grúa	12	12	15	15	10
Parrilla / Horno	40	40			
LF - Gasificador			45	45	
Caldera	45	45	45	45	
Sistema de Manejo de cenizas	40	40	40	40	
Precipitador electrostático	40	40	40	40	
Filtros de bolsa	40	40	40	40	
Sistemas de eliminación SO <sub>2</sub> /HCl/Hg	40	40	40	40	
Ventilador	40	40	40	40	
Turbina	40	40	40	40	
Generador	40	40	40	40	20
Motor					20
Transformador	20	20	20	20	20
Instrumentación & Control	15	15	15	15	15
Vida útil media [años]	34	34	35	35	17
<b>Puntaje</b>	<b>4.8</b>	<b>4.8</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0.5</b>

### 5.1.8 Elaboración de un Costo por tonelada tratada preliminar

El costo por tonelada tratada, CTT, expresado en USD/ton fue calculado en base a una proyección lineal de los costos de operación y mantenimiento y de inversión a través de 20 años y dividido por la capacidad anual de la planta, traído a valor presente. De esta forma, podemos observar que el CTT mayor lo presenta la tecnología de horno rotatorio, mientras que la combustión por parrilla presenta el menor valor. Estos valores son aproximados y sólo a nivel referencial para expresar el potencial CTT en base a la operación e inversión de cada tecnología.

### 5.1.9 Resumen

A continuación se presenta un resumen del análisis de todos los criterios de evaluación, incluyendo una estimación del *CTT* en USD/ton para cada tecnología.

**Tabla 5-10: Resumen aplicación de criterios de evaluación de tecnologías**

	Criterios	Combustión			Gasificación			Pirólisis	DA
		Parrilla	Horno Rotatorio	Lecho Fluid.	Convencional		Plasma		
					Turbina a Vapor	Turbina a Gas			
Excluyentes	<b>Análisis de la Aplicación</b>	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	No pasa	No pasa	No pasa	Pasa
	<b>Análisis de Combustible</b>	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa	N/A	N/A	N/A	Pasa
Ponderados	<b>Cumplimiento Ambiental</b>	23,6	8,6	20	30	N/A	N/A	N/A	15
	<b>Disponibilidad</b>	4,7	4,7	4,7	4,7	N/A	N/A	N/A	5
	<b>Costos Operacionales (ingresos en negativo)</b>	21,1	0	17	30	N/A	N/A	N/A	30
	<b>Costos de Inversiones</b>	27,8	0	24,1	30	N/A	N/A	N/A	30
	<b>Vida Útil</b>	4,8	4,8	5	5	N/A	N/A	N/A	0,5
	<b>Total</b>	82	18,1	70,8	99,7	0	0	0	80,5
	<b>Ranking</b>		2	5	4	1			

De esto, es posible observar que la tecnología de combustión de parrilla es la mejor posicionada, lo que va en línea con las últimas plantas en construcción en sitios con condiciones similares a la RM, tales como en Singapur y Estambul, además de la recientemente adjudicada y próxima a construir en la Ciudad de México. El puntaje para la tecnología de DA es referencial y no es considerado en la comparación de tecnologías WTE, dado que se ha definido como tecnología secundaria en el alcance de este estudio. Por lo tanto, se desarrollará el análisis de factibilidad en base de la tecnología de combustión de parrilla. En una condición futura de mediano plazo, donde la gasificación convencional con turbina a vapor ya haya logrado su madurez, la evaluación cambiaría, debido a la mejor eficiencia de combustión de la gasificación, que requiere menos aire, lo que genera menos gases de combustión y por lo tanto todos los equipos relacionados a la recuperación energética y tratamiento de gases serían de menor tamaño, implicando un menor costo de inversión. Esta evaluación futura se puede visualizar en el Anexo H.

Adicionalmente, a modo de control de plausibilidad, se ha aplicado la metodología de evaluación sugerida en la Guía para Países en Vías de Desarrollo de GIZ<sup>143</sup>, la cual busca ayudar a los tomadores de decisión a obtener una primera idea de la idoneidad de la implementación de potenciales tecnologías WTE en un contexto específico y los aspectos importantes a considerar.

En la Tabla 5-11 se observan los resultados de la aplicación de la metodología. Se aprecia que las tecnologías de combustión en general se consideran aplicables, puesto que para algunos de los criterios se requiere más información y/o se pueden necesitar mejoras a las condiciones locales para tener éxito en la implementación de un proyecto WTE. El análisis completo se encuentra disponible en el Anexo J.

**Tabla 5-11: Resumen de aplicación de criterios GIZ**

	Combustión	Digestión Anaeróbica	Relleno Sanitario, con utilización de gas	Pirólisis y Gasificación
Nivel general de manejo de residuos	Yellow	Red	Green	Red
Composición de residuos	Green	Green	Green	Yellow
Poder calorífico de los RSD para procesos térmicos	Green	Green	Green	Green
Cantidades adecuadas de residuos para WTE	Green	Green	Green	Yellow
Operación eficiente de instalaciones de residuos	Yellow	Yellow	Green	Yellow
Transporte adicional para los residuos	Green	Green	Green	Yellow
Mercado y/o disposición final de residuos de proceso	Diagonal	Diagonal	Green	Yellow
Marco legal y requisitos ambientales para WtE	Diagonal	Yellow	Diagonal	Diagonal
Financiamiento	Yellow	Yellow	Yellow	Red
Acceso a moneda extranjera	Green	Green	Green	Yellow
Acceso a usuarios de energía final	Diagonal	Green	Green	Yellow
Incentivos de emisiones bajas en carbono	Green	Green	Green	Yellow
<b>PUNTAJE</b>	<b>6-8</b>	<b>N. R<sup>144</sup></b>	<b>10-11</b>	<b>N. R<sup>144</sup></b>

<sup>143</sup> Waste to Energy Options in MSW Management, A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

<sup>144</sup> N.R.: Tecnología No Recomendada.

Dónde:

	Es una tecnología que parece aplicable
	Tecnología parece aplicable, pero algunas condiciones aún son desfavorables para su implementación
	Existen severas deficiencias para la implementación de esta tecnología
N. R.	Tecnología No Recomendada bajo las condiciones actuales

Para el caso particular de la RM, según los criterios sugeridos por GIZ, sería recomendable realizar gestiones conducentes a mejorar las condiciones de mercado y disposición final de los residuos, así como la gestión del acceso de los usuarios de calor y vapor.

Para el caso de las tecnologías de gasificación, considerando su punto de desarrollo actual, en un eventual proceso de licitación para la implementación de una planta WTE en la RM no es aconsejable descartar esta tecnología, sin embargo, se deben considerar los requisitos de experiencia de plantas en operación y su nivel de madurez tecnológica al momento de la evaluación.

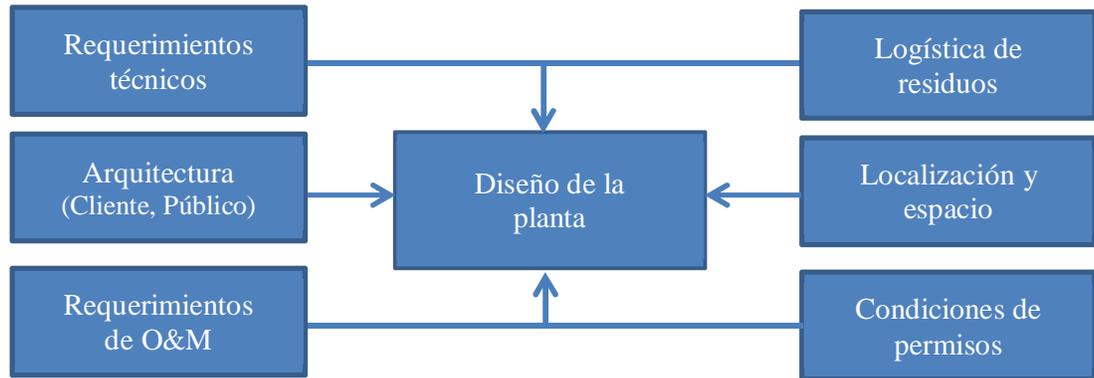
## 5.2 Factibilidad técnico-económica de alternativas en RM

En esta sección se describe en mayor detalle la solución seleccionada para la planta WTE en la RM en base de la tecnología mejor evaluada en el capítulo anterior. Además, se presentan las estimaciones de los costos de inversión y de operación para su posterior incorporación en el modelo financiero. Al final se describe el proceso de implementación de un proyecto con sus fases de desarrollo y la duración de cada etapa.

### 5.2.1 Diseño preliminar de la planta

En el desarrollo de una planta WTE se deben considerar múltiples parámetros y aspectos que definen el arreglo general y el rendimiento del proyecto. En la Figura 5-14 se pueden observar los parámetros principales. En el alcance de este estudio se pueden definir algunos de estos parámetros. Sin embargo, por estar en una fase temprana de desarrollo del proyecto, varios aspectos quedarán por definir. El objetivo en esta sección será determinar un diseño típico más genérico que permita efectuar una evaluación técnica-económica con la cual se puedan obtener valores financieros dentro de un rango +/- del 20% de variación<sup>145</sup>.

<sup>145</sup> U.S Department of Energy, 2011, *Cost estimating guide*.



**Figura 5-14: Aspectos principales para el diseño de una planta WTE (Elaboración propia)**

De acuerdo a la evaluación obtenida en la sección anterior, se diseñará una planta en base a la tecnología de combustión de parrilla. Se han definido las especificaciones técnicas o características principales, con las cuales se ha elaborado un diseño preliminar que sirve como base para la evaluación financiera (CAPEX y OPEX).

***Dimensionamiento***

Debido al gran número de variables que intervienen en el dimensionamiento de una planta WTE, esto debe ser analizado y optimizado caso a caso.

Para el dimensionamiento de la planta tipo que será considerada en la evaluación de factibilidad en la RM, se han considerado los siguientes elementos principales:

- Grandes ciudades han licitado para la construcción de grandes plantas WTE de 1.000.000 de toneladas anuales o más, en arreglos de tres o más líneas de 333.000 – 350.000 toneladas anuales, convirtiendo este tamaño en una línea estándar en la industria.
- Pequeñas ciudades han licitado para construcción de 50.000 a 350.000 toneladas anuales, considerando el máximo tamaño de acuerdo con su producción de residuos local, optimizando los costos de transporte en desmedro de las economías de escala.
- El menor tamaño de una línea tiene su origen en las plantas en Europa, dado que la capacidad de 150.000 toneladas anuales representa regiones o ciudades de 350.000 hasta 400.000 habitantes, un tamaño típico en Europa donde las distancias entre los centros de generación de RSD y la planta, económicamente justificaron el proyecto.

Con lo anterior, es posible inferir que un tamaño razonable para la implementación de una primera planta en la RM se encontraría en el rango implementado en grandes ciudades 1.000.000 toneladas anuales en tres líneas de 330.000 toneladas anuales cada una. Sin embargo considerando que sería la primera experiencia en un proyecto de este tipo en Chile, a juicio del consultor, es recomendable considerar un proyecto de menor tamaño. De esta forma, se ha considerado un proyecto de 330.000 toneladas anuales en una sola línea. Esto, para considerar las economías del mayor tamaño de las líneas estándar de los proveedores de estas tecnologías, sacrificando las sinergias presentes en una planta de 1.000.000 de toneladas anuales. Para la evaluación comparativa de las economías de

escala se presentan los resultados para tres tamaños representativos: 150.000, 330.000 y 1.000.000 de toneladas anuales tratadas.

Una planta de 330.000 ton/año corresponde a aproximadamente el 10% de los RSD generados en la RM el año 2015, y supone una potencia eléctrica entre 20 y 29 MW<sup>146</sup> que utilizaría una superficie de 8 hectáreas.

### *Pre-tratamiento*

Como sistema de pre-tratamiento está considerado solamente el equipamiento para la separación mecánica gruesa, lo que principalmente se refiere a las grúas en la zona del búnker. La incorporación de más equipos de pre-tratamiento para eliminar mayor cantidad de materiales revalorizables depende de la rentabilidad entre la reventa y la inversión adicional. Por lo tanto, el sólo considerar este equipamiento es principalmente una decisión económica y no técnica.

La zona de recepción está ubicada al interior de una sala con varias bahías de descarga. El tamaño del búnker permite una operación sin interrupción de 5 días, que es un estándar de la industria, en caso que no se entregasen nuevos RSD (huelga, condiciones meteorológicas extremas, etc.). La encapsulación limita las emisiones de ruido y olores de esta zona de la planta.



**Figura 5-15:** Sala de descarga (derecho), grúa pórtico para mezclar/transportar RSD (izquierdo), planta Winterthur, Suiza

### *Sistema de conversión*

El proceso de combustión tiene lugar en la cámara de combustión con una parrilla. Para asegurar temperaturas de combustión suficientemente altas, incluso en condiciones de residuos desfavorables, la planta está equipada con quemadores auxiliares que se suministran con combustible fósiles de un sistema de suministro común.

Para la combustión se suministra oxígeno por dos sistemas de aire diferentes (primarios y secundarios) para la combustión en etapas con bajas emisiones primarias. Cada sistema consiste en ventiladores, silenciadores, precalentadores, amortiguadores, conductos, etc. El aire de combustión principal se toma del interior de la sala de descarga, búnker de

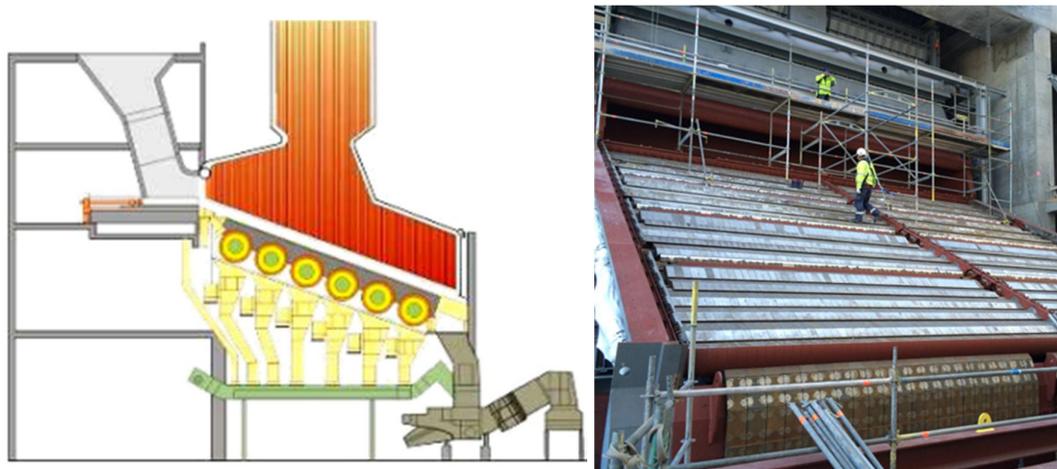
<sup>146</sup> El rango de potencia depende si la planta comercializa solo electricidad, o también calor o vapor.

residuos y la casa de caldera, para mantener presión negativa dentro de los edificios y evitar emisiones de olores.

El diseño de la parrilla considera una inclinación con un ángulo aproximado de 24°, número que varía entre los distintos proveedores de acuerdo con su tecnología. La inclinación de la parrilla permite que el nuevo combustible suministrado por el sistema de carga se mezcle con el material ya en combustión en la parrilla. El movimiento característico de los elementos de la parrilla crea una agitación intensa del combustible. Consecuentemente, los procesos típicos de secado, desgasificación, ignición y combustión traslapan ya en el primer tramo de la parrilla. Hacia el final de la parrilla el combustible llega al agotamiento (*burnout*) y se acerca al sistema de descarga de ceniza de fondo.

La ceniza de fondo se descarga por el final de la parrilla y en menor fracción, entre los elementos de la parrilla. Las cenizas son recolectadas por correas transportadoras que trasladan la ceniza de fondo al área de almacenamiento.

Luego, los gases salen de la cámara de combustión a alta temperatura a la caldera, donde el calor recuperado producirá vapor sobrecalentado para la operación de la turbina para generar energía eléctrica.



**Figura 5-16: Esquema y foto de la parrilla de combustión (Doosan Lentjies, derecha, Babcock, izquierdo)**

El tiempo de residencia del combustible en la parrilla (tiempo en la cámara de combustión) está entre aproximadamente 60 y 70 minutos. La velocidad de la parrilla se puede ajustar para controlar mejor el proceso de combustión.

***Caldera***

Para el diseño de la caldera existen dos conceptos principales que se presentan en la Figura 5-17. Hay diseños horizontales y verticales para la parte de convección de la caldera. El diseño horizontal requiere mayor superficie en planta, mientras que el diseño vertical requiere más altura con sus correspondientes impactos en las obras civiles.



**Figura 5-17: Conceptos principales de arreglo de la caldera; horizontal o vertical (Elaboración propia)**

Los gases salen de la cámara de combustión a la caldera. Esta última consta de una sección de radiación de múltiples pasos (entre dos y cinco pasos dependiendo del proveedor) con un arreglo horizontal o vertical, donde se instalan evaporadores convectivos y supercalentadores. La caldera se dimensiona para obtener bajas velocidades de los gases de combustión, asegurando un alto tiempo de retención para recuperar el mayor porcentaje de energía posible. En la parte inferior de los pases de radiación, se encuentra una tolva para separar y recolectar la ceniza. Cabe destacar que toda la construcción de la caldera está suspendida en una estructura de acero para permitir expansión térmica sin obstrucciones y uniforme en todos los ejes espaciales.

Los siguientes aspectos caracterizan el diseño conceptual de la caldera en conformidad con proyectos recién elaborados por Pöyry y las mejores tecnologías disponibles (BAT) descritos:

- Caldera de circulación natural.
- Mezcla de vapor y agua se suministra al tambor de la caldera a través de un sistema de desbordamiento.
- Tubos generadores de vapor inclinados hacia arriba que garantizan una circulación de agua estable y segura sobre el rango de carga completo.
- El tambor de la caldera está ampliamente dimensionado, lo que garantiza una gran capacidad de almacenamiento y buena calidad de vapor con bajo contenido de agua.
- Largo tiempo de retención del gas de combustión en las dos primeras pasadas para el mejor quemado posible de las partículas sólidas en la fase gaseosa, así como la mezcla adecuada de los gases de combustión antes de entrar en las superficies de calentamiento por convección.
- Diseño espacioso de las secciones radiantes para el enfriamiento de gases de combustión, para reducir las incrustaciones con ceniza volante en la entrada a la sección convectiva.
- Diseño de pases convectivos para bajas velocidades de gases de combustión para evitar la erosión.
- El control de la temperatura del vapor sobrecalentado está garantizado con dos unidades de agua de alimentación.

### ***Sistema de tratamiento de gases de combustión (Flue Gas Treatment)***

Para garantizar los parámetros de contaminantes definidos en las normas vigentes, como fue descrito en las secciones anteriores (Requerimientos para emisiones atmosféricas), la planta contiene un sistema de tratamiento de gases de combustión. Para el pre-dimensionamiento de la planta se ha considerado un sistema seco de tratamiento de gases (ver capítulo 4.1.6).

### ***Turbina de vapor y generador***

- Turbina de condensación con extracción de vapor controlada
- Generador
- Condensador enfriado por aire (en inglés *Air Cooled Condenser, ACC*)
- Estanque de condensado y de agua de alimentación, incluyendo sus bombas correspondientes
- Válvulas de control

### ***Balance of Plant (BoP)***

El BoP (en inglés *Balance of Plant*) incluye los sistemas de agua y vapor de la unidad entre la entrega de RSD y la caldera, turbina a vapor y los condensadores enfriados por aire. Incluye también todos los sistemas del circuito agua/vapor, incluyendo las tuberías, conexiones, soportes, válvulas y componentes para una operación ininterrumpida. El BoP también incluye los sistemas de tratamiento de aguas servidas y de aguas de proceso.

### ***Sistemas auxiliares***

Se compone de los siguientes sistemas:

- Sistema de Aire Comprimido.
- Planta de agua desmineralizada (en inglés *Make-up Water Plant*).

El proyecto requiere una planta de agua para generar agua desmineralizada (agua de caldera). Esto incluirá tanques de almacenamiento, bombas, filtros, intercambiadores de calor, planta de osmosis inversa y una unidad de electrodesionización (EDI).

- Sistema de transporte de ceniza de fondo.

Aguas abajo de la salida del descargador, el transporte de cenizas del fondo se efectúa mediante una correa transportadora vibrante. Las vibraciones constantes de la correa transportadora nivelan el flujo de ceniza inferior y finalmente deja caer la ceniza del fondo en el búnker de cenizas del fondo.

- Sistema de tratamiento de cenizas volante.

Los residuos sólidos eliminados por los dispositivos de limpieza de la caldera se encuentran en las tolvas dispuestas por debajo de caldera y de los sistemas de tratamiento de gases, desde donde un sistema de transporte mecánico y neumático proporciona transporte a un silo de almacenamiento. Para evitar pérdidas de gases combustión o entrada de aire durante la operación, se utilizan en cada tolva unas

válvulas. Para el mantenimiento, está prevista una válvula de compuerta deslizante accionada manualmente en cada tolva.

La tubería transportadora neumática descarga la ceniza volante en los silos de almacenamiento de los residuos del sistema de tratamiento de gases de combustión. Todas las correas transportadoras mecánicas son brevemente reversibles en caso que ocurriesen bloqueos.

- Sistema de agua de enfriamiento.

El sistema de refrigeración de componentes suministra la cantidad necesaria de agua de enfriamiento (agua/mezcla de propilenglicol) a los consumidores de agua de enfriamiento conectados al sistema. El agua tiene una temperatura de 35°C.

El sistema consiste en: bombas, unidad de enfriamiento y sistema de mantenimiento de presión.

- Estanques de almacenamiento de consumibles como amonio, cal hidratada, etc. y para almacenamiento de residuos.

### *Equipamiento eléctrico*

El equipamiento necesario para la planta WTE es el siguiente:

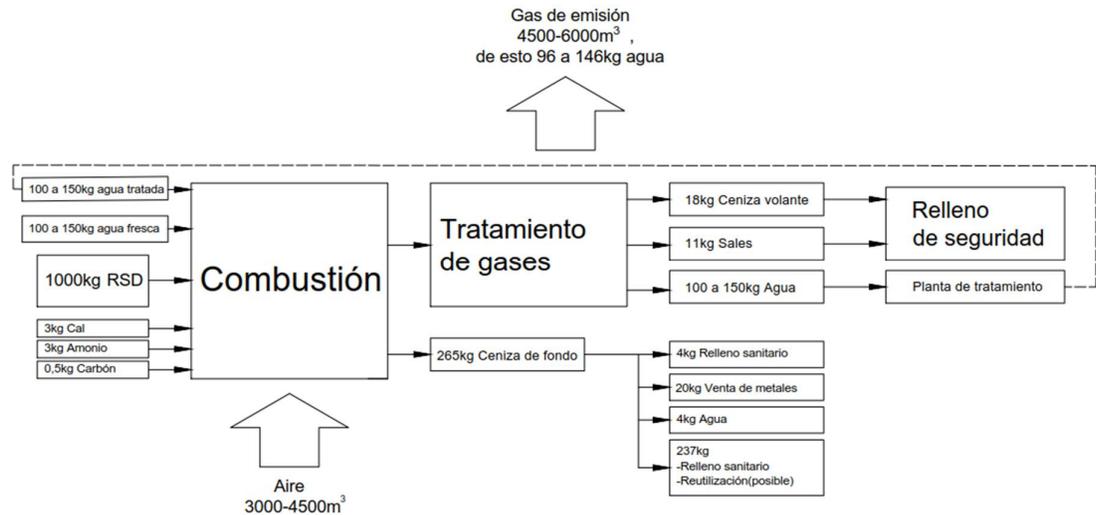
- Interruptor de alta tensión (132 kV): Interruptor aislado de aire de una sola línea, incluido el seccionador, disyuntor, transformadores de medida, supresor de sobretensiones y todas las estructuras de soporte.
- Transformador elevador.
- Interruptor en media tensión aislada con aire (11 kV): Para la conexión al transformador elevador, generador de turbina y transformadores de potencia auxiliares.
- Transformadores auxiliares.
- Interruptor de baja tensión (690/400 V): Para distribución de energía auxiliar y control de los motores y actuadores de la planta.
- Convertidores de frecuencia: Para accionamientos con control de velocidad.
- Unidad de energía de emergencia: Para parar la planta de forma segura en caso de fallas en el suministro de energía.
- Sistema de suministro de energía ininterrumpido.
- Instalación eléctrica.
- Sistema de protección para descargas electromagnéticas para el área de la planta WTE.
- Sistema de puesta a tierra.

**Sistema de Instrumentación y Control**

- Sistema de control centralizado (DCS) con un servidor independiente.
- Sistemas de mediciones de emisiones atmosféricas.
- Sistema de monitoreo (CCTV) para todas las áreas de la planta.

**Balance de masa**

El balance de masa general dentro de una planta WTE depende de los procesos de combustión. Para la planta de combustión de parrilla se considera el siguiente balance de masa:

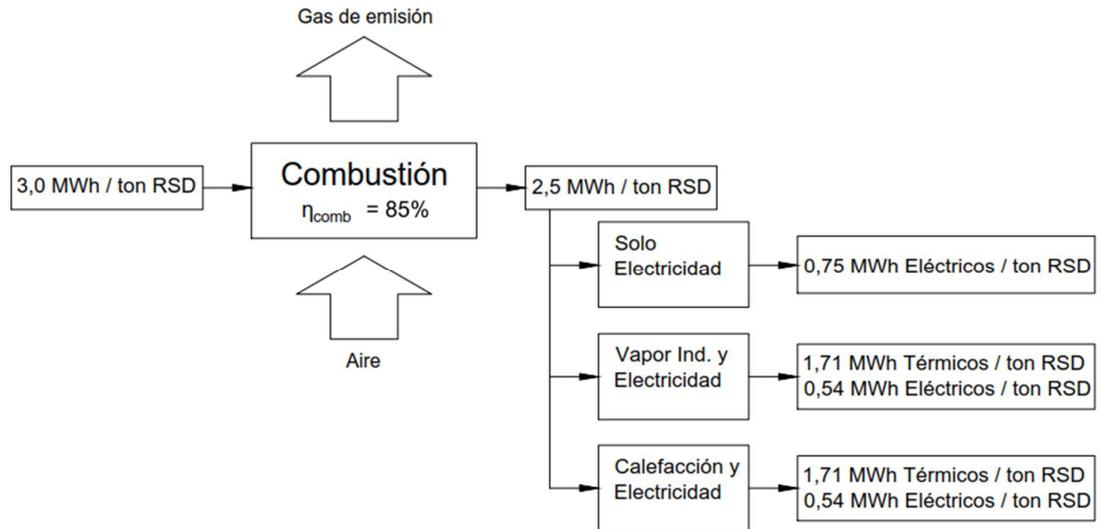


**Figura 5-18: Balance de masa planta preliminar**

El agua utilizada en la recuperación energética se usa en distintas partes del proceso, como sello de la cámara de combustión, sistemas de refrigeración, ciclos de vapor y principalmente en los procesos de tratamiento de gases. El 40% o 60% del agua que entra al proceso por los componentes mencionados anteriormente, además del contenido de agua de los RSD (humedad), salen del sistema como vapor de agua junto con los gases de emisiones, y el restante se recupera en forma líquida. El agua recuperada es tratada en la misma planta y reutilizada en el proceso.

**Generación de energía**

La eficiencia de generación eléctrica depende de los otros procesos, por esto en una planta moderna la eficiencia de generación eléctrica total, si solo se genera energía eléctrica, alcanza un 25%, mientras que si se genera calor o vapor esta solo alcanza un 18%.



**Figura 5-19: Generación de energía para planta preliminar**

En la Figura 5-19 se presentan los valores de generación máxima de energía considerando diversas formas de entrega de energía.

Para el caso de solo entregar electricidad, queda la expresión:

$$MWh_e = MWh_{RSD} \times \eta_{eléctrica} = 3,0 \times 0,25 = 0,75 MWh_e$$

Dónde:

- $\eta_{eléctrica}$ : Eficiencia de la planta WTE para generación eléctrica 25%.

Para el caso de suministro de electricidad y vapor el cálculo de generación distribuye la generación eléctrica y térmica aplicando las eficiencias de conversión como sigue:

$$MWh_e = MWh_{RSD} \times \eta_{eléctrica} = 3,0 \times 0,18 = 0,54 MWh_e$$

$$MWh_t = (MWh_{RSD} \times \eta_{térmica} - MWh_e) \times (1 - \text{pérdidas}) =$$

$$(3,0 \times 0,85 - 3,0 \times 0,18) \times (1 - 0,15) = 1,71 MWh_t$$

Dónde:

- $\eta_{eléctrica}$ : Eficiencia de la planta WTE para generación eléctrica en conjunto con generación de calor
- $\eta_{térmica}$ : Eficiencia de la planta WTE para generación térmica de calor
- *Pérdidas*: Se aplica un factor de pérdidas de 15% para la conversión de energía térmica desde el generador hasta su punto de entrega (medidor).

Cabe destacar que la máxima venta de calor depende de la demanda presente en los alrededores de la planta, la que ha sido definida en la sección 5.3.1.

Para el caso de suministro de electricidad y calor:

$$MWh_e = MWh_{RSD} \times \eta_{eléctrica} = 3,0 \times 0,18 = 0,54 MWh_e$$

$$MWh_t = (MWh_{RSD} \times \eta_{térmica} - MWh_e) \times (1 - \text{pérdidas}) =$$

$$(3,0 \times 0,85 - 3,0 \times 0,18) \times (1 - 0,15) = 1,71 MWh_t$$

Dónde:

- $\eta_{\text{eléctrica}}$ : Eficiencia de la planta WTE para generación eléctrica en conjunto con generación de calor.
- $\eta_{\text{térmica}}$ : Eficiencia de la planta WTE para generación térmica de vapor.
- *Pérdidas*: Se aplica un factor de pérdidas de 15% para la conversión de energía térmica desde el generador hasta su punto de entrega (medidor).

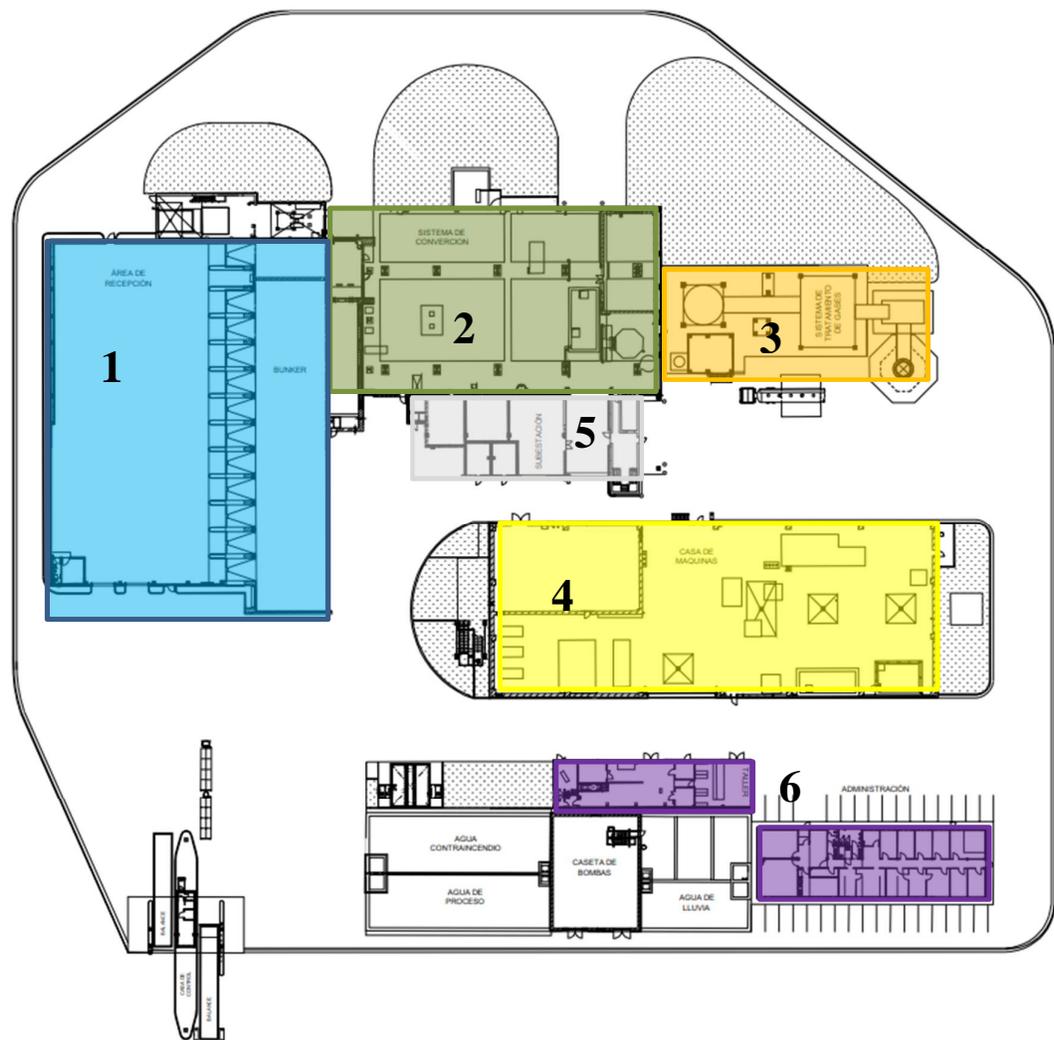
Debido a que la demanda de calor se realiza principalmente en determinadas estaciones del año, se asume un suministro de calefacción de 1.500 horas al año.

Las eficiencias de conversión de los distintos sistemas se han derivado de proyectos similares evaluados o ejecutados por el equipo consultor en los últimos años y se refieren a sistemas de tecnología moderna. Las pérdidas del sistema de distribución de calefacción distrital o de vapor industrial están estimadas para cumplir con un rango de sistemas existentes, que permite una operación económica según la experiencia del consultor.

#### ***Arreglo general***

De forma genérica, y como propuesta para la RM, se presentan planos de una planta WTE y su correspondiente sección longitudinal en el Anexo K. La planta del diseño preliminar tiene una capacidad de 330.000 ton/año. A partir de lo anterior, se puede observar la entrada a la planta con su sistema de pesaje, el área de entrega de residuos con superficie de maniobra de camiones y el bunker o zona de acopio de residuos.

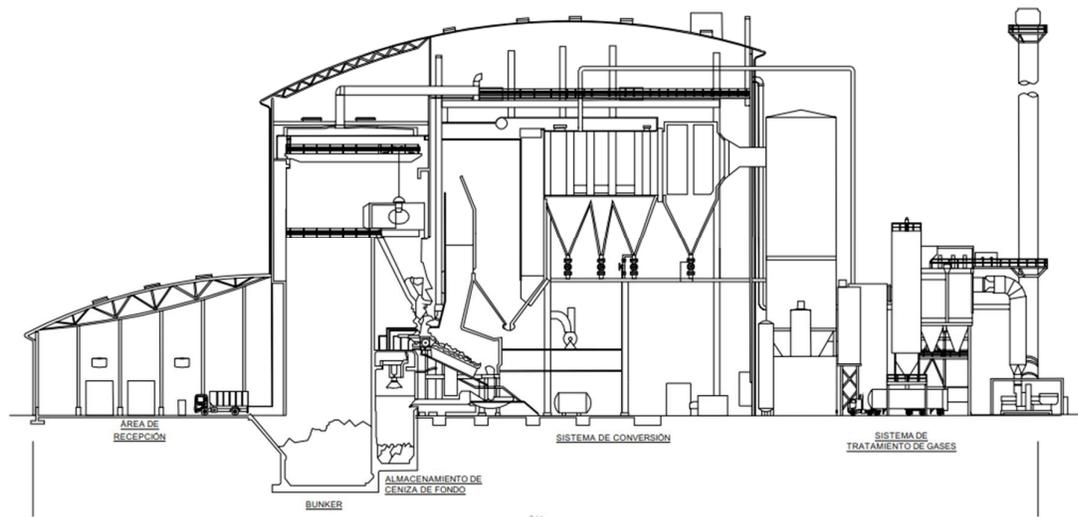
En la Figura 5-20, que es una forma explicativa del Anexo K, se muestran los edificios correspondientes de la planta WTE. Desde el edificio de la caldera hay dos salidas principales: la salida de los gases de combustión al sistema de tratamiento y la conexión a la casa de máquinas con los tubos del ciclo agua/vapor que llevan el vapor a la turbina y su generador. Como edificios anexos está el transformador auxiliar y elevador, una casta de bombas donde están ubicados los tanques de agua de proceso, agua de contra incendio y la planta de tratamiento de agua. Además, se consideran oficinas para la administración y un taller para el equipo de mantención. Existen varios accesos a la planta para llevar o evacuar insumos o residuos.



**Figura 5-20: Planta general de una planta WTE.**

Dónde:

- 1.- Recepción/Búnker
- 2.- Sistema de Conversión
- 3.- Sistema de tratamiento de gases de Combustión
- 4.- Sistema de generación eléctrica
- 5.- Subestación elevadora
- 6.- Administración/Taller



**Figura 5-21: Sección transversal**

Dependiendo de la ubicación exacta y sus accesos este diseño tiene que ajustarse y actualizarse para incorporarse a su entorno. El área requerida para la planta propuesta es de aprox. 80.000 m<sup>2</sup>, esto sin considerar algún espacio de almacenamiento fuera del búnker y sin considerar requerimientos geométricos del terreno (accesos, restricciones, conexiones, vecinos, etc.).

### 5.2.2 Costo de inversión – CAPEX

De acuerdo a las características descritas en el capítulo anterior, y utilizando los últimos datos disponibles de licitaciones y proyectos más recientes elaborados y evaluados por Pöyry, se presenta a continuación el desglose del costo total. Entre los últimos proyectos analizados se encuentran las plantas de Estambul, Turquía y Perth (Australia), ambas con una capacidad de 1 MMton/año. Las plantas existentes evaluadas principalmente son de Alemania con un rango de capacidad de 150.000 hasta 380.000 ton/año. Además, se ha tomado contacto con varios proveedores de tecnologías, obteniendo cuatro cotizaciones que permiten incluir un factor de incertidumbre dado que no existen proyectos de referencia en Latinoamérica. Los costos para obras civiles, equipos eléctricos, y *Balance of Plant* típicamente utilizados en una central eléctrica, se han tomado de otros proyectos recién ejecutados por los consultores en Chile y Latinoamérica en general.

A continuación, se describirán dos opciones para el desglose del CAPEX que permiten indicar el rango de costo de inversión en base de diferentes modelos de contratación. Dado que no se está evaluando un proyecto en una ubicación definida, con características conocidas a un suficiente grado de detalle, se deben excluir algunos costos de esta estimación. Los siguientes costos están excluidos del CAPEX:

- Interconexión eléctrica: límite de batería del proyecto es el borne del transformador elevador.
- Acceso vial: posibles ajustes en las vías de acceso para cumplir con la capacidad requerida (cantidad y peso de tráfico).

- Medidas de mitigación socio-ambientales: costos para posibles proyectos de mitigación o compensación.

En los costos de desarrollo se han considerado los gastos del propietario durante el desarrollo del proyecto (salarios del personal dedicado al proyecto, gastos de oficinas, visitas a terreno, etc.), la remuneración para la elaboración del estudio de impacto ambiental hasta la obtención de una Resolución de Calificación Ambiental (RCA). Además, se ha definido un costo por la compra del terreno donde se ubicará el proyecto en base de un precio asumido (300,0 MMCLP/ha ~1,1 UF/m<sup>2</sup> a 1.325,0 MMCLP/ha ~5,0 UF/m<sup>2</sup>)<sup>147</sup>. En la evaluación económica se ha asumido un precio de 300,0 MMCLP/ha por efectos de presupuesto de terreno, considerando una superficie de planta de 8.5 ha en el caso del proyecto de referencia y con capacidad de 330.000 ton/año. Finalmente, se incluyeron costos para consultoría técnica, considerando que el propietario muy probablemente necesitará apoyo por un grupo de especialistas en esta materia. Dependiendo del modelo de contratación, estos costos pueden ser mayores, incluyendo la ingeniería de detalle y la integración de los equipos de los proveedores, o menores, en caso de un mandato como ingeniero del propietario, supervisando el desarrollo de la ingeniería de detalle por el equipo del contratista EPC.

Al final se agregan contingencias por los distintos elementos del proyecto, considerando susceptibilidad a cambios, nivel de incertidumbre o riesgo por costos adicionales. En esta fase del proyecto se consideran contingencias para los siguientes elementos:

- Gestión de Proyecto: toma en cuenta que el propietario puede cambiar/ajustar/actualizar sus requerimientos que pueden resultar en mayor costo de inversión del proyecto.
- Obras civiles: considera el diseño sismo resistente de las estructuras y posibles ajustes al diseño civil, esto a partir de investigaciones geotécnicas y/o mecánica de suelos indicando la composición definitiva del terreno seleccionado para la construcción del proyecto.
- Equipamiento WTE: incluye posibles cambios en tecnología y precios a lo largo del proceso de desarrollo del proyecto debido a avance tecnológico y/o disponibilidad en el mercado.
- Equipamiento eléctrico: incluye posibles cambios en tecnología y precios a lo largo del proceso de desarrollo del proyecto debido a avance tecnológico y/o disponibilidad en el mercado.

Estas contingencias se deben revisar y ajustar a lo largo del proceso de desarrollo del proyecto.

Con el objetivo de indicar el rango de los costos de inversión posibles, se han elaborado dos estimaciones aplicando distintos esquemas contractuales, considerando los esquemas más extremos con respecto a la asignación de responsabilidad y riesgo de la construcción del proyecto que son: el esquema EPC, con CAPEX máximo pues la responsabilidad la tiene totalmente el contratista, y la modalidad contractual de EPCM, donde la responsabilidad sobre la gestión de proyecto y los contratos de proveedores están del lado

---

<sup>147</sup> Sitios industriales en cercanías del Anillo Vespucio portal inmobiliario [www.portalinmobiliario.com](http://www.portalinmobiliario.com)

del propietario (mayor descripción ver sección 5.3.5). A continuación, se presenta el resumen de ambos esquemas contractuales y el desglose por los ítems principales según la metodología definida.

**Tabla 5-12: Desglose del CAPEX bajo modelo de contratación EPC [USD]**

Proyecto con EPC	150.000 ton/año	330.000 ton/año	1.000.000 ton/año
<b><i>Costo de Desarrollo</i></b>			
- Costo de Propietario	1.300.000	2.000.000	4.000.000
- Permisos y EIA	800.000	1.000.000	1.600.000
- Terreno	2.343.750	3.984.375	5.625.000
- Ingeniero del Propietario	1.000.000	1.600.000	3.500.000
<b><i>Planta WTE</i></b>			
- Ingeniería de detalle	2.500.000	3.500.000	5.000.000
- Obras civiles	32.000.000	50.000.000	125.000.000
- Pre-tratamiento	2.500.000	3.500.000	8.500.000
- Sistema de conversión	35.000.000	55.000.000	135.000.000
- Turbina/Generador	15.000.000	24.000.000	55.000.000
- Sistema de tratamiento de gases de combustión (FGT)	11.000.000	17.000.000	41.000.000
- <i>Balance of Plant (BoP)</i>	6.000.000	9.000.000	20.000.000
- Equipamiento eléctrico & Instrumentación	10.000.000	18.000.000	41.000.000
- Subestación y Transmisión	1.000.000	1.500.000	3.000.000
<b>Costo Total</b>	<b>120.443.750</b>	<b>190.084.375</b>	<b>448.225.000</b>
<b><i>Contingencias</i></b>			
- Gestión de Proyecto (15%)	816.563	1.287.656	2.208.750
- Obras civiles (10%)	3.200.000	5.000.000	12.500.000
- Equipamiento WTE (5%)	2.850.000	4.400.000	10.475.000
- Equipamiento eléctrico (5%)	1.300.000	2.175.000	4.950.000
<b>Costo Total (incl. cont.)</b>	<b>128.610.313</b>	<b>202.947.031</b>	<b>478.358.750</b>
- USD/ton (CTT, sin OPEX)	857	615	478

**Tabla 5-13: Desglose del CAPEX bajo modelo de contratación EPCM [USD]**

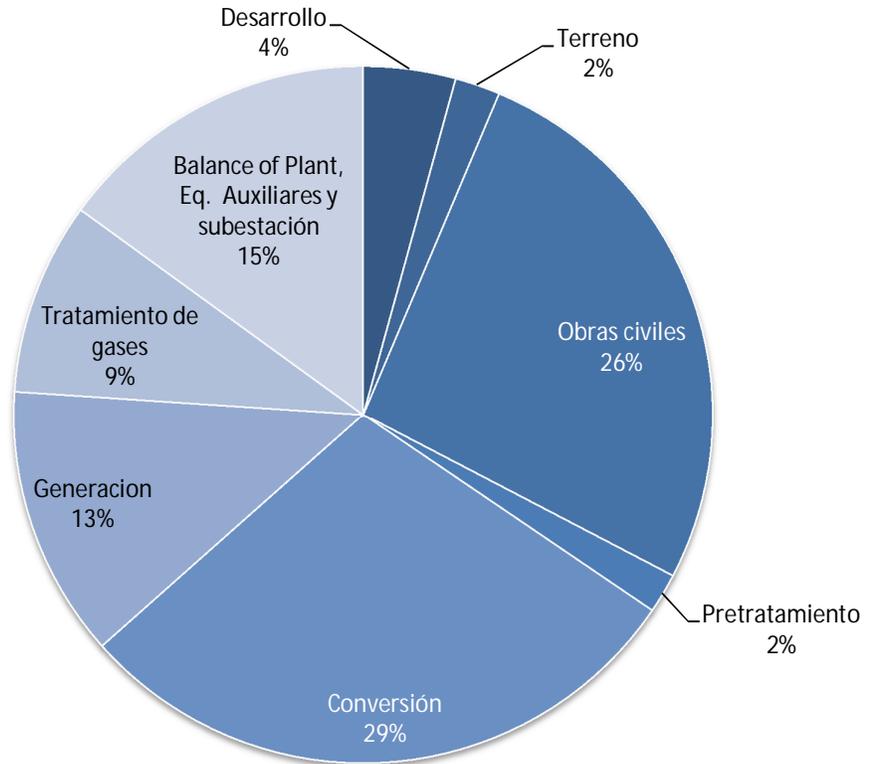
Proyecto con EPCM	150.000 ton/año	330.000 ton/año	1.000.000 ton/año
<b>Costo de Desarrollo</b>			
- Costo de Propietario	1.300.000	2.000.000	4.000.000
- Permisos y EIA	800.000	1.000.000	1.600.000
- Terreno	2.343.750	3.984.375	5.625.000
- Ingeniería de Proyecto	3.150.000	4.590.000	7.650.000
<b>Planta WTE</b>			
- Obras civiles	28.800.000	45.000.000	112.500.000
- Pre-tratamiento	2.375.000	3.325.000	8.075.000
- Sistema de conversión	33.600.000	52.800.000	129.400.000
- Turbina/Generador	14.400.000	23.040.000	52.800.000
- Sistema de tratamiento de gases de combustión (FGT)	10.450.000	16.150.000	38.950.000
- Balance of Plant (BoP)	5.700.000	8.550.000	19.000.000
- Equipamiento eléctrico & Instrumentación	9.500.000	17.100.000	38.950.000
- Subestación y Transmisión	950.000	1.425.000	2.850.000
<b>Costo Total</b>	<b>113.368.750</b>	<b>178.964.375</b>	<b>421.600.000</b>
<b>Contingencias</b>			
- Gestión de Proyecto (15%)	1.139.063	1.736.156	2.831.250
- Obras civiles (10%)	2.880.000	4.500.000	11.250.000
- Equipamiento WTE (5%)	2.606.250	4.041.250	9.781.250
- Equipamiento eléctrico (5%)	1.242.500	2.078.250	4.730.000
<b>Costo Total (incl.. cont.)</b>	<b>121.236.563</b>	<b>191.320.031</b>	<b>450.192.500</b>
- USD/ton (CTT, sin OPEX)	808	580	450

En general, los costos de los ítems en un contrato EPC son mayores porque el contratista está asumiendo el riesgo y tiene que financiar parcialmente el proyecto adelantando pagos a sus proveedores de servicios y equipos.

En las anteriores tablas se puede observar también el efecto de economía de escala. Por ejemplo, en el costo por tonelada entre el tamaño menor e intermedio hay un factor de ahorro de 30%, este factor aumenta con la planta de mayor tamaño hasta un 45%. Por lo tanto, es importante que una planta pueda asegurar suficiente capacidad de RSD desde el inicio del desarrollo del proyecto.

En la Figura 5-22 se puede observar también la distribución de costos entre los elementos principales de una planta. Los ítems principales son las obras civiles y los sistemas de pre-tratamiento y conversión, que representan el 55% del costo total de la planta. Estos costos o porcentajes pueden diferir en cada proyecto y serán definidos con las ofertas comerciales de los proveedores.

**Figura 5-22: Distribución del CAPEX de la planta WTE sin contingencias para 330.000 ton anuales [USD]**



### 5.2.3 Costo de operación – OPEX

#### 5.2.3.1 Personal O&M

El organigrama líneas abajo representa la organización típica en una planta WTE. Este organigrama puede variar en función de la composición y distribución de los propietarios (privada, público, mixto). Para garantizar la operación 24/7 se requieren 5 turnos que permiten los tiempos suficientes de descanso. Las divisiones generales lideradas por el gerente de la planta son las siguientes:

- Planta de tratamiento de residuos
  - Operación
    - Supervisor de turno
    - Operadores (Supervisor + x personas)
    - Operador servicios
    - Guardia
  - Ingeniería

- Salud y Seguridad
- Mantenimiento
  - Planificación y compras
  - Supervisor mecánicos (2 Electricistas, 1 Electrónico, 2 Mecánicos, Jefe de lubricación)
  - Jefe de Almacén
- Planta de generación de energía
  - Medioambiente
  - Operaciones
  - Mantenimiento
- Administración
  - Asistentes
  - Recursos humanos
  - Finanzas

A continuación se puede ver la distribución de personal en planta para los tres tamaños en análisis.

**Tabla 5-14: Distribución de personal (elaboración propia)**

Posición	150.000 ton/año	330.000 ton/año	1.000.000 ton/año
Gerente de Planta	1	1	1
Planta de Residuos			
- Operaciones	6	8	15
- Ingeniería	1	1	2
- Salud y Seguridad	1	1	2
- Mantenimiento	8	10	20
Planta de generación			
- Medioambiente	1	1	2
- Operaciones	3	4	8
- Mantenimiento	3	4	8
- Sistema de control e instrumentación	1	1	2
Administración			
- Asistente	1	1	2
- Recursos Humanos	1	1	1
- Finanzas	1	1	1
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>64</b>

En la siguiente tabla se presenta la base de los costos totales por empleado para el cálculo de las remuneraciones anuales del equipo O&M. Esta base de datos se ha generado durante varios estudios y *Due Dilligence* en el sector eléctrico (centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, transmisión y distribución) en Chile y otros países de Latinoamérica en

los últimos años. En estos estudios y *Due Diligence* se han revisado aprox. 50 proyectos, de los cuales un mínimo de 10 estaban ubicados en Chile.

El costo anual presentado en la tabla incluye todos los costos de la empresa como seguros, posibles bonos, otros beneficios, gastos para equipamiento personal de protección (EPP), etc.

**Tabla 5-15: Base de costos totales por empleado (Elaboración propia)**

Posición	USD/año
Gerente de Planta	145.000
Planta de Residuos	
- Operaciones	36.000
- Ingeniería	96.000
- Salud y Seguridad	55.000
- Mantenimiento	78.000
Planta de generación	
- Medioambiente	55.000
- Operaciones	59.000
- Mantenimiento	78.000
- Sistema de control e instrumentación	96.000
Administración	
- Asistente	27.000
- Recursos Humanos	55.000
- Finanzas	96.000

### 5.2.3.2 Mantenimiento

En la Figura 5-23 se presentan los periodos de mantenimientos menores y mayores (*overhauls*) como están planificados en la vida útil de la planta diseñada. Se pueden ver los periodos cortos de los mantenimientos menores en naranja y los mantenimientos mayores en verde, donde se cambiarían hasta equipos completos en la planta. Estos costos han sido incorporados en los presupuestos anuales de O&M en el modelo financiero para garantizar la reserva de caja suficiente.

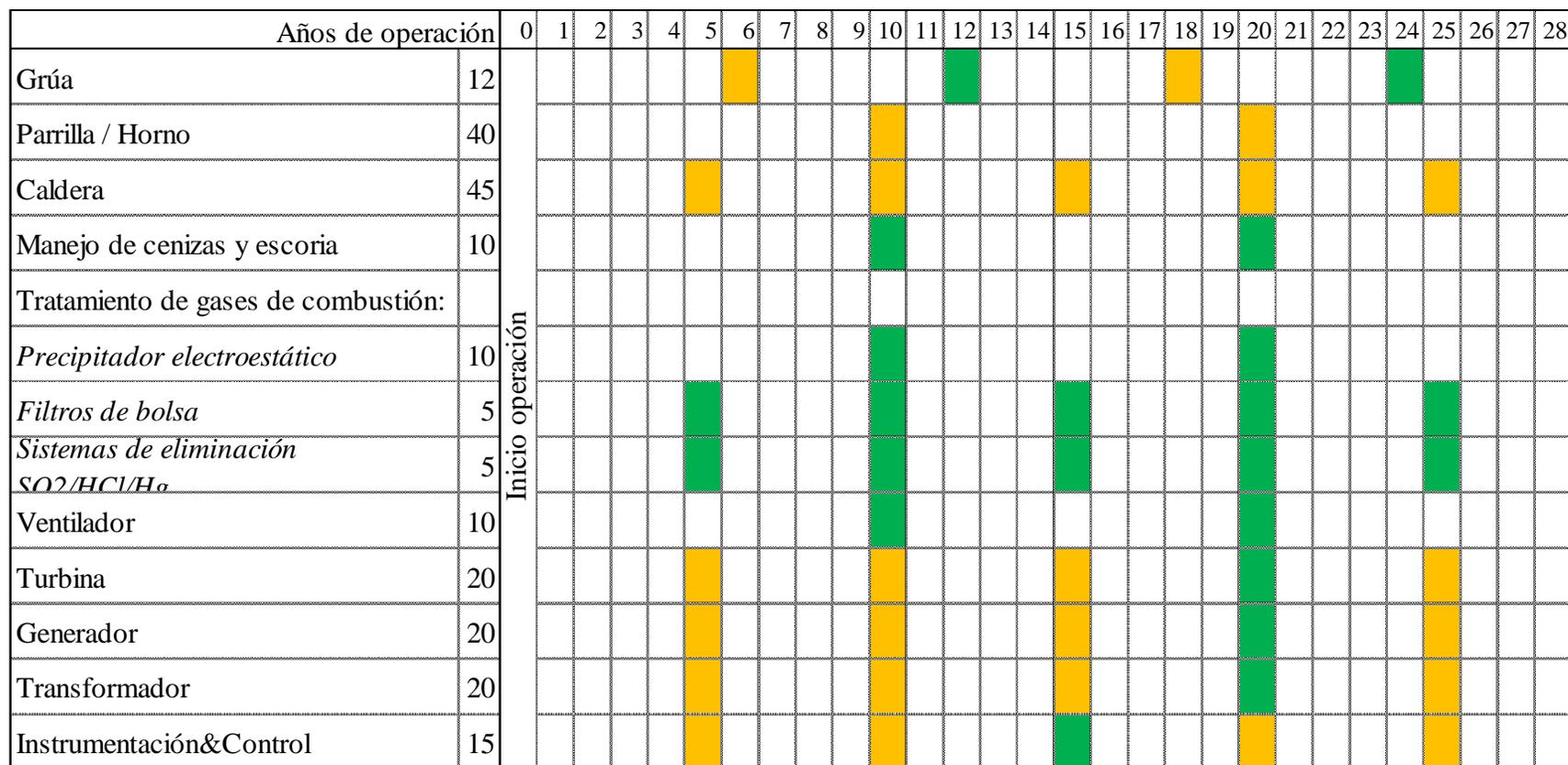


Figura 5-23: Periodos de mantenimiento; naranja mantenimientos menores, verde mantenimientos mayores.

Los costos de los mantenimientos han sido calculados en base de un porcentaje de la inversión inicial de cada componente según la Tabla 5-17. Estos valores se han definido en base de planos de mantenimientos encontrados en estudios, revisiones de proyectos ejecutados por el consultor y según las recomendaciones de los proveedores de equipos. Donde no hay valores de mantenimientos significa que por el periodo de retorno forma parte del mantenimiento preventivo anual.

**Tabla 5-16: Frecuencia y costos de mantención según estudios de consultor y proveedores.**

Componente	Frecuencia mantención [años]		Costo mantención [MUSD]	
	Mayor	Menor	Mayor	Menor
<b>Grúa</b>	12	6	1,94	0,39
<b>Parrilla / Horno</b>	40	10		2,08
<b>Caldera</b>	45	5		6,93
<b>Manejo de cenizas y escoria</b>	10	5	0,69	-
<b>Tratamiento de gases de combustión:</b>				
• Precipitador electrostático	10		1,13	
• Filtros de bolsa	5		0,28	
• Sistemas de eliminación SO <sub>2</sub> /HCl/Hg	5		1,13	
<b>Ventilador</b>	10		0,47	
<b>Turbina</b>	20	5	4,02	1,61
<b>Generador</b>	20	5	6,71	2,68
<b>Transformador</b>	20	5	1,66	0,50
<b>Instrumentación &amp; Control</b>	15	5	3,32	0,33

En general mantenimientos menores incluyen trabajos como cambio de elementos mecánicos de menor tamaño expuestos a desgaste, filtros, cables, entre otros. Estos trabajos en su mayoría se pueden ejecutar durante una revisión programada y no requieren una parada de planta explícita, por lo tanto, no influyen en la disponibilidad anual de la planta. Los mantenimientos mayores en componentes principales como la caldera, turbina, generador, transformador, sistema de tratamiento de gases de combustión, requieren un desarmado parcial para extraer componentes de mayor tamaño para su reemplazo total o por trabajo en el taller de la planta. Por lo tanto, hay que considerar tiempos adicionales de paradas en estos años de aproximadamente durante 1 mes. Los mantenimientos mayores en los componentes principales incluyen los siguientes ítems, además se incluyen trabajos según el diagnóstico de la condición encontrada del componente en revisión:

- **Caldera:** Revisión de espesores de tuberías y las soldaduras, válvulas, bombas, motores, todos los sistemas hidráulicos y neumáticos, control (y reemplazo) de sensores e instrumentos, control (y reemplazo) del aislamiento. Este mantenimiento se define como un 10% del CAPEX del sistema de conversión.
- **Parrilla:** Sistema hidráulico, sistema de distribución de aire, reemplazo de piezas mecánicas (desgaste de parrilla). Se define un mantenimiento menor que se estima en un 30% del valor del CAPEX de sistema de parrilla.

- Turbina: Apertura de la caja solo en caso de problemas con vibraciones y/o depósitos en la turbina, control topográfico de posición, control del sello labirinto, control (y reemplazo) de sensores e instrumentos, tableros de control. Para el mantenimiento mayor se define como el 50% de su valor de inversión y 20% para la mantención menor.
- Generador: Análisis de vibraciones, tableros del interruptor y de control, control topográfico de posición, control de equipamiento de seguridad, control (y reemplazo) de sensores e instrumentos, control (y reemplazo) del aislamiento. En general la mantención del generador es en conjunto y similar al de la turbina. Se asumen mismos valores mencionados para turbina.
- Transformador: Revisión de tableros del interruptor y de control, control del aislamiento, control de equipamiento de seguridad. Para el mantenimiento mayor se considera un reemplazo de este, por lo que se asume un 100% del valor inicial y un 30% para mantenimientos menores.
- Sistema de tratamiento de gases de combustión: Revisión de espesores de tuberías y las soldaduras, válvulas, bombas, motores, todos los sistemas hidráulicos y neumáticos, control (y reemplazo) de sensores e instrumentos, tableros de control. Se realizan mantenimientos cada 5 y 10 años dependiendo del elemento analizado. Para sistemas de eliminación de SO<sub>2</sub>/HCl/Hg y precipitadores electrostáticos se utiliza un 20% de su CAPEX, para el caso de filtro de bolsa se utiliza un 10% de su valor de inversión inicial.

### 5.2.3.3 Insumos

Para los insumos requeridos en el proceso de combustión de una planta típica de 330.000 ton/año mostrados en la Figura 5-18, se detallan los costos en la Tabla 5-17.

**Tabla 5-17: Base de datos y precios de consumibles**

Ítem	USD/ton	Base/Fuente
Agua de procesos	0,5	Aguas Andinas
Cal hidratada	144,0	Departamento del Interior de EE.UU. ( <i>Mineral Commodity Summaries</i> )
Carbón activado	1.526,0	SolamCarbon
Amonio	270,0	Departamento del Interior de EE.UU. ( <i>Mineral Commodity Summaries</i> )

### 5.2.3.4 Emisiones

Las emisiones del proceso de combustión y limpieza de gases de combustión están cuantificadas de acuerdo al balance de masa (ver Figura 5-18). Los residuos que forman parte del costo de operación por su disposición final serán considerados de la siguiente forma:

### *Residuos sólidos*

- Disposición final de la ceniza de fondo, será considerada 100% a relleno sanitario, a un costo de 20 USD/ton. La cantidad estimada es de 241 kg/ton. Cabe mencionar que de estos residuos 237 kg/ton posiblemente pueden reutilizarse en la industria de construcción como fue descrito anteriormente.
- De la ceniza de fondo se puede recuperar 20 kg/ton metales, que puede ser revalorizado en el mercado local, por lo tanto, será un ingreso.
- Disposición final de la ceniza volante será considerada 100% a relleno de seguridad, a un costo de 220 USD/ton. La cantidad estimada es de 18 kg/ton.
- Disposición final de sales será considerada 100% a relleno de seguridad, a un costo de 220 USD/ton. La cantidad estimada es de 11 kg/ton.

### *Residuos líquidos RILes*

Modernas plantas de WTE en general no tienen emisiones de residuos líquidos fuera de la planta. La cantidad de agua indicada como salida representa el contenido de humedad presente en la ceniza de fondo, la cual se dispone fuera de la planta en relleno sanitario. Toda el agua de proceso se trata y reutiliza dentro de la planta WTE, por lo tanto, no hay costos adicionales por la disposición.

Emisiones atmosféricas, ruido y olores no producen costos operacionales. En general el costo de su tratamiento o abatimiento está considerado en el CAPEX de los equipos y el diseño de la planta y en los consumibles.

## **5.2.4 Implementación de un proyecto WTE**

Las etapas principales para la implementación de un proyecto WTE se presentan en la Tabla 5-18. Se observa una fase de estudios de factibilidad en la cual se evalúa el proyecto con respecto a la cantidad y la calidad de los RSD, su poder calorífico y las opciones de comercialización de los productos provenientes de una planta WTE. Las fases de pre-factibilidad y factibilidad son claves para definir si se continúa con el proyecto o no.

Antes de entrar en la fase de preparación del proyecto, es necesario definir si el proyecto será llevado hasta un proceso de licitación con proveedores de tecnologías y equipamiento, elaborando los estudios correspondientes. Además, en esta fase el propietario tiene que preparar la estructura organizacional con la cual se ejecutará el proceso de licitación como mandante. Con un presupuesto más detallado con ofertas vinculantes se debe definir otra vez si el proceso de desarrollo de proyecto continuará o no, revisando la evaluación técnica-económica.

Con una decisión afirmativa se iniciará la etapa de implementación en la cual se evaluarán las cotizaciones de los proveedores de tecnologías con números reales con respecto al CAPEX. Dependiendo de la metodología de contratación, se puede definir la fase de operación de la planta. Con un proceso de evaluación y negociación se va a adjudicar la ingeniería y construcción del proyecto a las empresas o el consorcio seleccionado.

Las duraciones indicadas están estimadas según la experiencia en los últimos proyectos donde Pöyry participó.

**Tabla 5-18: Fases de desarrollo de proyectos WTE**

Fase	Paso	Descripción	Duración
Factibilidad	Estudio de Pre-factibilidad	Cantidades de RSD, poder calorífico, capacidad, ubicación, venta de energía, organización, costo y financiamiento.	3-4 meses
	Decisión técnico-política	Continuar con evaluación o terminar el proyecto.	3-4 meses
	Estudio de Factibilidad	Cantidades de RSD, poder calorífico, capacidad, ubicación, venta de energía, organización, costo y financiamiento en detalle.	6 meses
Preparación de Proyecto	Decisión técnico-política	Complacencia, prioridad y financiamiento de una planta WTE y su organización requerida.	6 meses
	Establecer una organización de proyecto	Establecimiento de una organización oficial, de apoyo y marco institucional.	3 meses
	Licitación e Ingeniería Final	Ingeniería de Detalle, negociación de préstamos u otras formas de financiamiento, selección del consultor.	3 meses
	Elaboración de documentos de licitación	Revisión del proyecto, especificaciones, pre-calificación de contratistas y documentos de licitación.	3-4 meses
Implementación del Proyecto	Decisión política	Paquete financiero, documentos de licitación y procedimientos en detalle para aprobación final.	3 meses
	Adjudicación y negociaciones	Pre-calificación de contratistas, documentos de licitación, selección de la oferta preferida, negociación del contrato.	6 meses
	Construcción/Supervisión	Construcción por el contratista y supervisión por el consultor independiente.	2-3 años
	Comisionamiento y puesta en marcha	Pruebas de especificaciones de rendimiento, finiquito, comisionamiento, entrenamiento de operadores.	6-12 meses
	Operación & Mantenimiento	Operación y mantenimiento continua de la planta, compra de repuestos e insumos.	20+ años
<b>ABANDONO DEL PROYECTO</b>			

Al no existir experiencia local en el proceso de evaluación de impacto ambiental para una planta WTE, se estiman los siguientes plazos:

**Tabla 5-19: Fase Evaluación de Impacto Ambiental**

Fase	Paso	Descripción	Duración
Evaluación de Impacto Ambiental	Estudio de Impacto Ambiental	Elaboración de Líneas Base, PAS, PASM y documento de EIA.	9-12 meses
	Proceso de evaluación ambiental	Revisiones sectoriales y locales. Se incluye el proceso de elaboración de adendas.	9-12 meses
	Calificación Ambiental	Pronunciamientos sectoriales, locales, y resolución de calificación ambiental.	6 meses

A continuación, en la Figura 5-24 se presenta un cronograma típico y simplificado para el desarrollo de un proyecto WTE, a partir de la firma de contrato de construcción con el contratista seleccionado. La duración de un proyecto depende de la complejidad con respecto a los trabajos preliminares de preparación del terreno. Por otro lado, hay plazos de suministro típicos de componentes principales como la caldera, turbina y generador y transformadores, los cuales independientemente del tamaño y especificación técnica del proyecto particular, siempre se mantienen constantes por la capacidad de producción a nivel global. Por lo tanto, un transformador de alta tensión, por ejemplo, casi siempre demora 12 meses entre la orden de compra y su entrega al proyecto.



### 5.3 Modelos de Negocios

El modelo de negocios es clave en la implementación de este tipo de proyectos, el cual varía de país a país adaptándose a diversos contextos locales y regionales. Existen elementos correspondientes a estrategias a nivel político que deben ser definidas previo a la ejecución de un proyecto WTE, como la propiedad del proyecto, ya que ello impacta significativamente en las opciones y costo del financiamiento del mismo. La posterior definición del financiamiento también es clave, ya que el costo entre deuda pública y privada puede ser significativo en la evaluación de una decisión de inversión en este tipo de proyectos.

Por otro lado, para garantizar la mejor ejecución de contratos y desarrollo del proyecto, el modelo de contratación debe ser el adecuado para garantizar una eficaz ejecución, donde el juego de transferencia de riesgos se mueve entre los propietarios, contratistas, consultores, operadores, etc. Se presenta en mayor detalle las opciones y modelos de cada opción actualmente existentes para Propiedad, Financiamiento, Modelo de Contratación y Operación en el Anexo M.

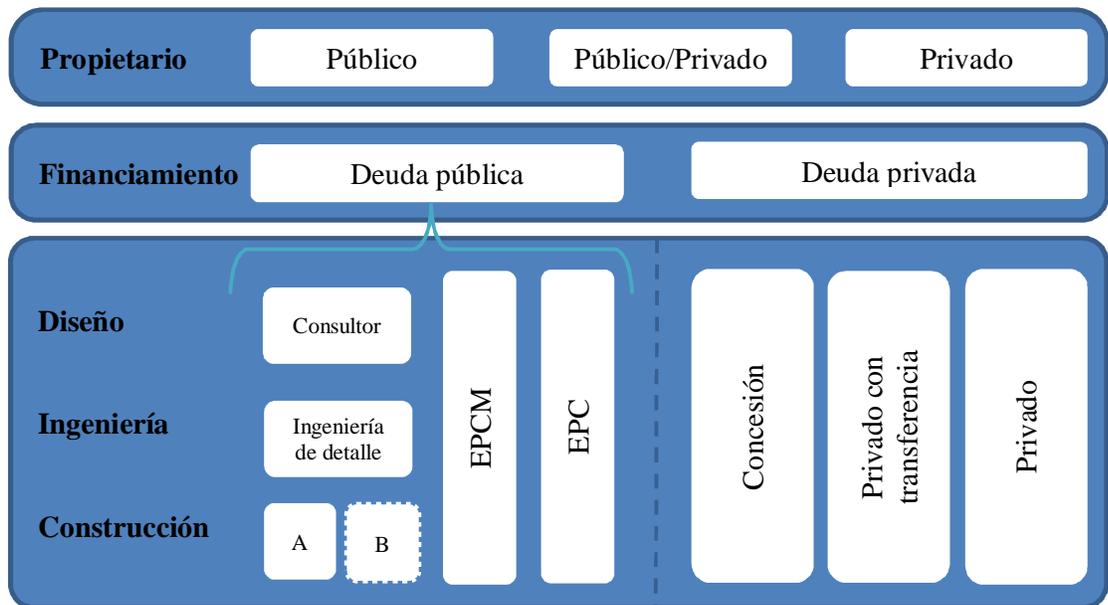


Figura 5-26: Esquema de opciones de organización de ejecución del proyecto

#### 5.3.1 Fuentes de ingreso

Las plantas de WTE pueden recibir ingresos por diversas fuentes dependiendo de las condiciones locales donde se emplaza el proyecto. Para la evaluación de los eventuales ingresos de una planta en la Región Metropolitana se han considerado los siguientes productos:

- Energía Eléctrica: comercializada al mercado Spot o a través de contratos (PPA) e inyectada a redes de transmisión y distribución existentes.
- Energía Térmica - Calor: comercializada de forma directa a uno o más clientes industriales o residenciales e inyectados a futuras redes de calefacción distrital.

- Energía Térmica - Vapor Industrial: comercializado de forma directa con uno o más clientes industriales, inyectado a tuberías de vapor directas entre la planta y la o las industrias.
- Materiales reciclados: obtenidos de los procesos de pre-tratamiento de los residuos a su ingreso a la planta y de post tratamiento de las cenizas.
- Ingreso por recepción de residuo en la planta (“Tarifa de disposición”, “Gate fee” o “*Tipping Fee*”).

La comercialización de cada producto final depende del costo involucrado para generar cada producto y la demanda del mismo. En el caso de las energías térmicas, calor y vapor, es importante que la demanda se encuentre cercana de la planta para que el costo del producto para el cliente final sea competitivo en relación con las alternativas disponibles.

Para el modelo de negocios se han definido los precios de los distintos productos, de acuerdo a la información disponible para el mercado de la Región Metropolitana. Para el caso de los productos que todavía no existen en el mercado se ha calculado el costo de tecnologías alternativas, por ejemplo, para el caso de la calefacción distrital se compara con la calefacción a gas natural, es decir, el precio de calefacción distrital máximamente puede ser igual al precio de la calefacción actual.

A continuación se presentan las bases de las metodologías y supuestos utilizados para la definición de los precios de cada uno de los productos que serán considerados en el cálculo de modelo de negocio.

### ***Energía Eléctrica***

Por el tamaño de las plantas WTE (> 9 MW) la comercialización de la energía eléctrica producida en la planta se puede realizar a través de dos instrumentos:

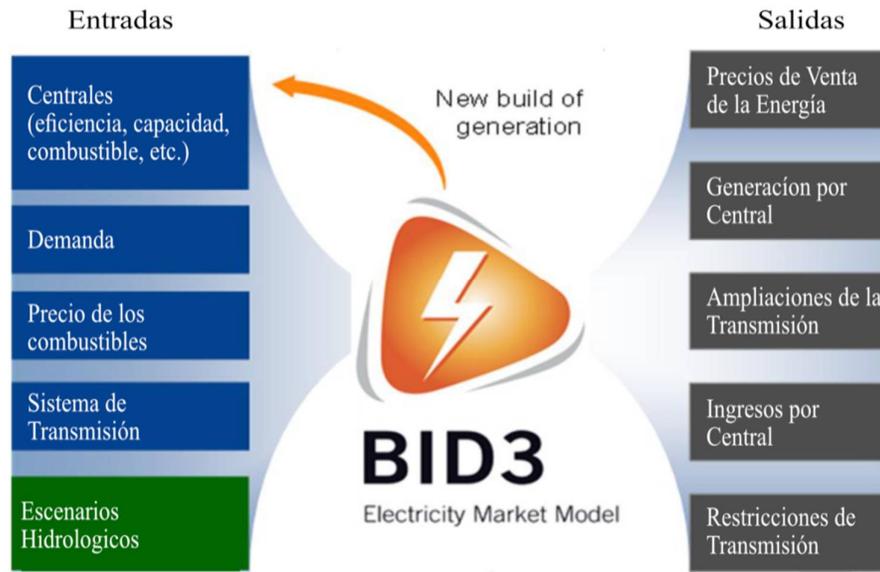
- La venta al mercado Spot
- La venta por contrato (PPA)

La venta al mercado Spot está sujeta a los precios instantáneos del sistema en la subestación de conexión de la planta, lo cual varía hora a hora dependiendo del requerimiento de la demanda de energía y qué centrales se encuentran en servicio. Para realizar la proyección de estos precios en el tiempo se utilizan diversos modelos numéricos.

La venta por contratos (PPA) es un acuerdo entre privados, sin embargo, normalmente ambas partes buscan eliminar la incertidumbre de la variabilidad de los precios Spot, por un precio fijo pero que refleje el valor medio del Spot por el periodo de vigencia del contrato.

Para la evaluación del proyecto se utilizarán los precios de energía del *Pöyry Independent Market Report, Wholesale Electricity Price Projection in Chile, Abril 2017*. En este reporte se establecen tres escenarios de precios de energía que consideran un conjunto de supuestos. Nuestras proyecciones no consideran alzas puntuales producidas por eventos particulares. La proyección no debe ser considerada como una imagen fidedigna del futuro, sino como una guía de qué podría pasar bajo determinadas condiciones.

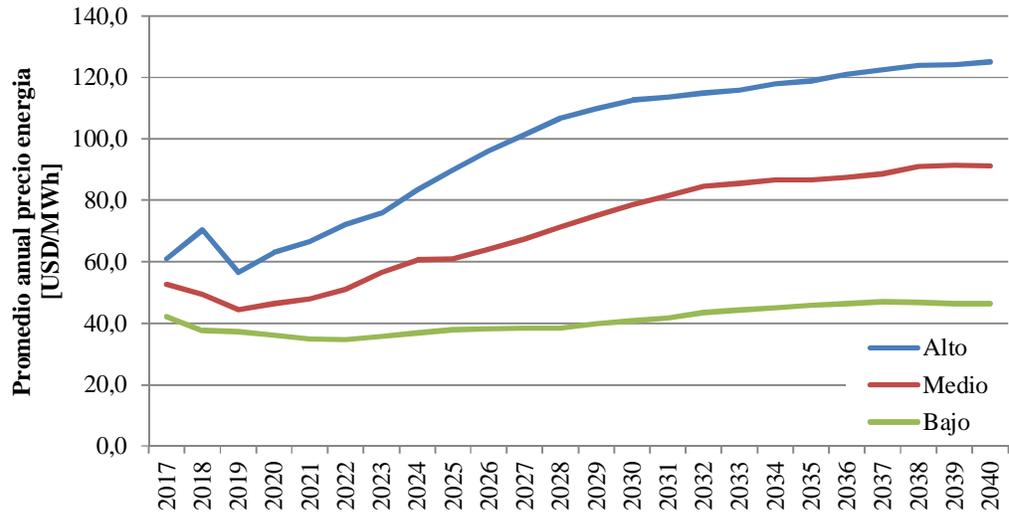
Pöyry utiliza el modelo BID 3<sup>148</sup>, el cual es el modelo de mercado eléctrico elaborado por Pöyry. Este modelo se utiliza para simular el despacho de la generación en diversos países del mundo. El modelo simula la operación horaria de cada año, con múltiples escenarios hidrológicos, obteniendo los valores de costo de la energía (costo marginal) para cada región, país, zona o subestación según se requiera.



**Figura 5-27: Esquema general BID 3**

La Figura 5-28 presenta los resultados de proyección de precios promedios del mercado Spot hasta el año 2040 en la zona central de Chile, en la cual se ubica la Región Metropolitana. Para los valores posteriores al año 2040, por su bajo impacto en el valor actual neto de la planta, se utilizará la proyección de los últimos 5 años de la evaluación para completar la serie. La proyección de precios a tan largo plazo debe ser tomada solo como referencial.

<sup>148</sup> [www.poyry.com/BID3](http://www.poyry.com/BID3)



**Figura 5-28: Proyección de precios zona Región Metropolitana**

**Calor/Calefacción**

La comercialización de la energía térmica para sistemas de calefacción distrital será considerada al valor de reemplazo de las tecnologías existentes, para ello se consideran los precios referenciales de los distintos combustibles disponibles en la Región Metropolitana.

El diseño del sistema de distribución de calor se escapa del alcance de este estudio y las evaluaciones no consideran la inversión en infraestructura para distribuir el calor.

Las pérdidas del sistema de distribución de calor se asumen en un 15%. Los costos dependen principalmente de la ubicación y extensión del sistema.

**Tabla 5-20: Precios referenciales de costo calor otras fuentes<sup>149</sup>**

Combustible	Precio Fuente de energía (USD/Und.)	Energía Bruta (kWh)	Calor aprovechado	Costo Calor USD/MWh
Estufa de Pellet (kg)	0,34	4,5	85%	87,50
Gas licuado (kg) sin descarga de gases al exterior	1,63	12,87	100%	126,82
Gas licuado (kg) con evacuación de gases eficiente	1,63	12,87	80%	158,53
Gas licuado (kg) con evacuación de gases poco eficiente	1,63	12,87	60%	211,37
Gas catalítico (kg) sin	1,70	12,87	100%	132,22

<sup>149</sup> Evaluación Económica de Alternativas de Calefacción Año 2014, Eduardo Jahnke S.

descarga de gases al exterior				
Kerosene (l) sin descarga de gases al exterior	1,14	9,58	100%	119,11
Kerosene (l) con evacuación de gases eficiente	1,14	9,58	80%	148,90
Kerosene (l) con evacuación de gases poco eficiente	1,14	9,58	60%	198,51
Estufa eléctrica, tarifa normal (kWh)	0,13	1	100%	127,08
Estufa eléctrica, tarifa sobreconsumo (kWh)	1,17	1	100%	175,53
Bomba de calor, tarifa normal (kWh)	0,13	1	300%	42,36
Bomba de calor, tarifa sobreconsumo (kWh)	0,17	1	300%	58,51

La cantidad límite para la venta de calefacción distrital se ha estimado en base de las horas necesarias de calefacción. Considerando las características climáticas de la RM, se estima un máximo de 1.500 horas/año para calefacción. La demanda energética promedio nacional según el Departamento de Tecnología del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) es de 192 kWh/m<sup>2</sup>/año. Por lo tanto, se considera un tope de 18% del calor que produce la planta de 330.000 ton/año, esto es equivalente a aprox. 64.000 casas, considerando una superficie de 70 m<sup>2</sup>. Como el calor para calefacción distrital tiene que competir con las alternativas existentes, se ha asumido el precio más bajo de la tabla, lo cual es una estufa de Pellet con un valor de 87,5 USD/MWh en base a un cambio de 640 CLP/USD) en el modelo financiero.

Cabe mencionar que la eficiencia de generación eléctrica se reducirá entre 5% a 7% cuando se produce calor en paralelo.

### **Vapor**

La comercialización de vapor industrial es factible de realizar bajo dos supuestos: primero existe una planta industrial que requiera vapor para sus procesos a una distancia razonable, y el costo del vapor será similar al valor de producción de vapor con otro combustible tradicional.

El método de cálculo considera los costos directos en la producción de vapor, además de los costos de combustible, insumos, servicios auxiliares, operación y mantenimiento.

**Tabla 5-21: Precios referenciales de costo vapor otras fuentes según metodología Metrogas**

Combustible	Precio Fuente de energía (USD/Und)	Energía Bruta (kWh)	Calor aprovechado a vapor	Costo Calor USD/MWh
Petróleo Diésel	0,55	10,77	85%	53
Gas Natural	0,56	10,87	85%	54

Como tope de cantidad comercializable se ha tomado como referencia la venta de la planta WTE en Hoechst, cerca de Frankfurt, en Alemania con un parque industrial al lado, la cual contempla principalmente industria química con alta demanda de vapor. De

acuerdo al informe medioambiental del año 2016 del propietario, se indica que ha vendido 260.000 MWh de vapor. Debido a cálculos se considera un tope de 20% → aproximadamente 114.000 GWh.

El valor considerado en el modelo financiero es de 54 USD/MWh aplicando una tasa de cambio de 640 CLP/USD.

### ***Materiales reciclables***

A partir de los sistemas de pre-tratamiento descritos en secciones anteriores, es posible obtener materiales que pueden ser comercializables al ser reciclados. Lo anterior es evaluado en un escenario aparte, que diferencia al caso en que no se comercializan los materiales reciclables. Los valores utilizados en el modelo financiero, en el caso de haber más que un subtipo de material, serán el valor de compra más bajo (marcados en negrita en las tablas correspondientes).

- **Plásticos:** Los plásticos recuperados se obtienen principalmente luego de pasar por el pre-tratamiento del aplastador por impacto o tamizado. Por lo tanto este plástico se encontrará en un estado de molienda o triturado. El tipo de plástico obtenido, en su mayoría, corresponde a envases de bebidas y artículos de comida. Los precios de compra para el plástico reciclado son obtenidos de la empresa Greendot y son los que se presentan en la tabla:

**Tabla 5-22: Precio de plástico referencial reciclable, no incluye costo de retiro<sup>150</sup>.**

Plástico	Precio [CLP/kg]
PET	120
Poliestireno alta densidad	90
Poliestireno baja densidad	<b>80</b>
Stretch film	100

- **Papel:** Para este caso se obtiene, de los sistemas de pre-tratamiento, papel en forma de mezcla de distintos tipos, como se detalla en la Tabla 5-23.

**Tabla 5-23: Precio de papel reciclado, no incluye costo de retiro<sup>151</sup>**

Papel	Precio [CLP/kg]
Bobinado post consumo	1
Blanco 1 mezcla post-pre consumo	180
Blanco 2 mezcla post-pre consumo	135
Blanco 3 mezcla post-pre consumo	71
Ceresinado	1
Diario leído mezcla post-pre consumo	40
DKL-1 Pre consumo	42
Esquineros post consumo	5
Guías telefónicas granel	20

<sup>150</sup> Valores referenciales de compra de plásticos de empresa Greendot

<sup>151</sup> Valores referenciales de compra de papeles de empresa SOREPA S.A.

Mixto 2 mezcla post-pre consumo	25
OCC-2 Post consumo	42
Revistas post-pre consumo	40

- **Vidrio:** Los vidrios son obtenidos por el pre-tratamiento del aplastador de impacto y tamizado, por lo tanto este material viene en forma triturada o molida. Luego, los precios de compra son los que se muestran a continuación:

**Tabla 5-24: Precio de vidrio reciclado, sin costo de retiro<sup>152</sup>**

Vidrio	Precio [CLP/kg]	
	Cristalería Toro	Cristalería Chile
Botella entera	26	25,0
Vidrio molido	23	22,5

- **Metales:** Los metales obtenidos corresponden principalmente a latas de bebida, metales caseros y chatarra en general, entre otros tipos. Mediante los sistemas de pre-tratamiento, como la separación magnética se puede obtener fierro y hierro, mientras que por separación eléctrica se pueden obtener metales conductores, como el aluminio y cobre.

**Tabla 5-25: Precio de metal reciclado<sup>153</sup>**

Metal	Precio [CLP/kg]
Latas	600
Acero	600
Aluminio y Cobre	550

### 5.3.2 Escenarios de análisis

Para los modelos de negocio se realizan las siguientes consideraciones/exclusiones:

1. Financiamiento Público, se considera aporte del Estado sin devolución de la inversión.
2. Se consideran solo dos opciones de Propietario: Público o Privado, descartándose opción Público/Privado.
3. Propietario Público
  - Solo se evaluará una opción hipotética con propietario Público que incluye financiamiento público, contrato tipo EPC que requiere menor capacidad técnica por parte del contratante, y operación con personal propio.
4. Propietario Privado
  - Se evaluará solo la opción con financiamiento 100% Privado (30% Capital propio, 70% préstamo).

<sup>152</sup> Silva A., 2013, Modelo de negocio y evaluación técnico-económica para un emprendimiento en gestión de residuos reciclables en comunidades de la Región Metropolitana, Chile

<sup>153</sup> Valores referenciales de compra de metales de empresa COPASUR Ltda.

Se evaluaron cuatro escenarios que consideran distintos modelos de negocios, opciones con respecto a la propiedad y la forma de financiamiento del proyecto: Público, Concesión, Privado con Transferencia y Privado.

Se modelaron los resultados para obtener la tarifa de disposición por tonelada de residuos que asegure una rentabilidad dada para los distintos escenarios.

A continuación se indican en la Tabla 5-26 los escenarios que serán evaluados. El escenario de concesión representa el caso base en el análisis.

**Tabla 5-26: Matriz de resumen de escenarios de análisis**

Escenario	Propietario		Financiamiento %			TIR %	Terreno	RSD
	Público	Privado	Público	Préstamo	Capital Propio	Rentabilidad de accionista	Asegurado por Estado	Asegurado por Estado
1 – Público	X		100			6	Si	Si
2 – Concesión		X		70	30	8	Si	Si
3 – Privado con Transferencia		X		70	30	8+5*	No	Si
4 - Privado		X		70	30	8+5*	No	No

\*Se calcula la tarifa de disposición para asegurar al operador una utilidad de 8% más un 5% de riesgo

A continuación se explica y justifica cada escenario por su análisis:

- **Escenario 1, Público:** Una entidad pública será propietaria del proyecto y financiada por el Estado. El modelo de contratación será un contrato llave en mano (EPC), dado que la entidad pública no tiene la capacidad técnica para guiar el proyecto. La tarifa de disposición será determinada considerando una utilidad mínima de 6% y un nivel de ingresos que siempre permite cubrir los gastos de operación durante toda la vida útil del proyecto. Este escenario hipotético considera que el monto total de inversión se financiará con fondos públicos.
- **Escenario 2, Concesión:** Una entidad privada desarrolla el proyecto con financiamiento privado, con un 30% de capital propio y 70% financiado por bancos y/o fondos privados. El proyecto se desarrollará como concesión donde será el organismo público el que proporcione todos los antecedentes del proyecto excepto la ingeniería de detalle, permisos y estudio de impacto ambiental. Además, proporciona el terreno y asegura el suministro de los residuos. El terreno permanece como propiedad pública. Se calculará la tarifa de disposición para asegurar al concesionario una utilidad de 8%. El plazo de concesión será de 25 años.
- **Escenario 3, Privado con transferencia (BOOT en inglés Build-Own-Operate-Transfer):** Una entidad privada desarrolla el proyecto con financiamiento privado, con un 30% de capital propio y 70% financiado por bancos y/o fondos privados. El proyecto se desarrollará como BOOT donde será el organismo público el que proporcione todos los antecedentes del proyecto excepto la ingeniería de detalle,

permisos y estudio de impacto ambiental y asegura el suministro de los residuos. El privado tiene la responsabilidad de buscar y adquirir el terreno. Se calculará la tarifa de disposición para asegurar al operador una utilidad de 8% más un 5% de riesgo. El periodo de operación considerado será de 20 años desde la puesta en servicio.

- **Escenario 4, Privado (BOO en inglés Build-Own-Operate):** Una entidad privada desarrolla el proyecto con financiamiento privado, con un 30% de capital propio y 70% financiado por bancos y/o fondos privados. El proyecto se efectuará como BOO donde el privado tiene que desarrollar el proyecto completo, buscar y adquirir el terreno y asegurar el suministro de los residuos. Se calculará la tarifa de disposición para asegurar al operador una utilidad de 8% más un 5% de riesgo. El periodo de operación no está limitado. En este escenario se tiene un CAPEX mayor (~4 MM USD adicionales<sup>154</sup>) debido a la adquisición de terreno por parte del privado.

Entre los escenarios definidos se aplicarán los siguientes CAPEX en base al desglose presentado en sección 5.2.2.

**Tabla 5-27: Definición CAPEX por escenario**

Escenario [USD]	Costos de Desarrollo	Planta WTE	Contingencias	CAPEX Modelo	Costos por Terceros
<b>1 – Público</b>	8.584.375	181.500.000	12.862.656	<b>202.947.031</b>	0
<b>2 – Concesión</b>	1.643.828	181.500.000	11.575.000	<b>194.718.828</b>	8.228.203
<b>3 – Privado con Transferencia</b>	5.628.203	181.500.000	11.575.000	<b>198.703.203</b>	4.243.828
<b>4 - Privado</b>					

Se han separado los costos de la misma forma que el desglose del CAPEX presentado anteriormente. Los costos de desarrollo se refieren al costo para ingeniería, terreno, EIA y sus contingencias relacionadas dependiendo del escenario. Es decir, que los costos de desarrollo del proyecto en los escenarios 2, 3 y 4 no incluyen el costo de la contraparte de la licitación, quien tiene que preparar el proyecto hasta la licitación. Además, se excluye el costo del terreno asumiendo que éste se entrega al concesionario en el escenario 2.

En la última columna se desglosa el presupuesto requerido para desarrollar los antecedentes para licitar el proyecto y el seguimiento durante la implementación de la planta. Estos costos no están cubiertos por el financiamiento privado en el caso de los escenarios 2, 3 y 4.

<sup>154</sup> Valor del terreno depende del lugar en que se ubique la planta.

### 5.3.3 Metodología de análisis de sensibilidad

Para la definición de un modelo de negocios viable, se deben identificar las variables de riesgo claves que pueden influir en la factibilidad a largo plazo de un proyecto WTE. Estas variables obedecen tanto a cambios en el mercado como a cambios en la composición de la basura utilizada para generación. A continuación, se presentan las variables principales consideradas en el análisis de sensibilidad del modelo de negocios:

- **Poder calorífico de residuos:** Potencial de generación de calor de los residuos disponibles para el funcionamiento de la planta.
- **Precio de la energía eléctrica:** Precio de venta de la energía en el mercado spot en el Sistema Eléctrico Nacional.
- **Precio de la calefacción:** Precio de venta de calefacción distrital generada por la planta WTE que se distribuye para uso industrial, viviendas, etc.
- **Precio del vapor:** Precio de venta del vapor generado por la planta WTE que se comercializa en el mercado.
- **Precio de residuos reciclables:** Precio de venta de los residuos reciclables que reciba la planta y mantenga fuera del proceso térmico para su comercialización.
- **Costo de inversión (CAPEX):** Costo total de inversión para desarrollar el proyecto WTE, desde su diseño hasta su construcción.
- **Tasa de interés:** Tasa de interés del crédito que influye parcialmente en el costo del financiamiento total de la planta WTE.

Adicional a las anteriores se realizaron análisis a otras 12 variables. Los distintos análisis de sensibilidad serán realizados considerando una variación porcentual en cada variable de  $\pm 5\%$  evaluando su impacto. Los resultados más significativos se muestran en el capítulo 5.3.5. Los resultados completos con los análisis de sensibilidad, incluyendo otras variables, están disponibles en el Anexo L.

Una vez finalizado el proceso de análisis de sensibilidad se evaluará de forma independiente el impacto de los tres tamaños de planta previamente definidos, para demostrar el efecto o impacto de las economías de escala con respecto a la capacidad instalada.

### 5.3.4 Principales inputs y supuestos

La metodología de cálculo de resultados se basa en los siguientes supuestos y definiciones:

- **Datos de RSD:** de los nueve escenarios de generación de RSD definidos en el objetivo 1 de este estudio, se han elegido los escenarios pesimistas, medio y optimista con respecto al poder calorífico al año 2050, para incorporar el efecto de reciclaje y crecimiento poblacional en la evaluación.
- **Precios y tasas de recuperación de materiales recuperables:** los precios de recuperación de cada material utilizados, junto a sus respectivas fuentes, se presentan en el capítulo 5.3.1 del presente informe. Las tasas de recuperación de

cada material fueron elaboradas por el consultor en base a experiencias en proyectos anteriores de plantas WTE.

- **Tarifa de disposición:** la tarifa de disposición de una planta WTE, considerando que son contratos de largo plazo (20 o 25 años usualmente), debe contar con algún mecanismo de indexación, para este estudio se ha asumido una tasa de crecimiento de esta tarifa del 1% anual fijo durante el periodo de estudio.
- **Tipos de cambio:** para todos los efectos de conversión de la planilla utilizada, se utilizó un tipo de cambio de \$640 pesos por dólar, principalmente para efectos de cálculo del precio de recuperación de materiales de reciclaje y precios de vapor y calor. Todos los valores utilizados están en USD.
- **Generación de energía:** se han analizado 3 escenarios de comercialización de productos generados por la combustión de los RSD, energía eléctrica, calor y vapor. Dependiendo de la combinación con la generación eléctrica se ha castigado la eficiencia en producción de electricidad, es decir, la generación eléctrica es menor cuando se produce en paralelo calor o vapor.
- **Gastos OPEX:** los gastos de OPEX están resumidos en una hoja separada e indican los gastos de recursos humanos, consumibles, mantenimientos anuales, menores y mayores considerando los periodos definidos anteriormente y costos para la deposición final de los residuos de procesos. Los gastos de personal empiezan a correr en el tercer año, asumiendo la capacitación del equipo durante la fase de comisionamiento de la planta. El costo anual de OPEX asciende a 9,27 millones de dólares que comienza desde el último año de construcción para labores de capacitación y entrenamiento del personal, así como de implementación de las actividades de operación de la planta, a partir del año siguiente, se asume un ajuste por inflación promedio de un 1% anual.
- **Revalorización del terreno:** considerando que la instalación de una planta WTE en un determinado lugar genera un polo de desarrollo industrial, comercial o residencial dependiendo del tipo de planta y de los instrumentos de planificación territorial vigentes, el valor contable del terreno para efectos de balances financieros deben considerar esa revalorización, para esto se ha definido una revalorización positiva del terreno de un 1% anual.
- **Utilidad del operador:** se ha definido un valor mínimo de utilidad para los diferentes modelos de contratación, con la cual luego se calcula la tarifa de disposición necesaria para cumplir esta meta comercial. El porcentaje considerado para cada escenario se presenta en el capítulo 5.3.2 del presente informe.
- **Precio electricidad:** se ha calculado cada escenario de comercialización y cada escenario de poder calorífico con tres escenarios de evolución de precio de energía eléctrica. Estos precios fueron ingresados por el consultor en base a su modelo del mercado eléctrico chileno BID3 presentado en el capítulo 5.3.1, considerando un escenario de nivel de precios altos, medios y bajos de la electricidad.
- **Precio vapor:** se ha utilizado el valor presentado en la tabla 5-21 del capítulo 5.3.1 correspondiente al menor Costo Vapor de 54,0 USD/MWh.
- **Precio calor:** se ha utilizado el valor presentado en la tabla 5-20 del capítulo 5.3.1 correspondiente al menor Costo Calor de 87,5 USD/MWh.

- Periodo de construcción: se ha asumido un periodo de construcción (y desembolso de créditos de proyecto) de dos años y un año de comisionamiento y puesta en servicio con una distribución de gastos de 40%, 40% y 20% en respectivos los años.
- Condiciones de préstamo: las condiciones del préstamo en caso de ser privado está asumido con 6% de interés y pagable en 20 años. Para mantener un flujo de caja positivo en todos los escenarios, se asumen préstamos a la misma tasa en los periodos que son necesarios. El repago de estos préstamos adicionales no pasarán más allá del periodo de repago de la deuda principal (20 años desde la entrada en servicio de la planta, excluyendo los años de construcción).
- Impuesto: Se ha aplicado la tasa de impuestos vigente en Chile del 27%.
- Depreciación: La depreciación de los activos se realizó linealmente y se fija a un 5% anual, considerando que el activo fijo se compone de obras civiles y maquinaria. De esta forma, se deprecia completamente en 20 años, conforme a lo dispuesto por el Servicio de Impuestos Internos de Chile (SII) en cuanto a la depreciación de maquinaria para efectos de cálculo de depreciación tributaria.
- Tasa Interna de Retorno (TIR): La tasa utilizada para el modelamiento de cada escenario corresponde a la denominada TIR de los accionistas, referido al retorno sobre la inversión que realizan éstos (capital propio o *equity*).
- En cada escenario se presenta en una hoja de financiamiento, de activos, de estados resultados, de balance, de caja, de generación (Gx) que representa la generación y O&M.

Los resultados con mayor detalle, así como también las planillas de cálculo utilizadas para alcanzar estos resultados, se encuentran disponibles en el Anexo L.

### 5.3.5 Resultados

#### 5.3.5.1 Propiedad Pública – Financiamiento Público

A continuación se presentan los resultados del Escenario 1, considerando los distintos escenarios del precio de la electricidad, opciones de comercialización de energía y los escenarios de crecimiento de población en conjunto con la penetración de reciclaje de acuerdo a los escenarios elaborados en etapa 1 de este estudio. En este caso se ha calculado la tarifa de disposición asumiendo que el proyecto tiene una rentabilidad de 6% sobre el costo total del proyecto.

**Tabla 5-28: Resultados Escenario 1, capacidad 330.000 ton/año**

Escenario Público (TIR 6%)	Precio Energía	Tarifa de Disposición USD/ton		
		<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC3</i>
Solo electricidad	Bajo	<b>68,85</b>	68,41	67,95
	Medio	46,36	<b>45,54</b>	44,69
	Alto	27,25	26,08	<b>24,87</b>

Electricidad y Vapor	Bajo	<b>52,39</b>	51,68	50,94
	Medio	36,73	<b>35,76</b>	34,74
	Alto	22,55	21,30	<b>20,00</b>
Electricidad y Calor	Bajo	<b>51,72</b>	51,03	50,32
	Medio	35,47	<b>34,48</b>	33,45
	Alto	21,89	20,66	<b>19,39</b>

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo– reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

### 5.3.5.2 Propiedad Privada – Financiamiento Privado

A continuación se presentan los resultados del Escenario 2, **Concesión**, considerando los distintos escenarios del precio de la electricidad, opciones de comercialización de energía y los escenarios de crecimiento de población en conjunto con la penetración de reciclaje de acuerdo a los escenarios elaborados en la Etapa 1 de este estudio. La tarifa de disposición se ha definido en base de una rentabilidad (TIR) de 8% sobre la inversión del accionista del concesionario. El CAPEX considerado corresponde a un contrato EPC, sin los gastos que corren por la contraparte del concesionario.

**Tabla 5-29: Resultados Escenario 2, capacidad 330.000 ton/año**

Escenario Concesión (TIR 8%)	Precio Energía	Tarifa de Disposición USD/ton		
		PC1	PC2	PC3
Sólo electricidad	Bajo	<b>66,68</b>	66,29	65,89
	Medio	44,61	<b>43,90</b>	43,16
	Alto	25,86	24,87	<b>23,84</b>
Electricidad y Vapor	Bajo	<b>50,59</b>	50,00	49,39
	Medio	34,78	<b>33,92</b>	33,03
	Alto	21,37	20,31	<b>19,20</b>
Electricidad y Calor	Bajo	<b>49,12</b>	48,27	47,64
	Medio	33,19	<b>32,34</b>	31,44
	Alto	19,49	18,42	<b>17,31</b>

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo – reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

La tarifa de disposición de ese proyecto sería 43,9 USD/ton para un precio medio de energía eléctrica, que corresponde a 157% más que el costo promedio de la tarifa de disposición actual en la RM.

A continuación se presentan los resultados del Escenario 3, **Privado con Transferencia**, considerando los distintos escenarios del precio de la electricidad, opciones de

comercialización de energía y los escenarios de crecimiento de población en conjunto con la penetración de reciclaje de acuerdo a los escenarios elaborados en la Etapa 1 de este estudio. La tarifa de disposición se ha calculado con una rentabilidad mínima de 13% (8% escenario anterior más 5% de premio por riesgo). El CAPEX considerado corresponde a un contrato EPC, sin los gastos que corren por la contraparte del contratista BOOT.

**Tabla 5-30: Resultados Escenario 3, capacidad 330.000 ton/año**

Escenario Privado con Transferencia (TIR 8%+5%)	Precio Energía	Tarifa de Disposición USD/ton		
		PC1	PC2	PC3
Sólo electricidad	Bajo	<b>85,89</b>	85,60	85,30
	Medio	65,14	<b>64,56</b>	63,95
	Alto	46,59	45,81	<b>44,99</b>
Electricidad y Vapor	Bajo	<b>70,34</b>	69,86	69,64
	Medio	55,35	<b>54,67</b>	53,96
	Alto	41,89	41,04	<b>40,15</b>
Electricidad y Calor	Bajo	<b>67,60</b>	67,34	66,79
	Medio	52,65	<b>51,96</b>	51,24
	Alto	39,16	38,29	<b>37,38</b>

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo – reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

A continuación se presentan los resultados del escenario 4, **Privado**, considerando los distintos escenarios del precio de la electricidad, opciones de comercialización de energía y los escenarios de crecimiento de población en conjunto con la penetración de reciclaje de acuerdo a los escenarios elaborados en la Etapa 1 de este estudio. La tarifa de disposición se ha calculado con una rentabilidad mínima de 13% para una operación indefinida del proyecto (8% más 5% de premio por riesgo). El CAPEX considerado corresponde a un contrato EPC, sin los gastos que corren por la contraparte del contratista BOO. Para motivos prácticos se ha limitado la evaluación económica hasta el horizonte de este estudio, es decir, hasta el año 2050.

**Tabla 5-31: Resultados Escenario 4, capacidad 330.000 ton/año**

Escenario Privado (TIR 8%+5%)	Precio Energía	Tarifa de disposición USD/ton		
		PC1	PC2	PC3
Sólo electricidad	Bajo	<b>81,24</b>	80,92	80,58
	Medio	60,15	<b>59,79</b>	59,02
	Alto	41,67	40,79	<b>39,88</b>
Electricidad y Vapor	Bajo	<b>65,47</b>	64,93	64,36
	Medio	50,36	<b>49,61</b>	48,82
	Alto	37,15	36,21	<b>35,23</b>

Electricidad y Calor	Bajo	<b>63,16</b>	62,60	62,03
	Medio	48,07	<b>47,31</b>	46,51
	Alto	34,58	33,63	<b>32,64</b>

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo – reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

### 5.3.5.3 Resumen de resultados

En la Tabla 5-32 se presenta una comparación entre todos los escenarios analizados. Se indica el rango de las tarifas de disposición calculadas para que cada escenario cumpla con sus requisitos. En el escenario uno, que es el único con propiedad pública, se pueden observar valores entre 19,39 hasta 68,85 USD/ton. El valor de la tarifa de disposición esperado en el escenario más probable (comercialización solo electricidad a precio medio con poder calorífico medio) sería de 45,54 USD/ton.

En los otros escenarios de propiedad privada resultó un rango de tarifas de disposición esperadas de 17,31 USD/ton hasta 85,89 USD/ton. El valor de la tarifa de disposición esperado en el escenario más probable (concesión con financiamiento privado, comercialización sólo electricidad a precio medio con poder calorífico medio) sería de 43,90 USD/ton. Estas mayores tarifas de disposición se pueden explicar por los costos adicionales del financiamiento y los objetivos comerciales del privado para justificar su inversión reflejada en los retornos exigidos.

**Tabla 5-32: Comparación de escenarios considerando poder calorífico de los RSD y precio de energía medio**

Escenario	Ingresos	Tarifa de disposición USD/ton
1) Público	Electricidad	45,54
	Electricidad y Vapor	35,76
	Electricidad. y Calor	34,48
2) Concesión	Electricidad	43,90
	Electricidad y Vapor	33,92
	Electricidad. y Calor	32,34
3) Privado con Transferencia	Electricidad	64,56
	Electricidad y Vapor	54,67
	Electricidad. y Calor	51,96
4) Privado	Electricidad	59,79
	Electricidad y Vapor	49,61
	Electricidad. y Calor	47,31

#### 5.3.5.4 Análisis de economía de escala

Con el objetivo de evaluar el efecto de la economía de escala mencionado anteriormente se ha evaluado el Escenario 2 de Concesión como caso de base con los otros tamaños de plantas aplicando los mismos criterios y supuestos con datos para capacidades de 150.000 ton/año (Tabla 5-33) y 1.000.000 ton/año (Tabla 5-34). A continuación se presentan los resultados:

**Tabla 5-33: Resultados escenario 2 – 150.000 ton/año**

Escenario Concesión (TIR 8%) 150,000 ton/año	Precio Energía	Tarifa de disposición USD/ton		
		PC1	PC2	PC3
Sólo electricidad	Bajo	<b>98,14</b>	97,78	97,40
	Medio	76,47	<b>75,76</b>	75,02
	Alto	57,09	56,29	<b>55,25</b>
Electricidad y Vapor	Bajo	<b>82,29</b>	81,67	81,03
	Medio	66,39	<b>65,51</b>	64,60
	Alto	52,74	51,68	<b>50,58</b>
Electricidad y Calor	Bajo	<b>80,44</b>	79,83	79,19
	Medio	64,74	<b>63,86</b>	62,95
	Alto	51,15	50,10	<b>49,01</b>

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo – reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

**Tabla 5-34: Resultados escenario 2 – 1.000.000 ton/año**

Escenario Concesión (TIR 8%) 1 Mill ton/año	Precio Energía	Tarifa de disposición USD/ton		
		PC1	PC2	PC3
Sólo electricidad	Bajo	<b>44,18</b>	43,81	43,44
	Medio	22,24	<b>21,53</b>	20,80
	Alto	3,42	2,43	<b>1,39</b>
Electricidad y Vapor	Bajo	<b>28,11</b>	27,51	26,88
	Medio	12,43	<b>11,58</b>	10,68
	Alto	-1,15	-2,21	<b>-3,32</b>
Electricidad y Calor	Bajo	<b>26,58</b>	25,96	25,32
	Medio	10,79	<b>9,93</b>	9,03
	Alto	-2,79	-3,85	<b>-4,96</b>

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo – reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

En la Tabla 5-35 se presenta el rango de la tarifa de disposición esperada para los distintos tamaños evaluados atendiendo a los escenarios de precio de electricidad bajo, medio y alto. Los resultados van desde 49,01 USD/ton hasta 98,14 USD/ton para una capacidad de 150.000 ton/año, de 17,31 USD/ton hasta 66,68 USD/ton para una capacidad de 330.000 ton/año y de -4,96USD/ton hasta 44,18 USD/ton para una capacidad de 1.000.000 ton/año. A partir de lo anterior, a medida que la capacidad de la planta aumenta, la tarifa de disposición que puede ser cobrada para alcanzar la rentabilidad necesaria, es menor, lo cual explica que para los casos de precio de venta de energía alto y comercialización de vapor o calor se obtengan precios negativos, sin embargo, estos precios obedecen a que la optimización busca el costo de disposición a partir de una TIR dada.

Por lo tanto, hay economías de escala para una planta de 1 millón de ton/año, en este caso la tarifa de disposición sería cercana a la actual (21,53 US\$/ton). Por el contrario, plantas de pequeña capacidad están lejos de poder cobrar bajas tarifas de disposición.

**Tabla 5-35: Resumen de tarifas de disposición por tamaño de planta en Escenario 2, Concesión**

Capacidad	Ingresos	Tarifa de disposición USD/ton		
		PC1	PC2	PC3
150.000 ton/año	Electricidad	57,09 - 98,14	56,29 - 97,78	55,25 - 97,4
	Elec. y Vapor	52,74 - 82,29	51,68 - 81,67	50,58 - 81,03
	Elec. y Calor	51,15 - 80,44	50,10 - 79,83	49,01 - 79,19
300.000 ton/año	Electricidad	25,86 - 66,68	24,87 - 66,29	23,84 - 65,89
	Elec. y Vapor	21,37 - 50,59	20,31 - 50,00	19,2 - 49,39
	Elec. y Calor	19,49 - 49,12	18,42 - 48,27	17,31 - 47,64
1.000.000 ton/año	Electricidad	3,42 - 44,18	2,43 - 43,81	1,39 - 43,44
	Elec. y Vapor	-1,15 - 28,11	-2,21 - 27,51	-3,32 - 26,88
	Elec. y Calor	-2,79 - 26,58	-3,85 - 25,96	-4,96 - 25,32

PC: Escenario de poder calorífico de los RSD

PC1: PIB bajo – reciclaje optimista

PC2: PIB medio – reciclaje medio

PC3: PIB alto – reciclaje pesimista

### 5.3.5.5 Análisis de modo de contratación (EPC vs. EPCM)

Con el objetivo de analizar el impacto entre el modelo de contratación EPC y EPCM de la ejecución de la construcción y montaje de una planta WTE, se ha modelado la tarifa de disposición en el Escenario 2 con ambos contratos para una planta de capacidad 330.000 ton/año. Se puede observar que la tarifa de disposición utilizada en el contrato EPCM es más bajo debido a que el costo del contrato de construcción es menor ya que el contratista no asume riesgo. Estos modelos de contrato se recomiendan sólo cuando se cuenta con la experiencia y/o el conocimiento de la tecnología a implementar. La diferencia de costos se detalla en la tabla Tabla 5-36.

**Tabla 5-36: Diferencia de costos involucrados en modo de contratación EPC vs EPCM**

EPC [MMUSD]	EPCM [MMUSD]
194.718.828	184.467.578

**Tabla 5-37: Resumen de resultados comparativos de modo de contratación, para un precio de electricidad medio**

Escenario Concesión	Tarifa de disposición USD/ton	
	EPC	EPCM
Sólo electricidad	43,90	40,21
Electricidad y Vapor	33,92	30,20
Electricidad y Calor	32,34	28,58

### 5.3.5.6 Análisis de reciclaje en planta

A modo de ejemplo se hizo un análisis de incorporar sistemas de pre-tratamiento con mayor eficiencia en recuperación de materiales reciclables. Para esta evaluación se ha aumentado el CAPEX por el costo de los equipamientos necesarios en base de cotizaciones separadas, con lo que el CAPEX adicional es de 15 MMUSD. Además, se han aplicado porcentajes de recuperación de diferentes materiales seleccionados y al final vendido a los precios determinados anteriormente.

En base de estos supuestos se ha calculado nuevamente la tarifa de disposición necesaria para cumplir con las metas comerciales del concesionario en el caso del escenario 2 aplicado en este ejemplo para una planta de capacidad 330.000 ton/año. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 5-38 y se puede observar que en cada escenario analizado la tarifa de disposición es mayor que la tarifa calculada sin pre-tratamiento adicional e ingresos adicionales por venta de material reciclable. El incremento en la tarifa de disposición es entre 20% y 37%. Por lo tanto, se puede concluir que la inversión adicional con la situación del mercado actual en la Región Metropolitana no se justifica.

**Tabla 5-38: Resumen de resultados comparativos con y sin reciclaje, para un precio de electricidad medio**

Escenario Concesión	Tarifa de disposición USD/ton	
	Sin reciclaje	Con reciclaje
Sólo electricidad	43,90	52,70
Electricidad y Vapor	33,92	45,44
Electricidad y Calor	32,34	44,41

### 5.3.5.7 Análisis de reutilización ceniza de fondo

Se realizó un análisis de incorporar la comercialización de las cenizas de fondo para construcción. En este análisis, la ceniza es reutilizada como material para la construcción, no generándose un ingreso por esta transferencia ya que se hace a costo cero. Por otro

lado no, se tiene que considerar el costo para su disposición final en relleno sanitario, reduciendo el OPEX. Para esta evaluación no se requiere CAPEX adicional.

En base de estos supuestos se ha calculado la tarifa de disposición necesaria para cumplir con las metas comerciales del concesionario en el caso del escenario 2 aplicado en este ejemplo para una planta de capacidad 330.000 ton/año. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 5-39 y se puede observar que en cada escenario de reutilización de ceniza analizado la tarifa de disposición es un 12% a 16% menor.

**Tabla 5-39: Resumen de resultados comparativos según el destino de cenizas de fondo, para un precio de electricidad medio**

Escenario Concesión	Tarifa de disposición USD/ton	
	Cenizas a relleno sanitario	Reutilización de cenizas
Sólo electricidad	43,90	38,51
Electricidad y Vapor	33,92	28,57
Electricidad y Calor	32,34	27,04

### 5.3.5.8 Evaluación venta de energía con PPA

Como un escenario adicional se evaluó la opción de la comercialización solo de energía eléctrica en un PPA preferente donde se garantice que el precio de la tarifa de disposición se mantendrá en las condiciones actuales (~17,06 USD/ton) en cuyo caso el PPA requerido sería de 114,0 USD/MWh. Este cálculo se ha realizado en el escenario 2 de concesión para una planta de capacidad 330.000 ton/año, para un poder calorífico medio de los RSD.

### 5.3.5.9 Evaluación de distintos modelos de depreciación

Se ha realizado una comparación considerando dos escenarios de depreciación, a 20 y a 50 años, para observar el efecto en el modelo de estas opciones principalmente referente a su impacto en términos tributarios. La depreciación a 20 años corresponde a la señalada por el Servicio de Impuestos Internos de Chile para depreciar, tributariamente, este tipo de activos, como la planta de generación. Aun así, este organismo puede eventualmente considerar aceptar luego de una solicitud formal del contribuyente una depreciación a más largo plazo, en este caso 50 años, correspondiente a la depreciación financiera, debido a que el activo aumenta su vida útil conforme a las mantenciones y mejoras mayores que se realicen en él. Es por esto que ambas opciones pueden ser una realidad en el desarrollo del proyecto, razón por la que se quiere observar el impacto efectivo de cada una.

Considerando estos dos escenarios de depreciación, a 20 y a 50 años, se observan distintas tarifas de disposición que impactan en el modelo de negocio. La depreciación afecta el nivel de utilidad que se registra a nivel de Estados de Resultados, por lo que impacta de manera directa en la evaluación. Se observa que a mayor porcentaje de depreciación considerado, menor es la tarifa de disposición calculada. A continuación, se presentan ambos escenarios de depreciación, observando el impacto que tienen en la tarifa de disposición esta variable en el escenario 2.

**Tabla 5-40: Comparación de Tarifas de disposición con distintos modelos de depreciación, para un precio de electricidad medio**

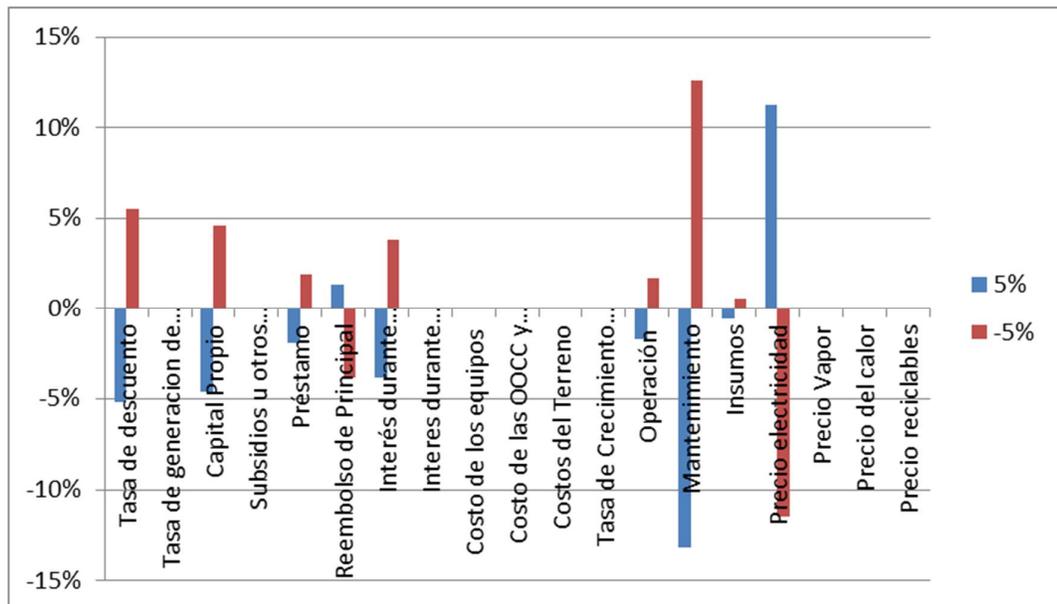
Escenario Concesión	Tarifa de disposición USD/ton	
	Depreciación 5% anual	Depreciación 2% anual
Sólo electricidad	43,90	49,01
Electricidad y Vapor	33,92	38,91
Electricidad y Calor	32,34	37,45

De forma adicional se ha revisado la variación en el escenario 3, para evaluar los efectos del cambio de la depreciación en un escenario Privado con Transferencia, obteniendo una variación porcentual similar al escenario 2.

### 5.3.5.10 Análisis de Sensibilidad

Se ha elaborado un análisis de sensibilidad para todos los escenarios evaluados. A continuación se presenta a modo de ejemplo el análisis del escenario 2. Los análisis de sensibilidad de los otros escenarios se encuentran disponibles dentro del Anexo L.

En la Figura 5-29 se muestra el análisis de sensibilidad del escenario 2, comercializando solo energía eléctrica a precio medio. Es posible observar que los parámetros más sensibles son los costos de mantenimiento y el precio de la electricidad. Es decir, que un 5% de variación de este valor impacta aprox. un 13% al VAN. Esta tendencia se mantiene en los otros escenarios de comercialización donde se agrega el valor de venta de calor y vapor respectivamente.

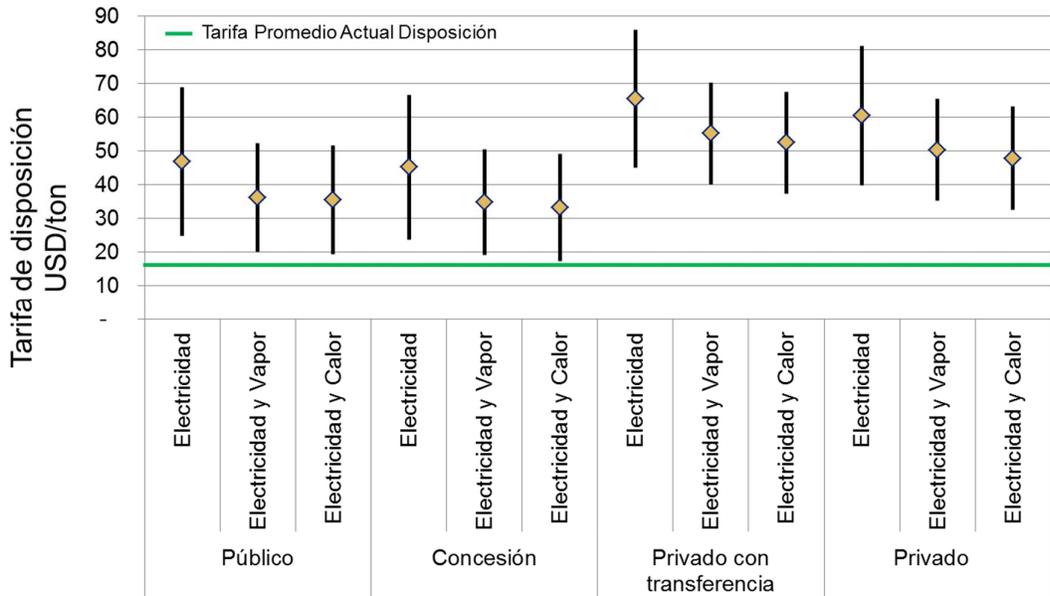


**Figura 5-29: Análisis de sensibilidad de escenario 2 – comercialización solo con electricidad**

### 5.3.5.11 Resumen resultados

A continuación se presenta un resumen de los resultados de la evaluación técnica–económica.

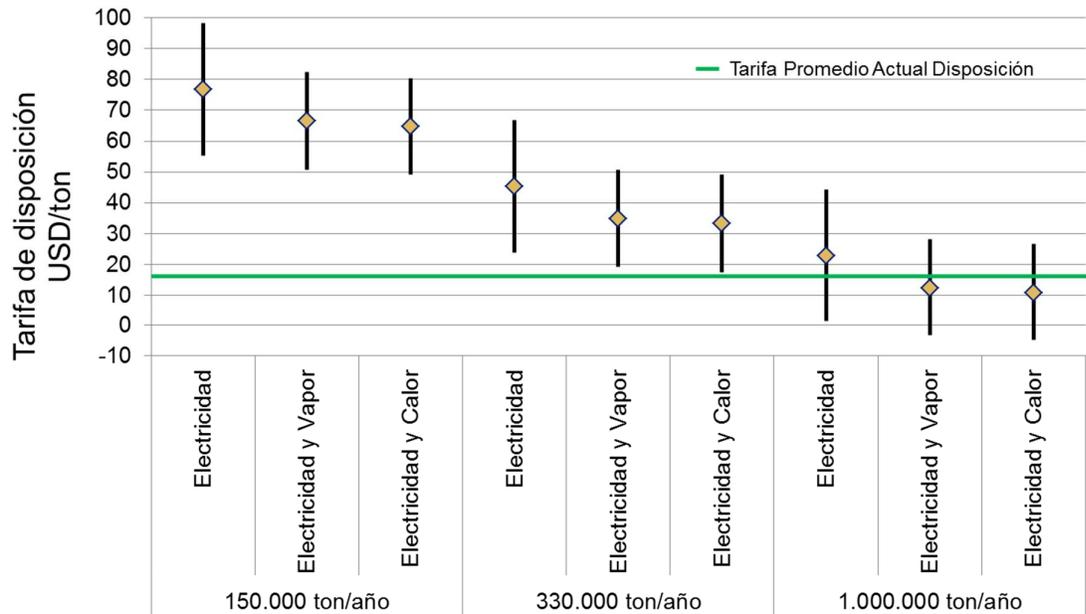
En base de las opciones de modelos de negocio, precios de comercialización de productos de la planta, propiedad de proyecto y la forma de financiamiento, se han definido cuatro escenarios de evaluación. En la siguiente figura se presentan las tarifas de disposición para cumplir con las metas económicas–comerciales de cada escenario, aplicando tres escenarios de poder calorífico de los RSD (mínimo, medio, máximo) con el crecimiento poblacional, tres escenarios sobre el precio de energía eléctrica y finalmente tres opciones de comercialización de la energía producida en la planta, resultando en 27 cálculos en cada escenario, más dos tamaños de plantas adicionales para el escenario de Concesión. Las sensibilidades en general se han limitado al caso de base para evaluar el posible impacto.



**Figura 5-30: Rango de tarifas de disposición por escenario [USD/ton]**

En la Figura 5-30 se observa que el Escenario 1 Público y el Escenario 2 de Concesión son más favorables dado que tienen objetivos económicos (TIR) más bajos que los otros escenarios. Además, los cálculos bajo condiciones optimistas dan resultados en un rango similar que el costo promedio actual de disposición en relleno sanitario.

El Escenario Público es un caso hipotético que demuestra la opción de un proyecto 100% desarrollado por una entidad pública. Entre los distintos modelos de contratación el esquema BOOT, o “Privado con Transferencia”, aunque es lo menos riesgoso para la entidad pública, es la alternativa más costosa y refleja el precio de transferencia del riesgo al privado. El modelo BOO, o “Privado”, resulta ligeramente menos costoso que el Privado con Transferencia porque la propiedad no se transfiere y la duración de operación no está limitada. Además se puede observar que la comercialización de solamente electricidad es más cara que cuando se puede vender adicionalmente calor o vapor.



**Figura 5-31: Rango de tarifas de disposición y economía de escala por tamaño de planta en Escenario Concesión 2 [USD/ton]**

La Figura 5-31 presenta la comparación del Escenario 2 de Concesión con diferentes tamaños/capacidades de planta. Cabe destacar que la economía de escala con respecto a la capacidad de la planta tiene un mayor impacto que el modelo de contratación o la forma de financiamiento. Esta observación coincide con los análisis realizados en otros países que optaron por construir una gran planta como primera planta en las ciudades (México, Estambul y Singapur).

En el conjunto de resultados se ha analizado la sensibilidad de 18 parámetros para verificar el impacto en caso de cambios de +/- 5%. Entre ellos se ha podido concluir lo siguiente:

- El modelo propiedad/financiamiento público/público es un caso hipotético debido a la baja capacidad financiera de los municipios. Los resultados bajo este esquema y la utilidad mínima definida resultan en tarifas de disposición similares al modelo de concesión. Sin embargo, solo el costo mínimo bajo condiciones optimistas resulta en costos similares al costo actual de disposición en relleno sanitario.
- Dentro de los modelos privados con financiamiento privado, la concesión es la opción más competitiva a nivel de la tarifa de disposición resultante en niveles similares que el modelo público (tarifa de disposición media de 37,59 USD/ton), incluso con una menor tarifa de disposición que el costo actual en condiciones muy favorables, principalmente producto de la TIR objetivo definida.
- En las sensibilidades se ha mostrado que la comercialización de energía eléctrica sola es menos rentable en comparación a cuando se pueden vender productos secundarios como calor o vapor industrial. La reducción en promedio es un 21%. Por lo tanto, es favorable si futuros proyectos WTE puedan ser ubicados cerca de consumidores de vapor o calor, lo que permitiría comercializar estos productos a una tarifa competitiva.

- Los modelos privados bajo esquemas Privado con Transferencia (BOOT) o Privado (BOO) con financiamiento privado requieren una tarifa de disposición mucho mayor para ser rentables, debido al premio por riesgo incluido en la TIR objetivo. Los resultados bajo este esquema tienen una tarifa de disposición en el rango de 37,38 USD/ton hasta 85,89 USD/ton.

### 5.3.6 Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones en cuanto al objetivo 4, estudio de factibilidad de la solución tecnológica seleccionada para implementar en la RM y proponer distintos escenarios y sus modelos de negocio.

En la evaluación de las tecnologías en la condición actual de madurez tecnológica, resultó como tecnología más adecuada la combustión de parrilla para el desarrollo del primer proyecto WTE en la RM. Esta conclusión coincide con desarrollos actuales y comparables en países como Turquía, Singapur y México donde se encuentran en construcción las primeras plantas de aprovechamiento energético en base de RSD, todas con esta tecnología.

Además, se ha aplicado la metodología de evaluación definida por GIZ en su informe sobre WTE, la cual aplica 12 criterios de evaluación entre las diferentes tecnologías, concluyendo igualmente que combustión de parrilla es la tecnología más adecuada para el desarrollo del primer proyecto WTE en la RM. Sin embargo, esta evaluación también ha demostrado que todavía falta avanzar en el desarrollo del mercado de residuos reciclables en la RM, mejorar las condiciones de mercado y disposición final de los residuos, así como la gestión del acceso de los usuarios de calor y vapor.

Para el caso de las tecnologías de gasificación, considerando su punto de desarrollo actual, en un eventual proceso de licitación para la implementación de una planta de este tipo en la RM no es aconsejable descartar esta tecnología, sin embargo, se deben considerar los requisitos de experiencia en plantas en operación para los distintos oferentes dentro del proceso de evaluación.

Basándose en esta evaluación se ha avanzado con el desarrollo de una solución en base de combustión de parrilla para la evaluación técnica-económica. Las características principales de la planta propuesta son las siguientes:

- Capacidad de tratamiento de RSD: 330.000 ton/año, para aprovechar alguna economía de escala en comparación con plantas de menor capacidad. Corresponde a aproximadamente al 10% de los RSD de la RM el 2015, de una potencia eléctrica entre 20 y 29 MW<sup>155</sup>, que utilizaría una superficie de 8 hectáreas.
- Pre-tratamiento mínimo, solo se retiran los elementos de sobre tamaño con las grúas de la planta.
- Sistema de tratamiento de gases de combustión que cumple con la norma más exigente entre el Decreto Supremo 29/2013 del Ministerio de Medio Ambiente chilena, el Plan de Descontaminación de la RM y la norma europea para plantas WTE.
- Turbina de vapor de alta presión.

<sup>155</sup> El rango de potencia se debe a si la planta comercializa solo electricidad, o también calor o vapor.

En base de estas características se ha elaborado el costo de inversión en mayor detalle para dos modelos de contratos, indicando el rango mínimo y máximo del CAPEX, resultando en costos de 191,3 MUSD a 202,9 MM USD, incluyendo contingencias. De la misma manera se han definido los costos de operaciones, incluyendo costos de personal, mantenimientos menores y mayores durante el periodo de funcionamiento, insumos y los costos de disposición final de las cenizas. Dependiendo de la capacidad de la planta el OPEX es de 3,51% a 7,08% del CAPEX (para una planta de 1 millón de toneladas anuales y 150.000 ton anuales respectivamente).

De la evaluación técnica-económica de los escenarios podemos concluir:

- Los costos de disposición de los residuos en una planta de 330.000 ton/año son mayores al costo actual de disposición en los rellenos sanitarios de la RM. Por lo tanto, los escenarios y modelos de negocios analizados no son económicamente factibles bajo las condiciones del mercado actuales.
- Los costos de disposición de los residuos en una planta de 1.000.000 ton/año son competitivos con los costos actuales de disposición en relleno sanitario, a excepción de los escenarios de precio bajo de la energía y poder calorífico bajo. Dependiendo de la ubicación podría significar ahorros a los costos actuales de disposición y transporte de residuos, significando una alternativa factible para la RM.
- Los modelos de comercialización que incluyen venta de calor o vapor en todos los escenarios tienen tarifas de disposición menores, aumentando la factibilidad económica. Por lo que la selección de la ubicación idealmente debe considerar la existencia de demanda de estos servicios.
- La inclusión de sistemas de pre-tratamiento dentro de la planta WTE para recuperar mayor cantidad de materiales reciclables económicamente no es rentable. El mercado de materiales reciclables en Santiago no justifica la inversión adicional para extraer estos materiales. El reciclaje es más eficiente cuando es realizado en origen.
- Las proyecciones de generación y composición de residuos al año 2050 según los distintos escenarios de crecimiento poblacional y penetración de reciclaje, tiene bajo impacto en la evaluación económica. Esto se debe a que por una parte la cantidad tratada en la planta corresponde a 10% de todos los RSD generados en la RM, y a que el efecto del reciclaje en el poder calorífico de los residuos no es tan significativo.
- Uno de los parámetros más importantes es el precio de venta de energía eléctrica por la rentabilidad y también para las condiciones de financiamiento del proyecto. En la experiencia del consultor es casi imposible, o sólo bajo condiciones desfavorables, financiar un proyecto sin un contrato de venta de energía garantizada. Por lo tanto, se estima crucial para este tipo de proyecto que se pueda lograr firmar algún PPA (*Power Purchase Agreement*) idealmente con una entidad pública o una empresa estatal como gran consumidor.
- Al analizarse la opción de concesión donde se busque mantener los niveles actuales de costos de disposición ofreciendo un PPA preferente, se obtiene un

PPA de 114,0 USD/MWh que es alto respecto al mercado actual, pero podría ser factible para permitir el financiamiento del proyecto.

- La tarifa de disposición de un proyecto WTE es más alta que la tarifa de un relleno sanitario porque se hace cargo de pasivos ambientales no cubiertos por el modelo actual de disposición final, correspondiente a externalidades como emisiones de gases de efecto invernadero, olores, ruido, percolado de RILes, entre otros.

En el caso de llevar a cabo una licitación para una planta WTE en la Región Metropolitana, el consultor recomienda no restringir la tecnología dentro de las bases, sino más bien incluir condiciones operacionales de desempeño ambiental, disponibilidad, confiabilidad, eficiencia, calidad de los materiales recuperados, cantidad y características de los RISEs y restricciones de bajos o nulos RILes, con sustento de referencias de proyectos en operación comercial a esa fecha.

## 6 ETAPA 3 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5 Y 6

### 6.1 Percepción de actores relevantes

#### 6.1.1 Metodología de levantamiento de información

Para evaluar la percepción de actores relevantes respecto al aprovechamiento energético de los RSD con WTE, se realizaron entrevistas semi-estructuradas a representantes de la industria, academia, autoridades públicas, cooperación internacional y organizaciones de la sociedad civil. En total fueron contactados 17 actores, obteniendo 11 entrevistas presenciales efectivas (la transcripción de cada entrevista se encuentra en el Anexo N).

#### 6.1.2 Actores contactados

Tabla 6-1: Listado de actores contactados para entrevistas

Actor	Justificación	Estado
<b>Sector Privado</b>		
Alejandro Keller, Gerente de operaciones KDM Energía	Empresa forma parte tanto de la industria de recolección y transporte de residuos (con una participación de mercado del 22%), como en la disposición (con una participación del 53%). Actualmente generan electricidad a partir de biogás.	Realizada
Andrés Roi, Director ROI & ASOC.	Empresa de inversiones que hace aproximadamente 8 años empujó el desarrollo de una planta de WTE en la ciudad de Valparaíso y en Santiago, ambas iniciativas sin éxito posterior en su implementación.	Realizada
Max Spiess, Socio en Baraona Fischer Spiess	Formó la empresa WTE Latam con el interés de desarrollar un negocio alternativo al tratamiento de la basura domiciliaria con un foco en la tecnología WTE.	Realizada
Roberto Leyton, BDM Babcock & Wilcox -	Empresa norteamericana dedicada a la fabricación y venta de tecnologías de generación energética, con amplia experiencia en Estados Unidos, Europa y China.	Realizada
Jorge Donoso, Gerente comercial Techint Chile	Empresa de origen italiano de Gestión de Proyectos, Ingeniería, Suministros y Construcción en proyectos. Tiene experiencia en la ingeniería de plantas WTE.	Realizada
Sebastian Ugon, Jefe de servicios Engie Latam	Empresa francesa dedicada a generación de electricidad, gas natural y servicios energéticos. Operan varias centrales WTE y redes de calefacción distrital en Europa.	Sin respuesta
Robert Wörner, Director WTE Araucanía	Empresa Chilena de construcción que lidera el consorcio que ha desarrollado un proyecto WTE en la municipalidad de Lautaro, siendo este el primer proyecto del tipo WTE que se ha ingresado al SEA para su evaluación. El proyecto tiene como objetivo recibir los RSD de Temuco a partir de final del año 2018.	Sin Respuesta
<b>Academia</b>		

Luis Alonso Díaz, Profesor USACH	Académico que actualmente dirige 3 proyectos de investigación vinculados a la valorización y uso energético de biomasa forestal y residuos sólidos orgánicos.	Realizada
<b>Autoridad pública</b>		
Macarena Olivares, Directora de Medio Ambiente, Aseo y Ornato Municipalidad Renca	Directora de Medio Ambiente, Aseo y Ornato de la Ilustre Municipalidad de Renca, con amplia experiencia en temas de participación ciudadana, gestión territorial y evaluación ambiental.	Realizada
José M. Arriaza, SEREMI de Medio Ambiente de la RM	Representante del Ministerio del Medio Ambiente en la Región Metropolitana, colabora con el intendente en la elaboración, ejecución y coordinación de las políticas y planes en la materia.	Realizada
Sergio Versalovic, SEREMI de Energía de la RM	Representante del Ministerio de Energía en la Región Metropolitana, colabora con el intendente en la elaboración, ejecución y coordinación de las políticas y planes en la materia.	Pendiente
Evelyn Stevens, coordinadora de la División Desarrollo Sustentable en el Min. de Energía	Responsable desde el Ministerio de Energía de liderar el desarrollo de los Planes Energéticos Territoriales (PER), el programa Comuna Energética (CE) y los temas de cambio climático y sistema de precios al carbono.	Pendiente
Jessica Mualim, Alcaldesa de María Pinto	Alcaldesa con experiencia en el tema de residuos en base a su rol como ex Seremi de Medio Ambiente. Además, cuenta con estudios de pre grado en economía urbana.	Pendiente
Adela Bahamondes, Gobernadora de la Provincia de Chacabuco	Como gobernadora, juega un rol importante en las decisiones políticas dentro de su jurisdicción y es un canal de acercamiento a la comuna de Tiltil.	Sin respuesta
<b>Sociedad Civil</b>		
Macarena Guajardo, Directora Fundación Basura	ONG chilena que asesora y capacita empresas e individuos en temas de economía circular y estilo de vida basura cero.	Realizada
Eduardo Giesen, Miembro Alianza Basura Cero	Grupo de organizaciones y voluntarios que trabajan para promover el manejo sustentable de los residuos sólidos urbanos, bajo enfoques de economía circular.	Realizada
<b>Cooperación Internacional</b>		
Daniel Almarza, Asesor Energías Renovables GIZ	La cooperación internacional es capaz de dar continuidad a programas e iniciativas independiente de los cambios gubernamentales. En particular, la GIZ es capaz de aportar en la integración del comercio internacional para el fomento de la tecnología.	Realizada

### 6.1.3 Formato de la entrevista

 <small>GOBIERNO REGIONAL METROPOLITANO DE SANTIAGO</small>	 <small>Ministerio de Energía</small> <small>Chile</small>	 <small>The connected company</small>	
"Estudio de Factibilidad de una planta Waste to Energy para la Región Metropolitana"		Fecha: ___/___/___ Reg.: _____	
<b>Entrevista semi-estructurada</b>			
<b>Nombre</b>			
<b>Cargo</b>			
<b>Institución</b>			
<b>E-mail</b>			
<b>Teléfono</b>			
<p>El fin de realizar esta entrevista es conocer su percepción respecto a la tecnología de WTE, sus principales aprensiones y los factores que considera relevantes para el éxito en el desarrollo de un mercado de generación de energía en base a residuos sólidos domiciliarios en Chile. De esta forma, el cuestionario se enfoca en 3 áreas principales para cumplir con su objetivo. A saber: <b>1) Percepción e intereses 2) Barreras y oportunidades 3) Factores de éxito</b></p>			
<b>Preguntas</b>			
<b>Área 1) Percepción e intereses</b>			
1.1. ¿Cuál es su percepción respecto a la tecnología? ¿Cómo se compara respecto a los actuales modelos de disposición final de RSD en la RM?			
1.2. ¿Qué tan factible considera la implementación de una planta WTE en la RM?			
1.3. ¿Cuáles son sus intereses o potenciales intereses (rol) en el desarrollo de una planta WTE?			
1.4. ¿Qué esfuerzos ha realizado (Ud. o su compañía) en el desarrollo de la tecnología WTE en Chile?			
<b>Área 2) Barreras y oportunidades</b>			
2.1. ¿Cuáles cree que son las barreras principales para el desarrollo de una planta WTE en la Región Metropolitana?, responder según:			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barreras técnicas/operativas</li> <li>• Barreras económicas/financieras</li> <li>• Barreras ambientales/regulatorias</li> <li>• Barreras socio-culturales</li> </ul>			
2.2. ¿Cuáles cree que son las oportunidades que existen en Chile (particularmente en la RM) para el desarrollo de este mercado?			
<b>Área 3) Factores de éxito</b>			
3.1. ¿Cuál cree que son los factores críticos de éxito para el desarrollo de una planta WTE en la RM?			
3.2. ¿Cuál sería su propuesta para un modelo de negocios que sea viable de implementar?			

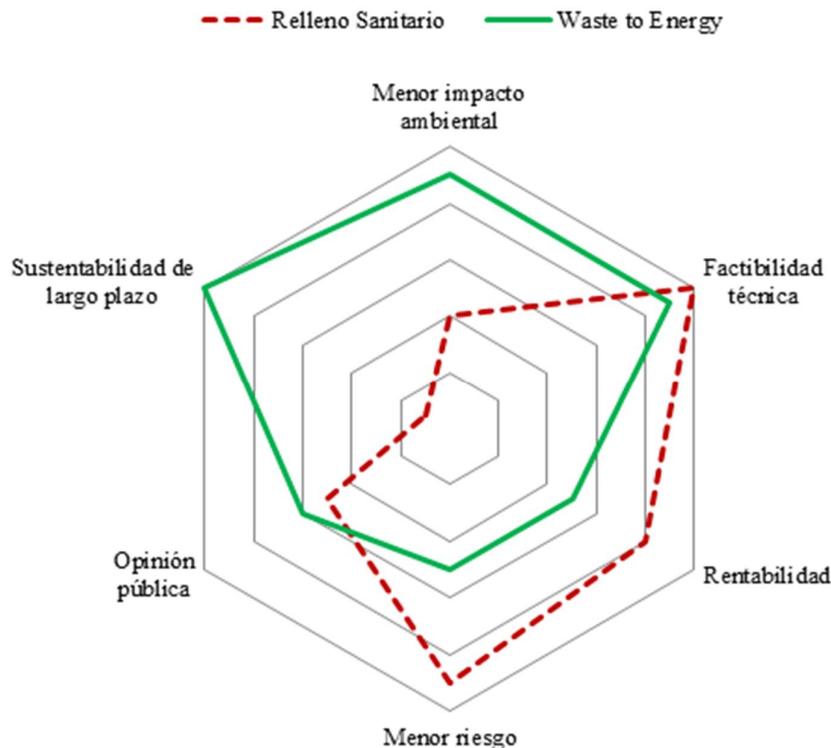
Figura 6-1: Formato de entrevista semi-estructurada para actores relevantes

**6.1.4 Diagnóstico de la percepción**

Para poder representar de forma gráfica la percepción de los distintos actores entrevistados, se elaboró un “mapa de percepción” de 6 criterios, que compara el modelo de aprovechamiento energético de los RSD mediante la tecnología WTE respecto al modelo de disposición final actual de los RSD en rellenos sanitarios. A continuación se describen los criterios utilizados y se muestra el resultado de la evaluación.

**Tabla 6-2: Criterios de percepción en base a entrevistas con actores relevantes**

Criterio de percepción	Descripción
Menor impacto ambiental	Grado de impacto sobre el medio ambiente según el tipo de proyecto
Sustentabilidad de largo plazo	Cómo la tecnología presenta una solución de largo plazo a la disposición de RSD en la RM
Opinión pública	Que tan positiva es la visión sobre la opinión de la ciudadanía ante el método de disposición de residuos considerado
Menor riesgo	Se refiere a la incertidumbre asociada a la experiencia de los actores locales para llevar a cabo el proyecto
Rentabilidad	Beneficio económico que se obtiene del proyecto en relación a la inversión inicial y costos de operación.
Factibilidad técnica	Evalúa la madurez de la tecnología y capacidades del mercado para desarrollar el proyecto



**Figura 6-2: Mapa de percepción en base a entrevistas con actores relevantes**

### 6.1.5 Síntesis de la percepción<sup>156</sup>

Existe una percepción positiva de los actores relevantes del mercado frente al modelo de aprovechamiento energético de los RSD con WTE y se señala como una alternativa efectiva para la disposición de los residuos en la RM. Se considera que existen tecnologías WTE maduras a nivel internacional con un número significativo de plantas en operación, y que un proyecto con una buena estructuración y apoyo del Estado podría optar a financiamiento tanto nacional como internacional para ser implementado. Como comentario general, se destaca la complementariedad entre WTE, con el reciclaje y con otros modelos de disposición final como la biodigestión, y que más que una planta de incineración, la solución debe ser entendida como un sistema integral de gestión de residuos.

#### Principales aspectos positivos

La tecnología WTE tiene un menor impacto ambiental que los rellenos sanitarios debido a una reducción sustancial de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente metano. Además, se presenta como una alternativa más resiliente, evitando problemáticas asociadas a la emisión de percolados, lixiviados, entre otros. Finalmente, se presenta como una alternativa de aprovechamiento energético con alta madurez tecnológica a nivel internacional.

#### Principales aspectos negativos

Se menciona una baja rentabilidad y falta de regulaciones ambientales existentes, por lo que se considera indispensable el soporte del Estado para empujar el desarrollo de un mercado. Además, se señala que normativa vigente como el nuevo Plan de Descontaminación Ambiental de Santiago, que contempla exigencias muy estrictas y no considera las externalidades positivas. En términos del modelo de negocios, las proyecciones a la baja del precio de la energía y la baja disposición a pagar por la gestión de residuos dificultan el desarrollo de una planta WTE.

Finalmente, existe oposición explícita de ciertos grupos de la sociedad civil, quienes consideran que el WTE, y en particular la incineración, son competencia ante las iniciativas de reciclaje, incentivando a no buscar soluciones ante el aumento de la generación de residuos y sus emisiones que presentan un alto impacto ambiental.

#### Principales factores de éxito

- Participación del Gobierno y voluntad política, mediante el fomento de modelos de negocio atractivos para los inversionistas. Por ejemplo, un esquema de concesiones o una garantía del estado.
- Involucrar a empresas que actualmente gestionan residuos en rellenos sanitarios, abriendo nuevas líneas de negocios para los mismos en base a su experiencia actual.
- Asegurar la venta de energía bajo contratos del tipo PPA y buscar formas de comercialización complementarias a la electricidad (vapor de procesos, calor distrital).

---

<sup>156</sup> Corresponde a la percepción de los actores entrevistados y no representa necesariamente la opinión del equipo consultor

- Rol de los municipios en la administración de las plantas y participación ciudadana vinculante en etapas tempranas de desarrollo.

## 6.2 **Sistematizar las barreras para la implementación de una planta WTE en la RM**

### 6.2.1 **Metodología para la sistematización de barreras y oportunidades**

Para la sistematización de barreras y oportunidades se consideraron tanto los resultados de las entrevistas a los actores clave como los principales hallazgos del estudio y experiencia del equipo consultor.

Tanto las barreras como oportunidades se agruparon en 5 categorías, las que se describen a continuación:

**Tabla 6-3: Categorías de agrupación para barreras y oportunidades**

<b>Categorías</b>	<b>Descripción</b>
Técnicas/operativas	Guardan relación con aspectos de la tecnología y la operación de una planta WTE
Económicas/financieras	Guardan relación con temas de costos, ingresos y de acceso a financiamiento
Planificación y gestión	Guardan relación con la gobernanza y articulación de actores para la implementación de un proyecto
Ambientales/normativas	Guarda relación con aspectos medio ambientales y como se vinculan con la normativa o regulación vigente
Socio-culturales	Guardan relación con la percepción de la ciudadanía y aspectos culturales en torno al tema de RSD

### 6.2.2 **Sistematización de barreras y oportunidades**

A continuación se presenta la tabla de barreras identificadas y un diagrama visual que sistematiza los principales aspectos, seguido de tabla de oportunidades y su diagrama correspondiente.

Tabla 6-4: Barreras identificadas para el desarrollo de WTE<sup>157</sup>

Técnicas / Operativas	Falta de mano de obra local calificada
	Requerimientos de mantenimiento específico
	Posible limitación en la cantidad de RSD disponibles debido a contratos de renovación automática (caso KDM)
	Falta de experiencia en cuanto al establecimiento de contratos de venta de energía térmica
	Poco empleo en comparación con modelos alternativos de gestión de residuos (por ejemplo, reciclaje)
Económicas / Financieras	Dificultad para medir emisiones de ciertos compuestos tóxicos (por ejemplo, Dioxinas y Furanos)
	Castigo en tasas de interés asociado al desconocimiento del sector financiero sobre la tecnología
	Alta inversión inicial de un proyecto WTE
	Falta de mecanismos del tipo garantías para reducir riesgo
	Municipios tienen baja capacidad financiera y no son sujetos de crédito
	Incertidumbre económica en relación al precio de venta de energía eléctrica/térmica de la planta
	Alto nivel de competitividad frente a otras alternativas de generación de energía
Planificación y Gestión	Costos de operación no son competitivos frente a rellenos sanitarios
	Incertidumbre respecto a la disposición de residuos municipales y cumplimiento de contratos.
	Percepción de poca transparencia en torno al tema de los RSD en la RM
	Coordinación y articulación entre actores relevantes
Ambientales / Normativas	Ambigüedad en el traspaso de responsabilidades al Gobierno Regional en tema residuos
	Venta/distribución de energía térmica condicionada a la ubicación del proyecto
	Falta de desarrollo de un marco regulatorio y normativo específico para WTE
	Exigencias del nuevo Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) de la RM
	Falta de regulación/normativa para la venta de energía térmica
Socio-Culturales	Requiere un flujo continuo de RSD durante largo plazo, por lo que desincentiva el reciclaje.
	Emisión de gases contaminantes que deben ser altamente controlados para evitar efectos socio-ambientales negativos
	Oposición ciudadana por desconocimiento sobre la tecnología
	Percepción negativa ante la incineración de residuos
	No existe mucha experiencia en procesos de participación ciudadana vinculante
Sensibilización de la población aumenta costos y tiempo de desarrollo del proyecto	
Baja disposición a pagar de la ciudadanía por la gestión de RSD	

<sup>157</sup> Los recuadros en azul corresponden a las barreras mencionadas en las entrevistas de percepción, mientras que los en blanco fueron agregadas por el equipo consultor

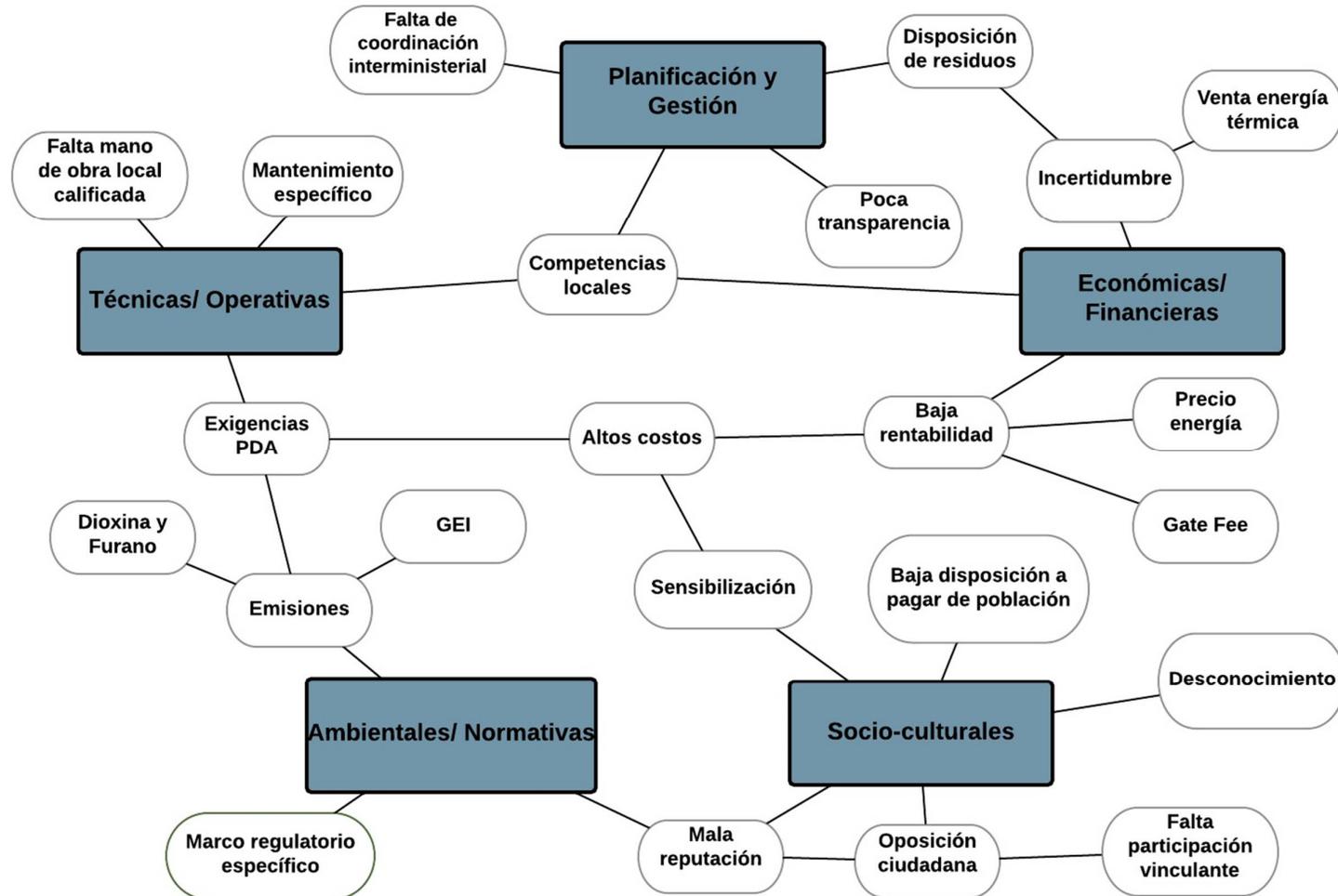


Figura 6-3: Diagrama de sistematización de barreras

Tabla 6-5: Oportunidades identificadas para el desarrollo de WTE<sup>158</sup>

<b>Técnicas / Operativas</b>	Alta disponibilidad de RSD en base a cuantificación y proyección para la RM
	Alta madurez tecnológica debido a la vasta experiencia internacional, especialmente en las tecnologías de incineración
	Aprovechamiento del Río Mapocho, para la operación de los sistemas de refrigeración abiertos de las unidades de generación, en caso de instalar la planta en zona central
	Futuros avances tecnológicos y crecimiento del mercado impulsarán la reducción de costos de tecnologías WTE
<b>Económicas / Financieras</b>	Posibilidad de modelos de negocio que combinen la generación eléctrica con la venta de energía térmica
	Posibilidad de optar a incentivos nacionales/internacionales de energías renovables y/o cambio climático
	Ahorro de las municipalidades en el transporte de los residuos (dependiendo de la ubicación del proyecto)
	A diferencia de otras tecnologías de generación, el "combustible" representa un ingreso en vez de un costo operacional
	Potencial de comercialización de reciclables valorizados antes del proceso de generación de energía
<b>Planificación y Gestión</b>	Tendencia del sector privado a comprar energías renovables bajo contratos PPA
	Posibilidad de localizar la planta cercana a grandes consumidores de energía térmica
	Instalaciones modulares y ampliables, permite incorporación gradualmente procesos de pre y post tratamiento para asegurar una gestión más integral de los RSD
	Municipios en la RM cada vez más involucrados en temas energéticos (por ejemplo, programa Comuna Energética)
	Pronta entrada en vigencia de la Ley 19.175 que otorga nuevas competencias al GORE en términos de recolección, transporte y disposición final mediante un delegado presidencial y gobernador regional
	Inclusión de las tecnologías WTE en las líneas estratégicas del GORE pueden favorecer la implementación de nuevos proyectos (ERD, PROT <sup>159</sup> , PPR <sup>160</sup> , ARI <sup>161</sup> , PROPIR <sup>162</sup> )
<b>Ambientales / Normativas</b>	Tecnología altamente compatible con el fomento al reciclaje y digestión anaeróbica de los residuos orgánicos
	No existe una regulación específica para WTE, otorgando flexibilidad en la implementación
	Reduce significativamente los problemas ambientales atribuidos a la disposición de residuos en rellenos sanitarios y vertederos (emisión de gases de efecto invernadero, lixiviados, percolados, etc.)
<b>Socio-Culturales</b>	Reducción de los conflictos sociales por disposición de residuos en rellenos sanitarios
	Generar una imagen país positiva en cuanto a políticas de gestión integral de residuos

<sup>158</sup> Los recuadros en azul corresponden a las oportunidades mencionadas en las entrevistas de percepción, mientras que los en blanco fueron agregadas por el equipo consultor

<sup>159</sup> PROT: Plan Regional de Ordenamiento Territorial

<sup>160</sup> PPR: Políticas Públicas Regionales

<sup>161</sup> ARI: Anteproyecto Regional de Inversión

<sup>162</sup> PROPIR: Programa Público de Inversión Regional

Puede existir un rol de los municipios en la propiedad de un proyecto, o bien definir beneficios a escala local (energía a costo reducido, mano de obra local, entre otros)

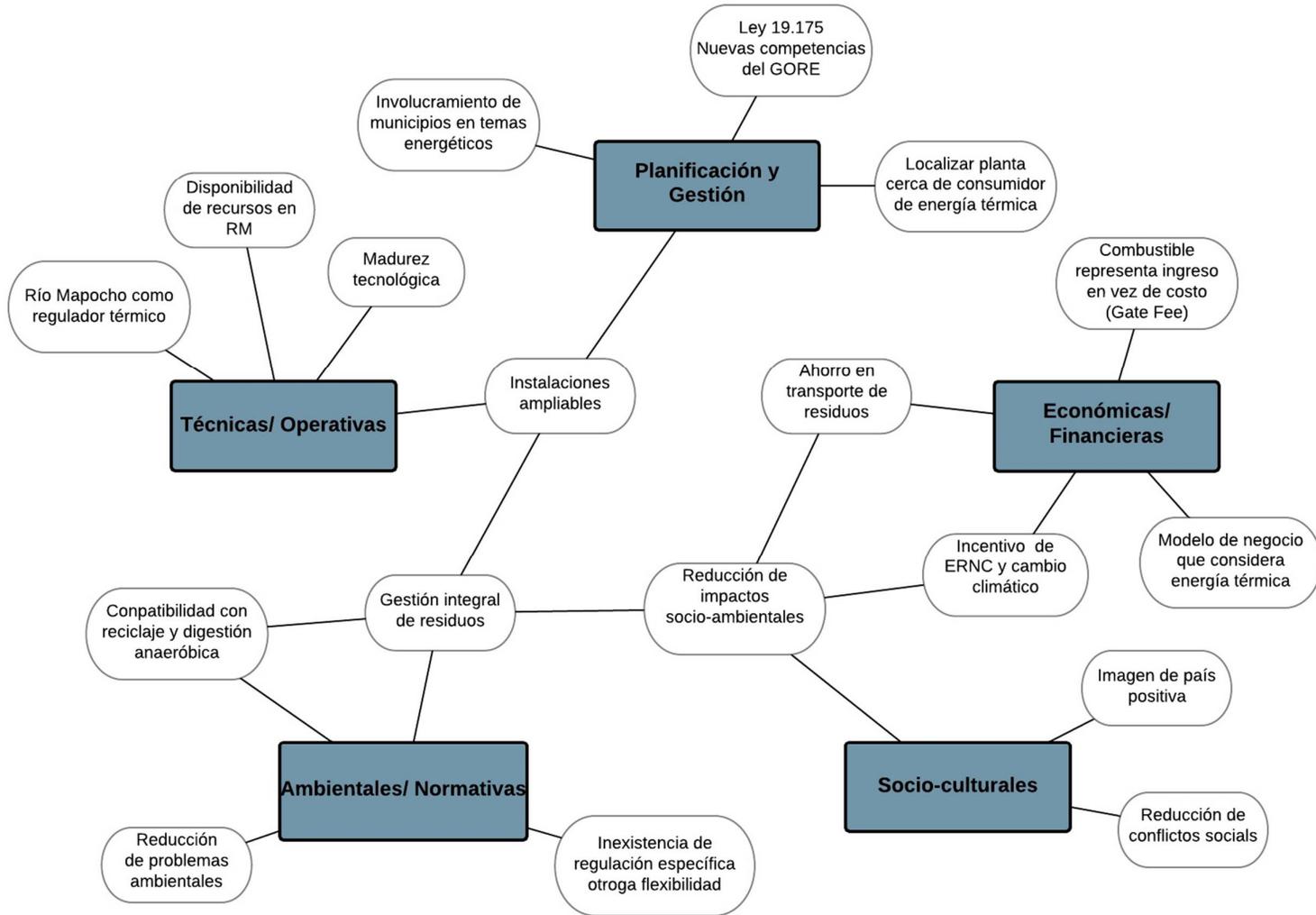


Figura 6-4: Diagrama de sistematización de oportunidades

### 6.3 Propuesta de estrategia regional para el aprovechamiento energético de los RSD

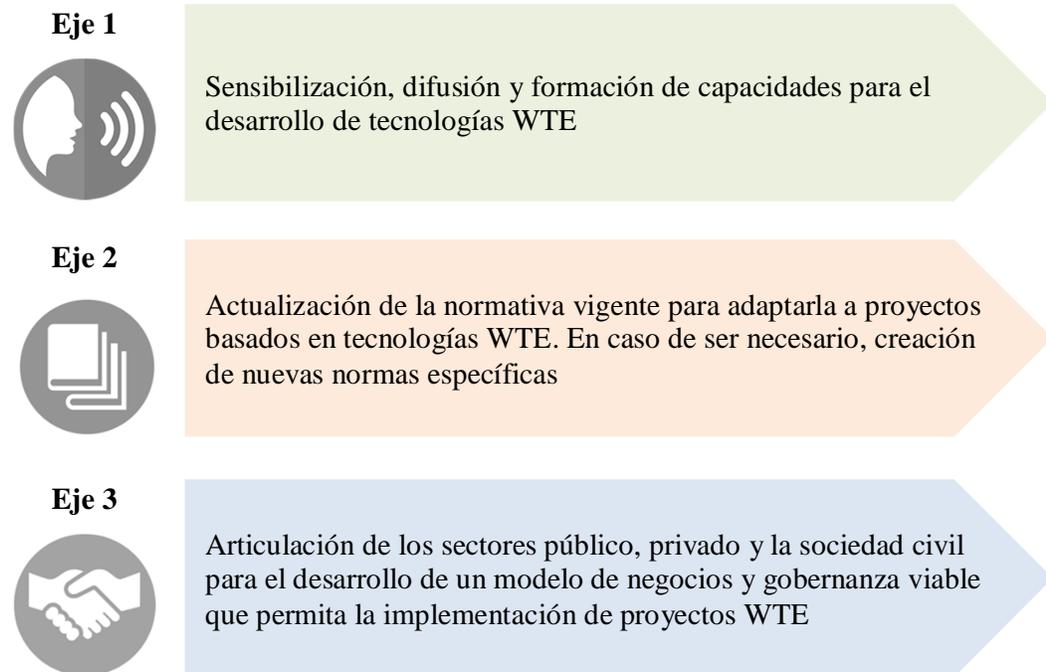
#### 6.3.1 Visión

Se propone la siguiente visión:

*“Posicionar la tecnología Waste to Energy (WTE) como una **alternativa complementaria** a la gestión integral de los Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) en la Región Metropolitana, articulando y fomentando gradualmente el desarrollo de una **industria compatible con las políticas ambientales de largo plazo**, promoviendo la colaboración público-privada y la participación activa de la ciudadanía.”*

#### 6.3.2 Definición de ejes transversales y metas

Para poder dar cumplimiento a la visión se proponen 3 ejes transversales:



**Figura 6-5: Propuesta de ejes estratégicos**

Para cada uno de estos ejes estratégicos, se asocian metas de carácter cualitativo, las que en una segunda etapa de construcción bajo un proceso participativo pueden ser profundizadas y valorizadas de forma cuantitativa.

A continuación se describen las metas propuestas por eje.



- Propiciar instancias de difusión y capacitación en temas de gestión integral de residuos sólidos y desarrollo de proyectos basados en tecnologías WTE.
- Generar capacidades técnicas locales y transferencia de conocimiento respecto al diseño, construcción y operación de plantas WTE.



- Gestionar el desarrollo de estudios específicos para la toma de decisiones en temas de gestión integral de residuos sólidos y desarrollo de tecnologías WTE.
- Promover ajustes regulatorios que incentiven la generación de energía a partir de residuos, en materia económica y aspectos de gestión.
- Crear un marco normativo específico para WTE alineado con la política ambiental vigente.



- Trabajo activo de colaboración entre el gobierno central y los municipios para fortalecer la gestión integral de residuos sólidos.
- Generación de redes entre el sector privado y la banca para el establecimiento de modelos de negocio viables para el desarrollo de proyectos con tecnologías WTE.
- Establecer instancias de participación ciudadana vinculante para la toma de decisiones respecto a la elaboración de proyectos basados en tecnologías WTE.

**Figura 6-6: Propuestas de metas para cada eje estratégico**

## 6.4 Propuesta de plan de acción para implementar la estrategia regional

### 6.4.1 Principales drivers

Para llevar a cabo la estrategia y cumplir con la visión definida en el punto anterior, se han definido los siguientes *drivers* o ejes de motivación.

#### **Drivers para el desarrollo WTE en la RM**

##### Ambientales:

- Mejor gestión de los residuos sólidos, menores emisiones de gases de efecto invernadero y reducción de los niveles de contaminación derivados de la disposición final de RSD (lixiviados, percolados, entre otros).
- Compatibilidad con iniciativas complementarias como reciclaje y digestión anaeróbica

##### Económicos:

- Reducción del uso de terrenos, de los costos por depósito y por manejo de rellenos sanitarios y vertederos
- Generación de energía térmica y vapor, lo que permitirá abrir nuevos mercados asociados a éste tipo de tecnologías
- Modernización y adquisición de know-how para la gestión integral de RSD en base al desarrollo de tecnologías WTE

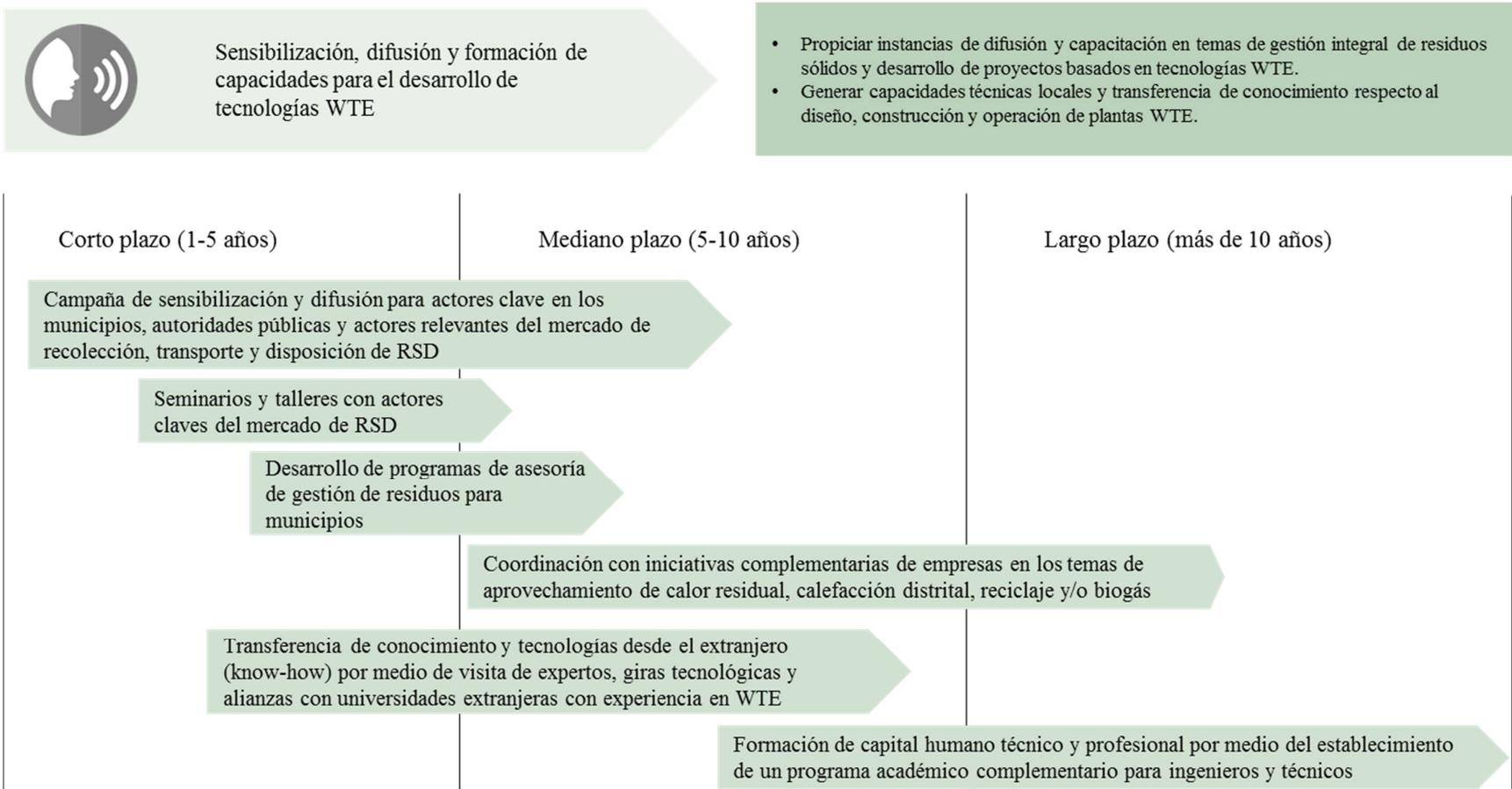
##### Sociales:

- Mejorar la calidad de vida en las zonas cercanas a los rellenos sanitarios y vertederos, debido a la disminución de su actividad, lo cual conllevará una reducción de conflictos sociales respecto al manejo de los RSD
- Participación activa de los actores locales en el desarrollo de proyectos en base a tecnologías WTE

**Figura 6-7: Propuesta de drivers para el plan de acción**

### 6.4.2 Acciones para el corto, mediano y largo plazo

A continuación se detallan las acciones propuestas por cada eje, que permitan dar cumplimiento a las metas planteadas y alcanzar la visión.



**Figura 6-8: Plan de acción para eje 1**



Actualización de la normativa vigente para adaptarla a proyectos basados en tecnologías WTE. En caso de ser necesario, creación de nuevas normas específicas

- Gestiona el desarrollo de estudios específicos para la toma de decisiones en temas de gestión integral de residuos sólidos y desarrollo de tecnologías WTE
- Promover ajustes regulatorios que incentiven la generación de energía a partir de residuos, en materia económica y aspectos de gestión
- Crear un marco normativo específico para WTE alineado con la política ambiental vigente

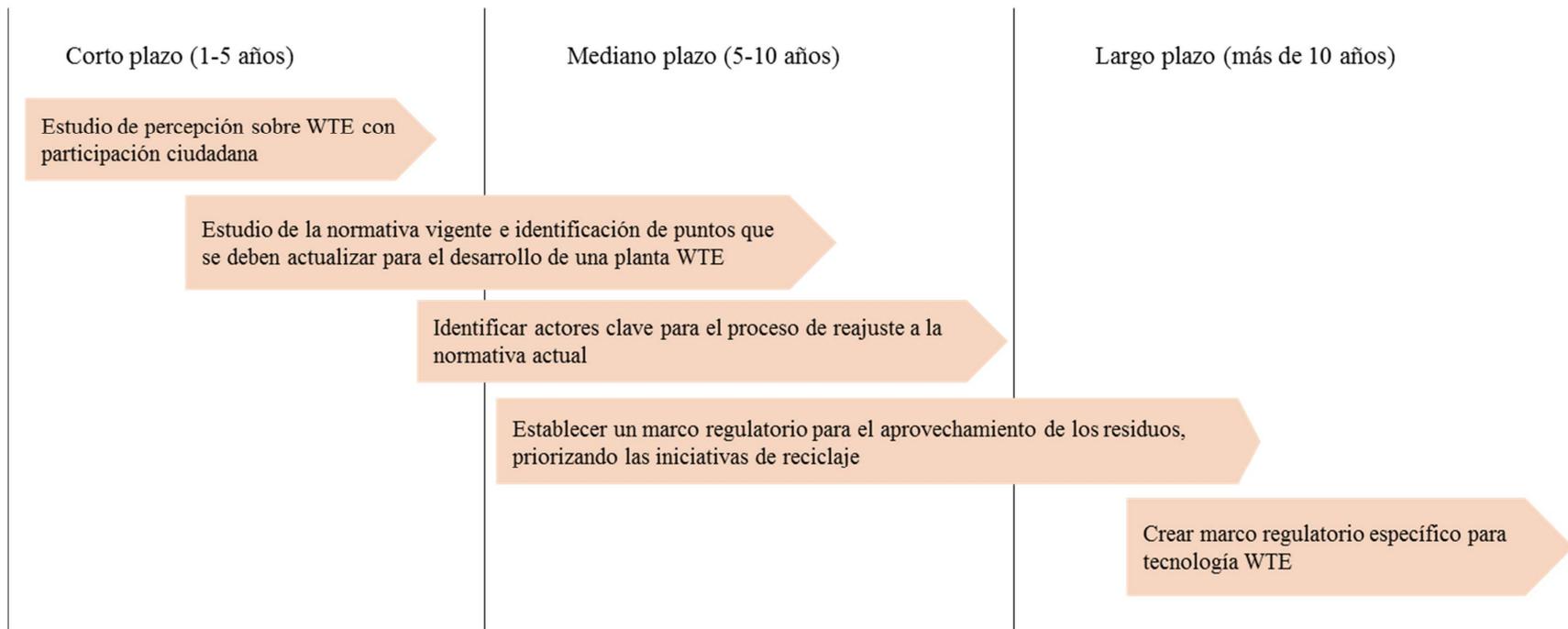
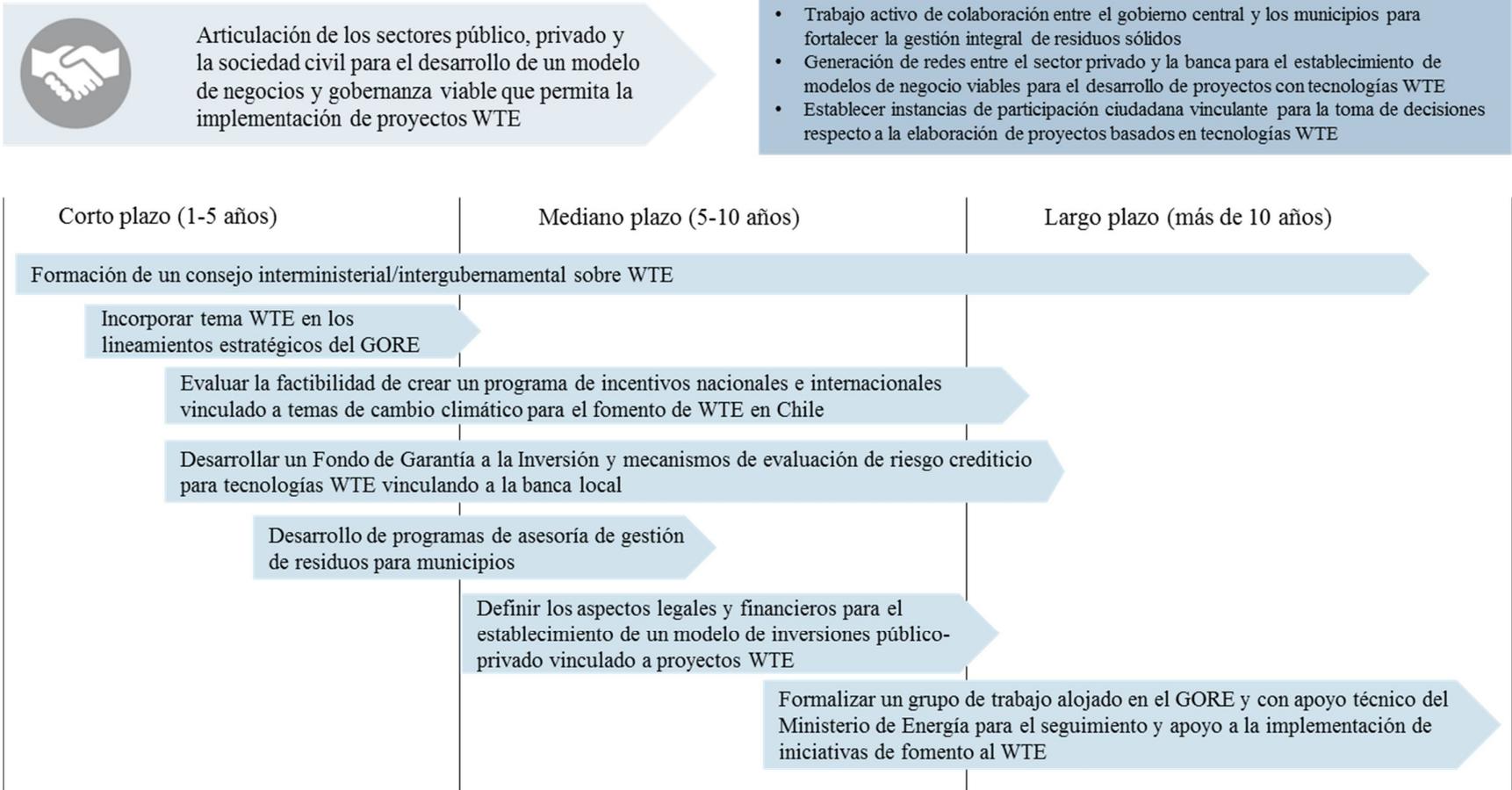


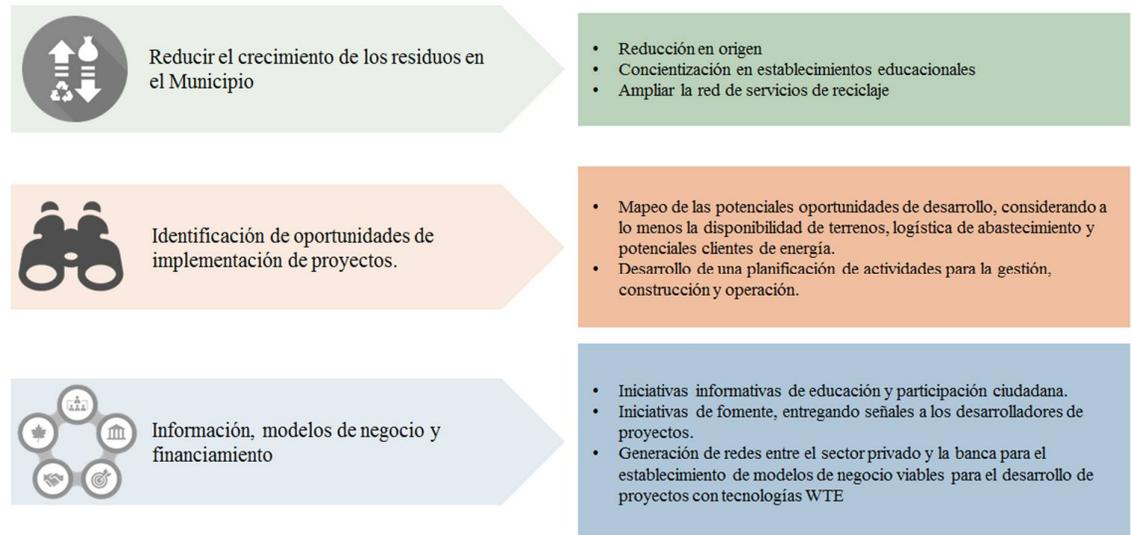
Figura 6-9: Plan de acción para eje 2



**Figura 6-10: Plan de acción para eje 3**

## 6.5 Plan de acción para municipios

A continuación se propone un plan de acción específico para los municipios, que responde a la estrategia propuesta anteriormente.



**Figura 6-11: Plan de acción para Municipios**

### 6.5.1 Reducir la generación de residuos en el municipio

Los residuos tienen un impacto ambiental significativo, pero para algunas personas es un problema que se encuentra "fuera de su vista" y una vez que han depositado su basura, se olvidan por completo de su gestión.

Para fomentar una reducción en la generación de residuos es necesario que todos los residentes, comercios, etc. comprendan las razones para cambiar su comportamiento actual, por lo que la reducción en origen es una medida fundamental para lograr dicho objetivo. De esta forma, la primera etapa corresponde a aumentar la concientización, generando un cambio de comportamiento, lo que finalmente se traduce en la reducción de los residuos y la masificación en el uso de los servicios de reciclaje. Por ello, además se deberá aumentar gradualmente la dotación de "puntos limpios" a medida que se desarrollen las iniciativas de fomento de reciclaje. Además, estas deben ser expandidas también a establecimientos educacionales.

### 6.5.2 Identificación de oportunidades de implementación de proyectos

Con el objetivo de facilitar la toma de decisiones, resulta pertinente evaluar dentro del municipio qué oportunidades existen para la implementación de un proyecto de WTE. Para ello, se debe considerar a lo menos la disponibilidad de terrenos, a partir de los cuales se deberán analizar los potenciales clientes de energía. Finalmente, se deberá determinar la logística de abastecimiento y el efecto que tendrá la implementación de la planta en el entorno municipal, considerando su actual sistema de recolección y disposición de residuos.

### **6.5.3 Información, modelos de negocios y financiamiento**

Uno de los aspectos fundamentales en el desarrollo de un proyecto de alta inversión, es el financiamiento. Para ello, los municipios deben demostrar su interés e integrar iniciativas informativas de las tecnologías WTE, con el propósito de educar a la población, mediante instancias de participación ciudadana, reduciendo el riesgo de inviabilizar los proyectos por levantamientos ciudadanos y, a su vez, dar señales a las empresas que buscan implementar este tipo de proyectos. Para ello, se deberán generar redes entre el sector privado, público y la banca, además de establecer modelos de negocios que sean poco intensivos en capital para los municipios.

### **6.5.4 Desarrollo de un proyecto de WTE**

Finalmente, en términos generales, para la implementación de un proyecto de WTE se deben considerar las siguientes actividades y resultados. A pesar de que estas no necesariamente deben ser desarrolladas por el Municipio en cuestión, es recomendable que este tome el liderazgo y gestione su desarrollo.

En el resumen a continuación, se considera un modelo que contempla la venta de energía térmica, mejorando los indicadores económicos del proyecto.

	Fase	Actividades	Resultados
<b>Planificación y construcción</b>	<b>Perfil y estudio de factibilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definición de objetivos y del liderazgo del proyecto</li> <li>- Identificación de clientes clave</li> <li>- Identificación de potenciales ubicaciones</li> <li>- Definición del tamaño</li> <li>- Primer layout</li> <li>- Análisis económico</li> <li>- Decisión de continuar</li> </ul>	Clientes clave Zonas de suministro de energía Pre factibilidad económica y técnica
	<b>Concepto e Ingeniería básica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obtención detalles de condiciones de conexión para clientes clave</li> <li>- Evaluación de pequeños consumidores de calor y adjudicación de los clientes de calor</li> <li>- Actualización del área de suministro de calor</li> <li>- Segundo análisis económico, detallando las tarifas de conexión</li> <li>- Decisión de continuar con la ingeniería de detalle</li> </ul>	Contratos clientes clave Zonas de suministro de definidas Costos de generación Tarifas de conexión Ingeniería básica
	<b>Planificación, Ingeniería de detalle y contratación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño de detalle</li> <li>- Obtención de los permisos de construcción</li> <li>- Tercer análisis económico, actualizando las tarifas de conexión</li> <li>- Elaboración de los términos de referencia (licitación)</li> <li>- Inicio del proceso licitatorio</li> <li>- Adjudicación del contratista para la construcción</li> </ul>	Ingeniería en detalle Permisos de construcción Términos de referencia Contratista adjudicada
	<b>Construcción y Aprobación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coordinación del calendario para la implementación</li> <li>- Informes de avance del estado de obra</li> <li>- Informes de calidad de ejecución de la obra</li> <li>- Aprobación o recepción de la obra</li> </ul>	Aprobación de la obra Adjudicación de clientes de calor
<b>Operación</b>	<b>Puesta en marcha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recopilación de datos e información</li> <li>- Análisis y sistematización de los datos e información y protocolo de procedimiento y resultados</li> <li>- Optimización e reparación de defectos previo a entrega final</li> <li>- Entrega de documentación que respalde el funcionamiento de la planta</li> </ul>	Optimización de la planta
	<b>Operación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manuales de operación de la planta</li> <li>- Capacitación y formación del equipo técnico para el mantenimiento y operación</li> </ul>	Planta en operación
<b>Transversal</b>	<b>Contratos de servicios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartas de interés de conexión de los potenciales clientes clave</li> <li>- Contratos de suministro firmados con los clientes clave</li> <li>- Cartas de interés / contratos para clientes menores</li> <li>- Compromisos / contratos para potenciales edificios públicos que pudieran integrarse como clientes clave</li> </ul>	

**Figura 6-12: Resumen de pasos para implementación de un proyecto a nivel municipal**

## **7 COMENTARIOS FINALES**

### **7.1 Gestión y proyección de residuos**

Actualmente en la Región Metropolitana la recolección y transporte de RSD está a cargo de 15 empresas, estando el 46% del mercado comprendido por los grupos Dimensión y Starco-Demarco.

El valor de los contratos oscila entre \$16 y \$350 millones [CLP/año]. Esta gran disparidad puede ser parcialmente justificable por la extensión territorial de la comuna, tipo de tecnología de los camiones, tipos de residuos recolectados, recolección diferenciada, tráfico, entre otros.

La Región Metropolitana dispone sus residuos mayoritariamente en los Rellenos Sanitarios Santa Marta (39%) y Loma Los Colorados (53%), los cuales tienen una autorización sanitaria hasta el 2022 y 2046 respectivamente. El 8% restante es dispuesto por el Relleno Sanitario Santiago Poniente (7%) y el Vertedero Popeta (1%), este último con su vida útil ya cumplida y el anterior con una autorización sanitaria próxima a terminar (2024).

Se espera que para el año 2050, considerando un escenario medio de penetración de políticas de reciclaje, la generación total de RSD para la RM aumente aproximadamente en un 35%, atribuible principalmente al crecimiento económico y demográfico de la región.

En la RM existe una alta disponibilidad de residuos. A modo de ejemplo, se requeriría la implementación de 10 plantas de WTE de un tamaño medio (330.000 ton/año) para cubrir la generación actual de RSD.

### **7.2 Tecnologías**

Entre las principales tecnologías WTE existentes en el mundo se encuentran la combustión, gasificación y pirolisis, de las cuales solo para combustión existe un número considerable de casos de éxito y plantas en operación.

Los sistemas de control de emisiones actuales logran capturar el 99,9% del material particulado emitido, cumpliendo con los estándares más estrictos de la industria.

Los países que cuentan con tecnologías WTE han desarrollado principalmente proyectos con tecnología de combustión de parrilla, la cual ha sido capaz de cumplir con los requerimientos económicos, técnicos y ambientales de cada país. Casi el 80% de las plantas operativas de WTE utiliza la tecnología de combustión por parrilla, seguida por la combustión por lecho fluidizado (11%) y la gasificación convencional con turbina a vapor (8%).

La incineración por combustión de parrilla, a criterio del consultor, es la tecnología más adecuada para el desarrollo del primer proyecto de WTE en la RM considerando las condiciones actuales. Sin embargo, para un eventual proceso de licitación futuro se recomienda no limitar el tipo de tecnología, evaluando los avances tecnológicos y condiciones para el desarrollo de WTE en Chile.

La localización más favorable para una planta WTE en la RM corresponde a una “ubicación urbana” o en un “polo de alta densidad”, ambos con alta disponibilidad de RSD y con potencial demanda de energía térmica.

### 7.3 **Iniciativas y tecnologías complementarias**

Dependiendo de la tecnología, las plantas WTE pueden o no contar con pre-tratamiento de los RSD. Dicho proceso aumenta el costo de implementación, pero a su vez, favorece la recuperación de materiales revalorizables mediante la implementación de iniciativas tales como reciclaje y digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica corresponde a una tecnología complementaria a las tecnologías convencionales de WTE, la cual utiliza como combustible la materia orgánica de los residuos.

### 7.4 **Modelos de negocios y financiamiento**

A la fecha se han identificado 4 estudios de pre-factibilidad de aprovechamiento energético de residuos mediante tecnologías WTE en Chile, en ninguno de los cuales se ha considerado la venta de energía térmica dentro de su evaluación económica.

Los análisis realizados en éste estudio muestran que la comercialización únicamente de energía eléctrica no es económicamente viable para este tipo de plantas, por lo que los proyectos de WTE deben ser ubicados cerca de consumidores de vapor o calor, permitiendo comercializar la energía térmica y alcanzando así tarifas competitivas.

Los escenarios con financiamiento público en general son más favorables dado que no se tiene que recuperar el costo de interés del préstamo. El esquema *BOOT* (*build, own, operate and transfer*), aunque es lo menos riesgoso para la entidad pública, es la alternativa más costosa y refleja bien el precio de transferencia del riesgo al privado. El modelo *BOO* (*Build Own Operate*) resulta ligeramente menos caro que el *BOOT* porque la propiedad no se transfiere y la duración de la operación no está limitada.

Los modelos con financiamiento privado requieren una tarifa de disposición alta para que se consideren económicamente atractivos, por lo que una alternativa natural es la implementación de un proyecto en conjunto entre entidades públicas y privadas, aprovechando la experiencia tecnológica del privado y el acceso a financiamiento por el socio público.

La economía de escala con respecto a la capacidad de diseño de la planta tiene un mayor impacto que el modelo de contratación o la forma de financiamiento. A mayor tamaño de planta, la tarifa de disposición se reduce considerablemente.

### 7.5 **Identificación de barreras y estrategia**

En función de los resultados de los objetivos 5 y 6 se identificaron las principales barreras y estrategias de mitigación para el desarrollo de una planta WTE en la RM.

- Percepción sobre la tecnología: Debido a la alta judicialización de proyectos y el grado de desconocimiento sobre estas tecnologías, se debe fomentar la educación y sensibilización sobre la gestión integral de residuos sólidos, iniciativas de reciclaje y revalorización energética. Además, se debe facilitar el rol de los gobiernos locales en

el diseño y administración de las plantas, incluyendo procesos de participación ciudadana vinculante en etapas tempranas de desarrollo.

- Normativa y regulación: La normativa actual no cubre todos los parámetros requeridos para la implementación de un proyecto WTE, y en la mayoría de los aspectos que sí están cubiertos, el requerimiento es poco restrictivo en comparación a la normativa internacional. Es por ello que se deben actualizar las regulaciones existentes para cubrir todos los parámetros requeridos en concordancia con las exigencias internacionales y las políticas de largo plazo. Además, se debe crear un marco regulatorio específico para la re-valorización de materiales recuperados y la comercialización de calor y vapor.
- Costos de inversión: Se debe contar con la participación activa del Gobierno y la voluntad política para el desarrollo de modelos de negocio atractivos para los inversionistas, por ejemplo, un esquema de concesiones o garantías del estado. Además, se debe asegurar la venta de energía bajo contratos del tipo PPA (*Power Purchase Agreement*) y/o buscar formas de comercialización complementarias a la electricidad (vapor de procesos, calor distrital), permitiendo así la rentabilidad de las plantas de WTE.

### **Comentarios finales**

Este estudio corresponde a la contribución más reciente en Chile que aborda la implementación de una planta de valorización energética de residuos domiciliarios a través de una evaluación técnica y económica.

Tal como se aprecia en los resultados del estudio, la disposición de residuos mediante una planta WTE de 330.000 ton/año de RSD requeriría una tarifa de disposición mayor que la actual. Sin embargo, estos resultados no deben desincentivar el desarrollo de estos proyectos, debido a que una planta de este tipo en una ubicación estratégica podría tener costos de transporte y disposición menores a los actuales. Asimismo, podría mitigar el problema que tendrá la Región Metropolitana cuando los rellenos sanitarios Santa Marta y Santiago Poniente, que manejan el 46% de los RSD de la región, cumplan su vida útil de acuerdo a la autorización sanitaria que les aplica, correspondiente al año 2022 y 2024, respectivamente.

Cabe destacar que actualmente el costo por transporte de residuos en la Región Metropolitana es más alto que el costo por disposición final, debido principalmente a la lejanía de los rellenos sanitarios con respecto a los centros urbanos. Una ubicación estratégica de una planta WTE en la Región Metropolitana podría disminuir las distancias con las comunas que dispongan sus residuos en ella, logrando ahorros significativos por concepto de transporte. Lo anterior podría permitir que los costos de transporte y disposición de los residuos sean menores que los actuales, generando un ahorro a los municipios.

Por otro lado, los beneficios indirectos de esta tecnología son variados, y principalmente se traducen en una reducción del impacto ambiental del sistema actual de disposición de residuos, al disminuir las emisiones por transporte y tratamiento, y además, al hacerse cargo de externalidades negativas de los rellenos sanitarios, como por ejemplo, los problemas de olores y líquidos percolados.

Los últimos proyectos de disposición de residuos en Chile indican que la población no está dispuesta a recibir en las cercanías de su comunidad la basura de otros. La ciudadanía entonces tendrá que decidir si se persiste con un modelo de rellenos sanitario o está dispuesta a integrar nuevas tecnologías de procesamiento y aprovechamiento energético de los residuos dentro de su comunidad.

Finalmente, aún queda por definir aspectos fundamentales que permitan viabilizar un proyecto de este tipo, considerando acuerdos con comunidades, modelos de negocio, ubicación estratégica, además de recalcar la posibilidad de establecer una metodología de desarrollo en conjunto entre entidades públicas y privadas, tratando idealmente de aprovechar la experiencia tecnológica del privado.