

## Tabla de contenido

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

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

## Índice de tablas

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

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

## Índice de ilustraciones

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