

## Tabla de contenido

1	Introducción.....	9
1.1	Antecedentes generales .....	9
1.2	Motivación.....	10
1.3	Objetivos.....	10
1.3.1	Objetivo general .....	10
1.3.2	Objetivos específicos .....	10
1.4	Alcance .....	11
2	Metodología .....	12
3	Antecedentes específicos .....	13
3.1	Sector eléctrico nacional.....	13
3.1.1	Marco normativo .....	13
3.1.2	Sistemas eléctricos.....	14
3.1.3	ERNC en el contexto mundial y nacional .....	16
3.2	Sector de los residuos.....	19
3.2.1	Definición de residuo .....	19
3.2.2	Marco normativo .....	19
3.2.3	Gestión de residuos .....	20
3.2.4	Clasificación general de residuos .....	20
3.2.5	Residuos sólidos municipales (RSM) en la Región Metropolitana (RM) .....	23
3.3	Sector de emisiones de carbono .....	33
3.4	Valorización energética de residuos y gasificación por plasma .....	36
3.4.1	Proceso de gasificación .....	37
3.4.2	Definición de plasma.....	39
3.4.3	Generación artificial de plasma .....	40
3.4.4	Antorchas de plasma térmico.....	41
3.4.5	Gasificación mediante reactor con antorchas de plasma térmico.....	44
3.4.6	Modelamiento del proceso de gasificación por plasma mediante equilibrio termodinámico (modelo estequiométrico) .....	49
4	Aspectos generales del diseño conceptual y del análisis económico de la central .....	57
4.1	Diseño conceptual de la central .....	57
4.1.1	Ubicación y superficie .....	57
4.1.2	Residuos aceptados .....	59
4.1.3	Composición y humedad de los RSM ar .....	60
4.1.4	Impacto de la humedad final en la generación eléctrica neta.....	61
4.1.5	Transporte de los residuos.....	61
4.1.6	Tratamiento de los residuos.....	61
4.1.7	Bloque de gasificación.....	64
4.1.8	Fabricación de lana mineral .....	67

4.1.9	Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible .....	68
4.1.10	Bloque de potencia .....	69
4.1.11	Potencia y rendimiento neto .....	70
4.2	Análisis económico .....	70
4.2.1	Costos de inversión .....	70
4.2.2	Costos de operación y mantenimiento (O&M).....	75
4.2.3	Ingresos.....	76
4.2.4	Flujo de caja, VAN y TIR .....	76
5	Análisis de la central utilizando RSM ar .....	77
5.1	Diseño conceptual de la central .....	77
5.1.1	Tratamiento de los residuos.....	77
5.1.2	Bloque de gasificación.....	77
5.1.3	Fabricación de lana mineral .....	81
5.1.4	Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible .....	81
5.1.5	Bloque de potencia .....	82
5.1.6	Potencia y rendimiento neto .....	82
5.2	Análisis económico .....	82
5.2.1	Costos de inversión .....	82
5.2.2	Costos de operación y mantenimiento (O&M).....	83
5.2.3	Ingresos.....	83
5.2.4	Flujo de caja, VAN y TIR .....	84
5.2.5	Análisis de sensibilidad.....	85
6	Análisis de la central utilizando RSM %dry .....	88
6.1	Diseño conceptual de la central .....	88
6.1.1	Tratamiento de los residuos.....	88
6.1.2	Bloque de gasificación.....	89
6.1.3	Fabricación de lana mineral .....	92
6.1.4	Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible .....	92
6.1.5	Bloque de potencia .....	93
6.1.6	Potencia y rendimiento neto .....	93
6.2	Análisis económico .....	93
6.2.1	Costos de inversión .....	93
6.2.2	Costos de operación y mantenimiento (O&M).....	94
6.2.3	Ingresos.....	94
6.2.4	Flujo de caja, VAN y TIR .....	94
6.2.5	Análisis de sensibilidad.....	96
7	Análisis de la central utilizando RDF .....	99
7.1	Diseño conceptual de la central .....	99
7.1.1	Tratamiento de los residuos.....	99

7.1.2	Bloque de gasificación.....	100
7.1.3	Fabricación de lana mineral .....	104
7.1.4	Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible .....	104
7.1.5	Bloque de potencia .....	104
7.1.6	Potencia y rendimiento neto .....	105
7.2	Análisis económico .....	105
7.2.1	Costos de inversión .....	105
7.2.2	Costos de operación y mantenimiento (O&M).....	106
7.2.3	Ingresos.....	106
7.2.4	Flujo de caja, VAN y TIR .....	107
7.2.5	Análisis de sensibilidad.....	109
8	Discusiones.....	112
8.1	Discusión de central utilizando residuos sólidos municipales “como son recibidos” (RSM ar).....	112
8.2	Discusión de central utilizando residuos sólidos municipales secados parcialmente (RSM %dry) .....	113
8.3	Discusión de central utilizando residuos seleccionados (RDF) .....	114
9	Conclusiones .....	115
	Glosario y subíndices .....	116
	Bibliografía .....	120
	Anexos.....	124
	Anexo A: Estimación de la reducción de emisiones, configuración usando residuos seleccionados con fabricación de lana mineral.....	125
	Anexo B: Proveedores de tecnología de plasma.....	140
	Anexo C: Centrales valorización energética o tratamiento térmico de residuos mediante plasma.....	141
	Anexo D: Propiedades químicas .....	142
	Anexo E: Flujos de caja.....	143

## Índice de tablas

Tabla 3.1: Estadísticas más relevantes del SIC.....	14
Tabla 3.2: Estado de proyectos ERNC (MW), al 31 de diciembre de 2014.....	18
Tabla 3.3: Capítulos LER correspondientes a la fuente productora de residuos.....	22
Tabla 3.4: Residuos dispuestos en rellenos sanitarios en la RM durante el año 2013. ....	25
Tabla 3.5: Contenido de materiales reciclables en residuos domésticos y asimilables.....	28
Tabla 3.6: Componentes principales y su porcentaje en peso de los RSM de la RM.....	29
Tabla 3.7: Comparación entre diferentes tipos de valorización energética. ....	36
Tabla 3.8: HHV para cada compuesto del gas combustible.....	54
Tabla 4.1: Codificación LER de residuos aceptados.....	59
Tabla 4.2: Composición tipo análisis elemental y humedad los RSM de la RM como son recibidos.....	60
Tabla 4.3: Tipos de secadores y sus principales características.....	63
Tabla 4.4: Conversiones entre divisas y unidades de cuenta. ....	71
Tabla 4.5: Costo del terreno. ....	71
Tabla 4.6: Valor de las correas transportadoras.....	71
Tabla 4.7: Costo del equipo de trituración de referencia. ....	72
Tabla 4.8: Costo del equipo de secado de referencia. ....	72
Tabla 4.9: Costos de los equipos de gasificación de referencia.....	74
Tabla 4.10: Costo del bloque de fabricación de lana mineral de referencia. ....	74
Tabla 4.11: Costo del equipo de recuperación de calor de referencia.....	74
Tabla 4.12: Costo de los equipos de limpieza y adecuación del gas combustible de referencia. ....	74
Tabla 4.13: Costos de O&M del bloque de separación de residuos.....	75
Tabla 4.14: Cargo y número de personas por turno. ....	75
Tabla 5.1: Concentración de cada compuesto del gas combustible. Configuración utilizando RSM ar.....	78
Tabla 5.2: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral. ....	82
Tabla 5.3: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral. ....	83
Tabla 5.4: Costos de operación de la fabricación de lana mineral. Configuración utilizando RSM ar.....	83
Tabla 5.5: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral. ....	84
Tabla 5.6: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral. ....	85
Tabla 6.1: Concentración de cada compuesto del gas combustible. Configuración utilizando RSM %dry. ....	89
Tabla 6.2: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral. ....	93
Tabla 6.3: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral. ....	94
Tabla 6.4: Costos de operación de la fabricación de lana mineral. Configuración utilizando RSM %dry. ....	94
Tabla 6.5: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral. ....	95
Tabla 6.6: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral. ....	95
Tabla 7.1: Composición tipo análisis elemental y humedad del RDF. ....	100
Tabla 7.2: Concentración de cada compuesto del gas combustible. Configuración utilizando RDF. ....	101
Tabla 7.3: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.....	105

Tabla 7.4: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.....	105
Tabla 7.5: Costo de operación anual asociado a la planta de clasificación.....	106
Tabla 7.6: Costos de operación de la fabricación de lana mineral. Configuración utilizando RDF. ....	106
Tabla 7.7: Ingresos diarios asociados a la venta de material reciclable. ....	107
Tabla 7.8: CER's emitidos. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.	107
Tabla 7.9: CER's emitidos. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.	108

## Índice de figuras

Figura 2.1: Diagrama de la metodología utilizada. ....	12
Figura 3.1: Capacidad instalada a diciembre de 2014 según recurso. ....	14
Figura 3.2: Generación a diciembre de 2014 según recurso. ....	15
Figura 3.3: Proyección de demanda anual 2015-2035. ....	15
Figura 3.4: Centrales generadoras, líneas de transmisión, nudos y subestaciones eléctricas del SIC en la zona de interés del proyecto. ....	16
Figura 3.5: Secuencia jerarquizada ideal de etapas de la gestión integral de residuos. ....	20
Figura 3.6: Ejemplo de aplicación de la codificación LER. ....	22
Figura 3.7: Proyección de generación de RSM para la RM hasta el año 2030. ....	23
Figura 3.8: Ubicación de las estaciones de transferencia y de los rellenos sanitarios de la RM. ....	26
Figura 3.9: Proceso ideal de gestión en RSM no separados en origen. ....	27
Figura 3.10: Esquema y flujos másicos de la Planta Recuperadora de Reciclables Relleno Sanitario Loma Los Colorados. ....	28
Figura 3.11: Estructura básica del mercado de carbono. ....	33
Figura 3.12: Diversos usos del gas de combustible. ....	37
Figura 3.13: Estados de la materia y sus relaciones. ....	39
Figura 3.14: Proceso de fotoionización representado en un átomo. ....	40
Figura 3.15: Proceso de ionización en cascada. ....	40
Figura 3.16: Antorchas de plasma; (a) de arco no transferido, (b) de arco transferido. ....	42
Figura 3.17: Antorcha de plasma de arco no transferido, con sistema de refrigeración y bobinas magnéticas. ....	42
Figura 3.18: Antorcha de plasma. ....	43
Figura 3.19: Reactor autotérmico. ....	44
Figura 3.20: Reactor alotérmico. ....	45
Figura 3.21: (a) Vitricificado enfriado al aire libre. (b) Nódulos de metal. (c) Vitricificado con agua. (d) Vitricificado lana mineral. ....	46
Figura 3.22: Cantidad de lana aislante transada en el mercado nacional entre los años 2010 y 2015. ....	46
Figura 3.23: Reactor de gasificación Westinghouse G65. ....	48
Figura 4.1: Diagrama general simplificado de la central. ....	57
Figura 4.2: Ubicación general de la central. ....	58
Figura 4.3: Detalle de la ubicación de la central y sus alrededores. El área en rojo corresponde a la superficie total de la central. La línea verde corresponde a la línea de transmisión a 220 kV Alto Jahuel- Candelaria. La línea blanca delimita la RM y VI Región. ....	59
Figura 4.4: Variación de la potencia eléctrica bruta, consumo eléctrico de las antorchas de plasma y potencia eléctrica neta, con la variación de la humedad final de los RSM ar. ....	61
Figura 4.5: Información original sobre flujo de aire y potencia para antorcha Marc 11H de Westinghouse. ....	66
Figura 4.6: Proyección de flujo de aire y potencia para antorchas Marc 11H de Westinghouse. ....	66
Figura 4.7: Transporte de RSM mediante correas transportadoras en la central TV1. ....	71
Figura 5.1: Variación del poder calorífico inferior del gas combustible y de la energía requerida para la gasificación según la cantidad de oxidante. Configuración utilizando RSM ar. ....	78
Figura 5.2: Balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma. Configuración utilizando RSM ar. ....	81
Figura 5.3: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral. ....	85
Figura 5.4: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del vitricificado sin tratar. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral. ....	86
Figura 5.5: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral. ....	86

Figura 5.6: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio de la lana mineral. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral. ....	87
Figura 6.1: Variación del poder calorífico inferior del gas combustible y de la energía requerida para la gasificación según la cantidad de oxidante. Configuración utilizando RSM %dry. ....	89
Figura 6.2: Balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma. Configuración utilizando RSM %dry. ....	92
Figura 6.3: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral. ....	96
Figura 6.4: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del vitrificado sin tratar. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral. ....	96
Figura 6.5: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral. ....	97
Figura 6.6: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio de la lana mineral. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral. ....	97
Figura 6.7: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con las toneladas de lana mineral producidas por año. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral. ....	98
Figura 7.1: Variación del poder calorífico inferior del gas combustible y de la energía requerida para la gasificación según la cantidad de oxidante. Configuración utilizando RDF. ....	101
Figura 7.2: Balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma. Configuración utilizando RDF. ....	104
Figura 7.3: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral. ....	109
Figura 7.4: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del vitrificado sin tratar. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral. ....	109
Figura 7.5: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral. ....	110
Figura 7.6: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio de la lana mineral. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral. ....	110
Figura 7.7: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con las toneladas de lana mineral producidas por año. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral. ....	111
Figura 7.8: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el costo del bloque de gasificación. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral. ....	111