



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

GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN POR PLASMA DE RESIDUOS SÓLIDOS
MUNICIPALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS ALONSO GUERRA ROSALES

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO STEINER TICHAUER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ
DARREN LEDERMANN MOLINA

SANTIAGO DE CHILE
AÑO 2016

GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN POR PLASMA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

La gasificación por plasma es un proceso termoquímico a través del cual el contenido carbonoso de un compuesto es transformado en un gas combustible que puede ser utilizado para producir electricidad o ser transformado en combustibles líquidos. Los compuestos inorgánicos forman un vitrificado que se caracteriza por ser altamente inerte, lo que hace segura su disposición en relleno sanitario o bien permite su utilización como relleno en construcción o como aislante, si ha sido previamente procesado.

La gasificación por plasma ocurre en un reactor atmosférico bajo condiciones controladas de temperatura y contenido de oxidante, donde la energía térmica necesaria para el proceso es proporcionada por antorchas que producen plasma, es decir, un gas ionizado, producido mediante descarga eléctrica en gas.

Actualmente el consumo energético nacional va en aumento, al igual que la producción de residuos, por lo que este trabajo tiene como motivación evaluar la viabilidad de la valorización energética de residuos sólidos municipales mediante gasificación por plasma, al presentarse esta tecnología como una alternativa para contribuir a la solución de ambos problemas.

El objetivo de este trabajo es realizar el estudio de perfil de una central termoeléctrica de ciclo combinado, que utiliza gas combustible obtenido a partir del tratamiento de 1000 toneladas diarias de residuos sólidos municipales de la Región Metropolitana, mediante el proceso de gasificación por plasma. El estudio contempla la central en tres configuraciones; utilizando residuos sin tratar, utilizando residuos previamente secados y utilizando residuos seleccionados. Para cada una de dichas configuraciones se evalúa también la fabricación de aislante lana mineral a partir del vitrificado.

Para la realización de este trabajo se emplea la siguiente metodología; contextualización de los sectores de energía, residuos y de emisiones de carbono. Descripción y modelación mediante equilibrio estequiométrico de la tecnología de gasificación por plasma. Diseño conceptual de la central y análisis económico de ésta, incluyendo los cálculos de indicadores relevantes tales como el VAN y TIR, y análisis de sensibilidad económica para aquellas variables que sean relevantes en la evaluación.

Los resultados muestran que dadas las condiciones actuales de mercado, la central en sus tres configuraciones sin y con fabricación de lana mineral no son rentables, sin embargo, para la configuración utilizando residuos secados con fabricación de lana mineral, se puede obtener rentabilidad para un precio de lana mineral de al menos 2.230 USD por tonelada o para una producción de lana mineral de al menos 21.634 toneladas anuales. Para la configuración con residuos seleccionados con fabricación de lana mineral, se puede obtener rentabilidad para un precio de lana mineral de al menos 1.305 USD por tonelada o para una producción de lana mineral de al menos 11.942 toneladas anuales.

Las principales conclusiones son que el contenido de humedad de los residuos a tratar tiene un impacto negativo importante en la generación eléctrica y rendimiento neto de la central, por lo que utilizar residuos sin tratar es inconveniente dada su alta humedad característica.

Para las configuraciones sin fabricación de lana mineral se concluye que se requiere un precio por tratamiento de residuos, -análogo al costo por disposición-, similar al que presentan países desarrollados para obtener rentabilidad. Para las configuraciones con fabricación de lana mineral es posible obtener rentabilidad pero con ingresos debidos principalmente a la venta de ésta.

Finalmente es importante destacar que una central de este tipo tiene ventajas medioambientales importantes que no se ven reflejadas en una evaluación económica, como son una menor cantidad de emisiones contaminantes, valorización completa de los residuos y un menor uso de rellenos sanitarios.

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

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

Actualmente el consumo energético nacional va en aumento al igual que la producción de diversos tipos de residuos. Dado el contexto internacional de eficiencia energética y cuidado del medio ambiente, Chile ha suscrito diversos acuerdos que lo obligan a adoptar altos estándares en estas materias; aumento en la matriz energética de energías renovables no convencionales (ERNC) y una correcta gestión de sus residuos. La secuencia jerarquizada ideal de gestión de residuos corresponde a prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y finalmente disposición final.

La gasificación es un proceso termoquímico a través del cual un compuesto carbonoso es transformado en un gas combustible formado principalmente por diversas proporciones de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂). Cuando está formado principalmente por hidrógeno y dióxido de carbono es llamado gas de síntesis. Los compuestos inorgánicos presentes forman cenizas o materia vitrificada según el tipo de tecnología de gasificación utilizada.

El plasma corresponde a uno de los cuatro estados fundamentales de la materia junto al estado sólido, líquido y gaseoso, y es de hecho, el estado más abundante de la naturaleza. La distinción básica entre estos estados recae en la fuerza de los enlaces que mantienen juntas sus partículas constituyentes. Para el caso de un gas molecular, no ocurre un cambio de fase en el sentido termodinámico, pero cuando se aplica energía suficiente y se supera la energía de enlace molecular, las moléculas irán disociándose gradualmente en átomos y a una temperatura suficientemente elevada las colisiones entre átomos producirán desprendimiento de electrones formando un gas ionizado o plasma.

Los principales medios para la formación artificial del plasma corresponden a la fotoionización y descarga eléctrica en gas. La gasificación por plasma ocurre en un reactor atmosférico, bajo condiciones controladas de temperatura y oxidante. La energía térmica necesaria es provista por antorchas de plasma, que corresponden a equipos que producen plasma artificialmente mediante descarga eléctrica en gas.

La principal diferencia entre la gasificación tradicional y la por plasma, es que esta última permite temperaturas de operación más elevadas, lo cual tiene como ventaja una menor producción de contaminantes en el gas combustible y que los compuestos inorgánicos forman vitrificados en vez de ceniza. Esta ventaja cobra mayor importancia al gasificar residuos sólidos municipales o derivados, pues sus características de composición hacen que mediante gasificación tradicional se forme un mayor contenido de compuestos tóxicos, principalmente dioxinas y furanos.

El gas combustible producido puede ser utilizado para producir electricidad o bien puede ser transformado en combustibles líquidos mediante diversos procesos fisicoquímicos o biológicos. El vitrificado posee la ventaja de ser altamente inerte, lo que hace segura su disposición en relleno sanitario o bien permite su utilización como relleno en construcción o como aislante lana mineral, si ha sido previamente procesado.

De esta forma, la valoración energética de residuos mediante gasificación por plasma se presenta como una alternativa interesante debido a su capacidad de contribuir tanto al sector eléctrico como al de gestión de residuos.

1.2 Motivación

La gestión de residuos se ha convertido en uno de los principales retos a los que debe enfrentarse la sociedad actual, debido a su impacto ambiental, social y económico. A esta problemática se une la dependencia actual de Chile a la importación de prácticamente el total de sus combustibles para generación termoeléctrica, por lo que este trabajo tiene como motivación ser una contribución al evaluar la viabilidad de la valorización energética de residuos mediante gasificación por plasma, como una alternativa para contribuir a la solución de ambos problemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general es realizar el estudio de perfil de una central termoeléctrica de ciclo combinado, que utiliza gas combustible obtenido a partir del tratamiento de 1000 toneladas diarias de residuos sólidos municipales de la Región Metropolitana, mediante el proceso de gasificación por plasma. El estudio contempla la central en tres configuraciones; utilizando residuos sin tratar, utilizando residuos previamente secados y utilizando residuos seleccionados. Para cada una de dichas configuraciones se evalúa también la fabricación de aislante lana mineral.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Describir el sector eléctrico nacional; la legislación actual, organismos reguladores y actores involucrados.
- Describir los residuos sólidos municipales de la Región Metropolitana, su nivel producción y la legislación referente al manejo de ellos. Caracterizar su composición y nivel de humedad. En el contexto de la valorización de éstos, se debe describir el mercado del carbono y analizar las vías de certificación que permitan la venta de bonos de carbonos, de manera de incluirlo en la evaluación económica.
- Evaluar el proceso de gasificación por plasma y sus principales subproductos.
- Describir de manera general el bloque de tratamiento de residuos, el bloque de gasificación y el bloque de potencia de la central; principales equipos, características, y requerimientos térmicos y eléctricos.

1.4 Alcance

El alcance se enmarca en lo correspondiente a un estudio de perfil. El desarrollo de la memoria entregará una descripción general de la planta, sus equipos y procesos necesarios para la obtención de electricidad a partir de la gasificación por plasma de residuos; ubicación, obtención y tipo de residuo a tratar, tratamiento de los residuos, balance de masa y energía del bloque de gasificación, energía y sub productos generados. De esta forma es posible evaluar económicamente la central obteniendo indicadores relevantes tales como el valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR). Se incluye además un análisis de sensibilidad económica ocupando aquellas variables que sean relevantes en la evaluación y su impacto bajo distintos escenarios.

2 Metodología

La metodología corresponde a la que en general se utiliza en el desarrollo de proyectos de ingeniería.

Se inicia con una contextualización del sector eléctrico nacional, distinguiendo la legislación actual, organismos reguladores, actores involucrados y políticas ERNC.

Se describen los distintos tipos de residuos, sus características, nivel producción y legislación.

Se estudia la legislación referente a las reducciones certificadas de emisiones (CER's, *certified emission reductions* en inglés) de gases de efecto invernadero, para analizar los aportes de la valorización energética de residuos.

Se describe y modela la tecnología de gasificación por plasma; definición, subproductos, residuos y emisiones, balance de masa y energía del proceso, comparación con otros procesos de eliminación de residuos, principales ventajas y desventajas.

Se define la planta siguiendo los procedimientos típicos de un estudio de perfil.

La evaluación económica incluirá los cálculos de indicadores relevantes tales como el VAN y TIR. Se realizará un análisis de sensibilidad económica ocupando aquellas variables que sean relevantes en la evaluación y su impacto bajo distintos escenarios. El flujo en la metodología puede revisarse en la Figura 2.1.

La información necesaria se obtendrá a partir de la Web, bibliotecas e información pública de las instituciones gubernamentales nacionales; Ministerio de Energía, Comisión Nacional de Energía (CNE), Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC), Ministerio del Medio Ambiente, etc. También se investigarán proyectos similares, realizados o que estén bajo estudio.

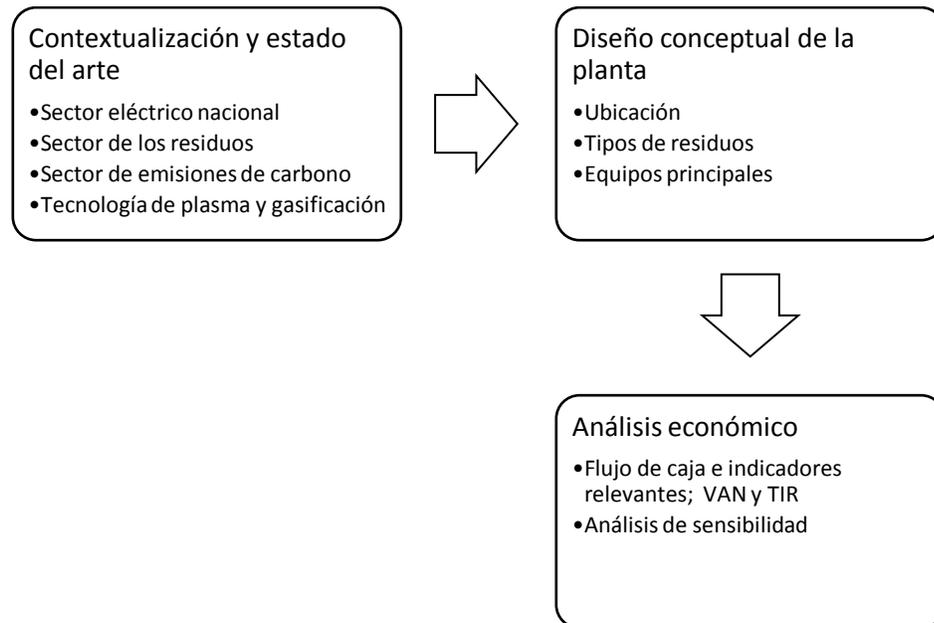


Figura 2.1: Diagrama de la metodología utilizada.

3 Antecedentes específicos

3.1 Sector eléctrico nacional

3.1.1 Marco normativo

El marco normativo de desarrollo del sector eléctrico nacional está definido mediante la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE), Decreto con fuerza Ley N° 1 de 1982 del Ministerio de Minería, la cual a la fecha ha sufrido variadas modificaciones:

- Ley corta I (Ley 19.940 de 2004): Regula la toma de decisiones y el desarrollo de la expansión de la transmisión de electricidad. También establece incentivos para medios de generación no convencionales y pequeños medios de generación.
- Ley corta II (Ley 20.018 de 2005): Estimula el desarrollo de inversiones en el segmento de generación a través de licitaciones de suministro realizadas por las empresas de distribución.
- Ley Tokman (Ley 20.220 de 2007): Establece modificaciones que resguardan la seguridad del suministro de los clientes regulados y de los sistemas eléctricos de generación, transmisión y distribución, ante el término anticipado de un contrato de suministro o la quiebra de una empresa de los sistemas antes mencionados.
- Ley ERNC (Ley 20.257 de 2008): Establece que las empresas de generación eléctrica deben acreditar un 5% de sus aportes de energía en ERNC, porcentaje que aumenta paulatinamente hasta 10% en el año 2024.
- Ley Ministerio de Energía (Ley 20.402 de 2009): Crea el Ministerio de Energía.
- Ley Net Metering (Ley 20.571 de 2012): Fomenta la generación distribuida residencial y regula el pago recibido por estos. Los usuarios residenciales pueden inyectar energía a través de su empalme eléctrico, sujeto a que se trate de una fuente ERNC cuya capacidad no exceda de 100 [kW].
- Ley de Concesiones (Ley 20.701 de 2013): Modifica una serie de procesos administrativos de forma de hacer más expedito la obtención de concesiones.
- Ley de Licitación de ERNC (Ley 20.698 de 2013): Aumenta la exigencia de la Ley ERNC (Ley 20.275) a un 20% al año 2025.
- Ley para la Interconexión de Sistemas Eléctricos (Ley 20.726 de 2014): Introduce modificaciones en la LGSE, con el fin de promover la interconexión de sistemas eléctricos independientes.

La LGSE establece además que los sistemas de generación y transmisión deben contar con un operador denominado Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC), encargado de coordinar las operaciones de modo de balancear la oferta y demanda de electricidad de forma constante, independiente de la propiedad y de los contratos existentes entre las diferentes empresas de generación y transmisión.

Esta coordinación se debe efectuar de acuerdo a las normas y reglamentos que propone la Comisión Nacional de Energía (CNE), dependiente del Ministerio de Energía. De este modo, los generadores, empresas de transmisión y distribuidoras deben acatar las órdenes emanadas del CDEC [1].

3.1.2 Sistemas eléctricos

Chile posee 4 sistemas eléctricos principales¹:

Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)

Cubre la zona entre Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, abasteciendo a un 6,28% de la población y a un gran número de compañías mineras. Posee una fuerte componente térmica de generación. A diciembre de 2014 cuenta con una potencia instalada a de 4.081 MW y posee una generación bruta anual de 17.674 GWh [2].

Sistema Interconectado Central (SIC)

Corresponde al sistema en cual participaría el proyecto desarrollado en este trabajo.

Este sistema cubre la zona desde Taltal por el norte (Región de Antofagasta), hasta la isla grande de Chiloé por el sur (Región de Los Lagos). Es el mayor de los cuatro sistemas eléctricos que suministran energía al país y el principal encargado de abastecer a la mayor parte de la población nacional, teniendo aproximadamente 4.640.000 clientes residenciales [3].

Las estadísticas más relevantes alcanzadas por el SIC a diciembre del 2014 pueden apreciarse en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Estadísticas más relevantes del SIC.

Potencia instalada	15.179 MW
Generación bruta anual	52.265 GWh
Demanda máxima bruta	7.547 MW
Ventas	48.977 GWh
Población	92,2%

Fuente: Elaboración propia en base a CDEC-SIC [4].

Respecto de la composición del aporte en potencia y generación, según tipo de recurso a diciembre de 2014, puede verse en la Figura 3.1 y Figura 3.2 que el principal aporte está dado por generación térmica.

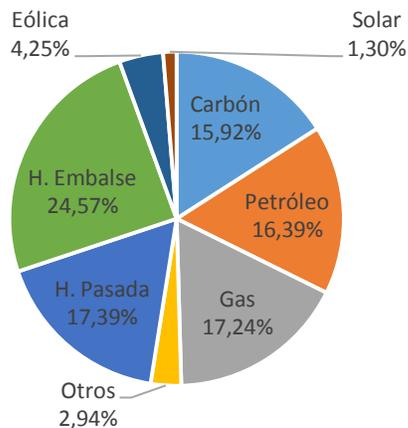


Figura 3.1: Capacidad instalada a diciembre de 2014 según recurso.

Fuente: Elaboración propia en base a CDEC-SIC [4].

¹ Excluyendo los sistemas menores de "Los Lagos" (6 MW) e "Isla de Pascua" (4 MW).

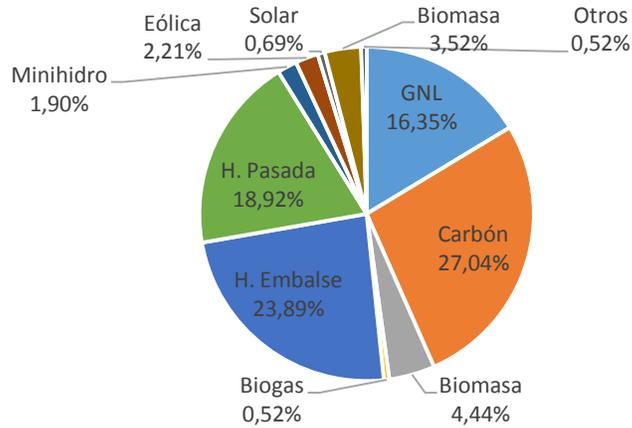


Figura 3.2: Generación a diciembre de 2014 según recurso.
Fuente: CDEC-SIC [5].

En cuanto a la proyección de la demanda de energía, se espera un aumento sostenido de ésta, como se puede apreciar en la proyección de demanda estimada para los años 2015-2035 de la Figura 3.3, la cual corresponde a un crecimiento promedio de 2,2% anual.

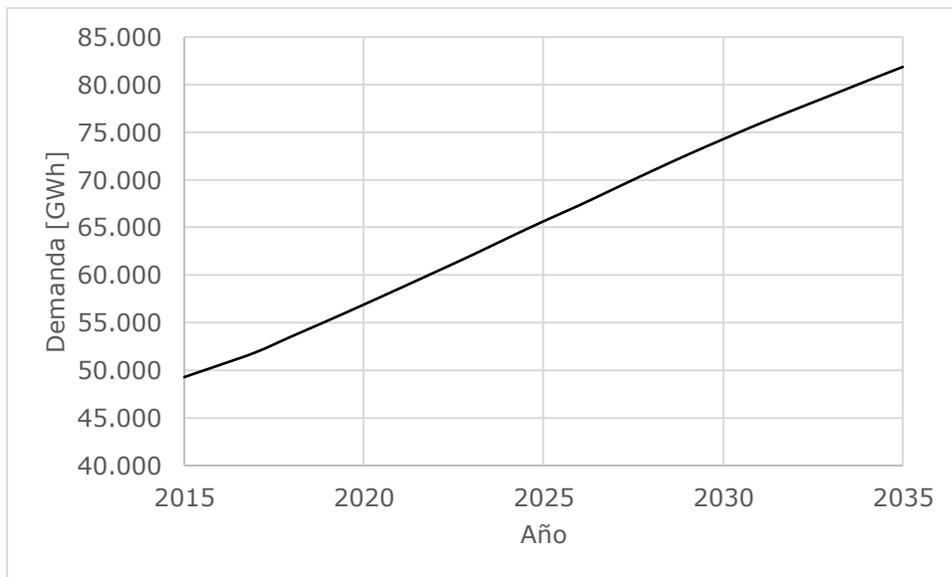


Figura 3.3: Proyección de demanda anual 2015-2035.
Fuente: CDEC-SIC [5].

En la Figura 3.4 se pueden apreciar centrales generadoras, líneas de transmisión en distintas tensiones, subestaciones del sistema troncal (nudos) y subestaciones asociadas a sistemas de subtransmisión y transmisión adicional (grandes clientes) instaladas en la zona de interés del proyecto. Es importante señalar que la LGSE indica que los sistemas de transmisión troncal, de sub-transmisión y adicionales son de acceso abierto, independiente de quien sea su propietario. Cualquier generador puede usar la capacidad de transmisión disponible pagando un peaje o bien construir nuevas líneas de transmisión.



Figura 3.4: Centrales generadoras, líneas de transmisión, nudos y subestaciones eléctricas del SIC en la zona de interés del proyecto.

Fuente: CDEC-SIC – Mapa SIC mayo 2014.

Finalmente en cuanto a los precios promedio referidos a la subestación Alto Jahuel en el año 2014; el costo marginal fue de 134,8 [USD/MWh], el precio medio de mercado fue de 96,4 [USD/MWh] y el precio de la potencia de punta 8,3 [USD/kW Mes] [4] [6].

Sistema Eléctrico de Aysén

Cubre la XI Región y es el sistema más pequeño en cuanto a potencia instalada y población, abasteciendo aproximadamente 26.000 clientes residenciales. A Diciembre de 2014 cuenta con una potencia instalada de 55 MW y posee una generación bruta anual de 136 GWh [3] [4] [7].

Sistema Eléctrico de Magallanes

Cubre la XII Región y está formado por tres subsistemas independientes: Punta Arenas, Puerto Natales, Porvenir y Puerto Williams, abasteciendo aproximadamente 56.000 clientes residenciales. A Diciembre de 2014 cuenta con una potencia instalada de 105 MW y posee una generación bruta anual de 197 GWh [3] [4] [8].

3.1.3 ERNC en el contexto mundial y nacional

Se denominan Energías Renovables a aquellas cuyo uso puede ser sostenido en el tiempo debido a la gran cantidad de energía que poseen, o bien porque son parte de un ciclo que les permite renovarse por medios naturales en una escala de tiempo humana. A este tipo de energía corresponden la hidráulica, biomasa, solar, eólica, geotérmica y mareomotriz.

Las energías renovables convencionales corresponden a aquellas energías renovables cuya penetración en el mercado es alta, debido a que su forma de aprovechamiento posee un alto grado de desarrollo tecnológico. Ejemplo de ella, es la energía hidroeléctrica de gran escala.

Las energías renovables no convencionales, por el contrario, corresponden a aquellas con baja penetración en el mercado debido al uso de tecnologías de aprovechamiento relativamente nuevas, lo que puede significar mayores costos de inversión y complicaciones técnicas de integración a los sistemas actuales.

Las energías renovables, han sido utilizadas desde tiempos remotos, principalmente, la solar, hidráulica y eólica. Ejemplos típicos son el uso del sol para deshidratar alimentos [9], el uso embarcaciones a vela y el uso de la energía eólica e hidráulica para molienda de alimentos [10].

Sin embargo con el desarrollo de la máquina de vapor y posteriormente del motor eléctrico, se encontró en la generación térmica basada en combustibles fósiles, una fuente de energía estable y económica, en una época donde el consumo de estos combustibles no hacía pensar en los problemas de disponibilidad e impacto ambiental que décadas más tarde produciría.

No fue sino hasta la década de los 70, cuando la crisis del petróleo trajo problemas de precios y suministro, lo cual junto a un avance en el desarrollo de las tecnologías de energías renovables y alternativas, significó un renacer de éstas [11]. Durante los años 90 existió un aumento en la participación de las ERNC en diversos países debido a incentivos desarrollados por éstos para diversificar su matriz energética logrando así mayor independencia de las importaciones, mayor seguridad de suministro y la capacidad de abordar aspectos ambientales y de desarrollo sustentable [3]. En 1997 a través del Protocolo de Kioto (PK), diversos países industrializados acordaron reducir las emisiones de seis de sus gases de efecto invernadero (GEI) para fines de 2012, inicialmente. Entre los GEI se encuentra el dióxido de carbono (CO₂), cuyas principales industrias contribuyentes son el sector energía y transporte, y el gas metano (CH₄), cuya principal contribución se encuentra en la descomposición de materia orgánica. A partir de este protocolo, diversas cumbres fijaron los lineamientos de la reducción de gases de efecto invernadero lo que ha significado un estímulo importante al desarrollo de las ERNC a nivel mundial [12].

En este contexto, la inauguración del primer parque eólico nacional, Alto Baguales en Coyhaique el año 2001, marca un hito en el desarrollo de las ERNC en Chile. Esta central cuenta con tres unidades aerogeneradoras que aportan una potencia instalada de 2 MW al Sistema Eléctrico de Aysén [3].

Sin embargo no es hasta el año 2008 mediante la aprobación de la Ley ERNC que Chile define una política clara sobre el uso de éstas en su matriz energética. Esta ley estableció que las empresas de generación eléctrica debían acreditar un mínimo de 5% de sus inyecciones de energía mediante ERNC, ya sea directa o indirectamente. En este último caso pueden pactar cuotas de producción con otras empresas que utilicen ERNC al denominado precio por atributo verde o atributo ERNC.

El porcentaje mínimo de 5% debía aumentar hasta un 10% el año 2024, pero como ya se mencionó, mediante una nueva modificación llevada a cabo con la aprobación de la Ley 20.698 del año 2013, se amplió esta obligación a un 20% al año 2025 lo que ha significado un estímulo importante a las inversiones en ERNC.

La Ley ERNC (Ley 20.257 de 2008) indica además en su artículo 225° aa), que califican como ERNC las siguientes fuentes de energía:

- Energía a partir de biomasa; esto incluye residuos sólidos municipales, por lo que este proyecto califica como ERNC.
- Energía hidroeléctrica de potencia inferior a 20 MW.
- Energía geotérmica.
- Energía solar.

- Energía eólica.
- Energía marítima; mareomotriz, undimotriz, de gradiente térmico.

Así durante el año 2014 la inyección acumulada de ERNC estuvo sobre el 10%, con una potencia instalada de 2097 MW, teniendo aportes de energía de 2.432 GWh de fuentes de biomasa, 1.453 GWh de pequeñas hidroeléctricas, 1.415 GWh de centrales eólicas, 458 GWh de centrales solares y 286 GWh de centrales de biogás [13]. En la Tabla 3.2 se puede observar el estado de proyectos ERNC al 31 de diciembre de 2014, donde destacan las potencias de los proyectos en construcción y con Resolución de Calificación Ambiental (RCA) aprobada, en particular el caso de las centrales solares de paneles fotovoltaicos.

Tabla 3.2: Estado de proyectos ERNC (MW), al 31 de diciembre de 2014.

Tecnología	En operación	En construcción	RCA aprobada, sin construir	En calificación
Biomasa	466	0	134	69
Biogás	43	0	1	8
Eólica	836	165	5.225	2.179
Mini Hidráulica	350	134	337	215
Solar - PV ²	402	833	8.149	4.008
Solar - CSP ³	0	110	760	370
Geotérmica	0	0	120	0
Total	2.097	1.242	14.726	6.849

Fuente: Elaboración propia en base a CIFES [13].

² PV; fotovoltaico, del inglés *photovoltaic*.

³ CSP; poder solar concentrado, del inglés *concentrated solar power*.

3.2 Sector de los residuos

3.2.1 Definición de residuo

Un residuo puede definirse como todo material resultante de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza, cuando su poseedor o productor lo destina al abandono. Dentro de los impactos que puede generar la disposición final de los residuos destacan; alteración de la calidad del agua y del suelo debido a aceites, grasas, metales pesados, ácidos, etc., emisiones atmosféricas como dioxinas, furanos, y gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) y enfermedades provocadas por vectores sanitarios.

3.2.2 Marco normativo

El marco normativo en Chile asociado a residuos sólidos, data desde el año 1968 con la introducción del Código Sanitario, el cual regula aspectos relacionados con la salud de los habitantes y algunos aspectos específicos asociados a higiene y seguridad ambiental laboral.

En el año 1992 comienza a regir el D.S. N°685 con el cual Chile ratifica el Convenio de Basilea, que se refiere a regulaciones respecto del movimiento fronterizo de desechos.

En el año 1994 entra en vigencia la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la que establece un marco en el cual se debe desarrollar el actuar del sector público y privado.

En el año 2000 comienza a regir el D.S. N°594 sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (proviene del D.S. 745 del año 1993).

En el año 2005 entra en vigencia el D.S. N°148, que establece el Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos.

En el año 2007 comienza a regir el D.S. N°45, el cual establece la norma de emisión para la incineración y co-incineración de residuos.

En el año 2008 entra en vigencia el D.S. N°189 que regula las condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios.

En el año 2010, comienzan a regir dos reglamentos; el D.S. N°4 para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, y el D.S. N°6 sobre el manejo de residuos generados en establecimientos de atención de salud. Además, en el mismo año Chile pasa a ser miembro pleno de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), condición que supone una mejora en el estándar de políticas públicas en materia ambiental, en particular en materia de gestión de residuos.

En enero del año 2013, entra en vigencia el D.S. N°01 del Ministerio de Medio Ambiente que aprueba el Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC).

En julio de 2016 es publicada la Ley N° 20.920 que establece un marco para la Gestión de Residuos y Responsabilidad Extendida del Productor.

3.2.3 Gestión de residuos

Una correcta gestión de residuos permite reducir los impactos ambientales de forma importante, por ello, el Ministerio del Medio Ambiente a través de la publicación de la Ley N° 20.920 ha formalizado la secuencia jerarquizada ideal de etapas (Figura 3.5) que se debe considerar para una correcta gestión de residuos.

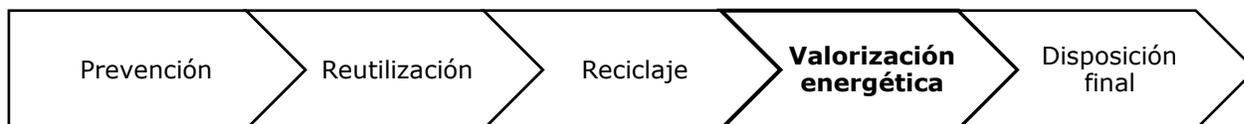


Figura 3.5: Secuencia jerarquizada ideal de etapas de la gestión integral de residuos.
Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Prevención: Aplicación de medidas para reducir la producción de residuos.
- Reutilización: Utilización de un residuo en un nuevo proceso productivo u objetivo donde sea útil.
- Reciclaje: Acción de valorización en la cual los residuos son transformados en nuevos productos.
- Valorización energética: Utilización de residuos como fuente energética, ya sea química o térmica. Ésta es el área donde el proyecto planteado en este trabajo pretende actuar.
- Disposición final: Eliminación de los residuos que no pueden ser parte de las etapas anteriores en lugares autorizados para ello.

Para alcanzar el uso de esta secuencia, el Ministerio del Medio Ambiente irá proponiendo metas progresivas y estableciendo incentivos mediante decretos de ley y fondos destinados a financiar proyectos, programas y otras acciones destinadas al cumplimiento de los objetivos [14].

En lo que respecta a residuos sólidos municipales, la tendencia sigue siendo la disposición final directa de éstos.

3.2.4 Clasificación general de residuos

En Chile la clasificación general de residuos viene dada por el riesgo y origen de éstos:

Por riesgo:

- Peligrosos: Presentan características de riesgo para la salud humana y/o al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo.
- No peligrosos: No presentan características de riesgo para la salud humana y/o al medio ambiente.
- Inertes: Residuos no peligrosos que no pueden reaccionar física, química ni biológicamente.

Por origen:

- Residuos sólidos domiciliarios: Producidos en los hogares.
- Residuos sólidos domiciliario y asimilable: Producidos en los hogares así como otros que por su naturaleza o composición sean similares a los producidos en hogares.
- Residuos sólidos municipales: Corresponden a la agrupación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables a éstos, así como también residuos de parques y jardines, vías públicas, ferias libres, oficinas, colegios, barrido de calles, etc.
- Residuos industriales: Producidos en actividades industriales.
- Residuos silvoagropecuarios: Producidos en actividades forestales, agrícolas y pecuarias.
- Residuos mineros: Producido por procesos de exploración, prospección, extracción de mineral, transformación hidrometalúrgica, pirometalúrgica y refinación.
- Residuos de la construcción: Producidos en la construcción, transformación, reparación y/o demolición de obras civiles. Se incluyen los producidos en la preparación del terreno.
- Residuos hospitalarios: Producidos en centros de atención a la salud.

El RETC tiene como objetivo llevar un inventario con información ambiental sobre sustancias químicas potencialmente dañinas, emitidas a la atmosfera, al agua y al suelo, y que son transferidas fuera el establecimiento productor para su tratamiento o eliminación. Además establece que los establecimientos que produzcan más de 12 toneladas de residuos anuales no regulados por otros reglamentos (básicamente el reglamento de residuos no peligrosos), los destinatarios de residuos y las municipalidades respecto de los residuos domiciliarios y municipales, también deben declarar al RETC mediante el Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER).

Así para que los productores puedan clasificar correctamente sus residuos en el SINADER, es que se utilizan los capítulos del Listado Europeo de Residuos (LER), que define el residuo con un código de 6 dígitos [15]:

00 00 00 *

Donde:

- Los primeros dos dígitos indican la fuente productora.
- Los segundos dos dígitos indican la fase específica de producción.
- Los terceros dos dígitos indican el tipo particular de residuo.
- Cuando está presente un *, indica que el residuo es considerado peligroso.

Respecto de los residuos considerados peligrosos por el D.S. Nº148 de 2005, éstos siguen utilizando el Sistema de Declaración y Seguimiento de Residuos Peligrosos (SIDREP) cuando corresponde.

En la Tabla 3.3 se puede apreciar la clasificación correspondiente a la fuente productora, cada uno de éstos ítems poseen subcapítulos que definen el residuo en específico mediante los dos pares de dígitos faltantes. Un ejemplo de codificación LER aplicado a residuos municipales puede verse en la Figura 3.6.

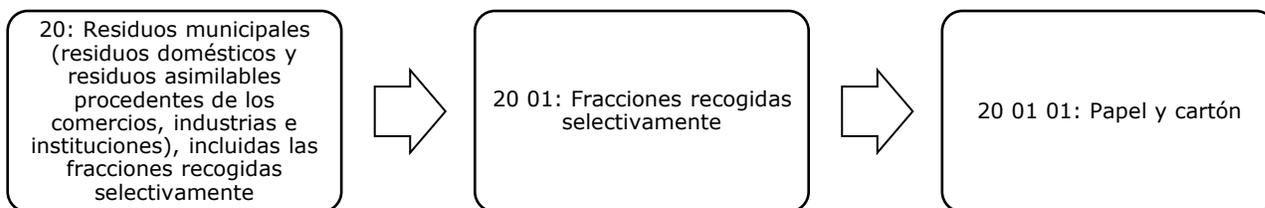


Figura 3.6: Ejemplo de aplicación de la codificación LER.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3: Capítulos LER correspondientes a la fuente productora de residuos.

Código	Capítulos
01	Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales
02	Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos
03	Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles, pasta de papel, papel y cartón
04	Residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil
05	Residuos del refinado de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón
06	Residuos de procesos químicos inorgánicos
07	Residuos de procesos químicos orgánicos
08	Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización (FFDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), adhesivos, sellantes y tintas de impresión
09	Residuos de la industria fotográfica
10	Residuos de procesos térmicos
11	Residuos del tratamiento químico de superficie y del recubrimiento de metales y otros materiales; residuos de la hidrometalurgia no férrea
12	Residuos del moldeado y tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos
13	Residuos de aceites y de combustibles líquidos (excepto los aceites comestibles y los de los capítulos 05 y 12)
14	Residuos de disolventes, refrigerantes y propelentes orgánicos (excepto los capítulos 07 y 08)
15	Residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza, materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría
16	Residuos no especificados en otro capítulo de la lista
17	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)
18	Residuos de servicios médicos o veterinarios o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de la prestación de cuidados sanitarios)
19	Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de depuración de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial
20	Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Residuos sólidos municipales (RSM) en la Región Metropolitana (RM)

Generación de RSM en la RM

Debido a la falta de información actualizada sobre la generación de RSM en la RM, se ha realizado una estimación en base a información de generación de RSM a nivel nacional entre los años 2000 y 2009, obtenida desde el informe "Primer reporte del manejo del residuos sólidos en Chile" publicado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) el año 2010 [16]. Con esta información se determinó que el promedio de crecimiento anual a nivel nacional en la producción de RSM es de 2,65%. De ésta forma se obtiene la proyección al año 2030 (Figura 3.7) utilizando como punto de partida la generación de RSM en la RM del año 2011 [17], la cual es conocida. También es conocida la generación del año 2013 [18], la cual presenta una diferencia de 1,04% con la proyección para ese año.

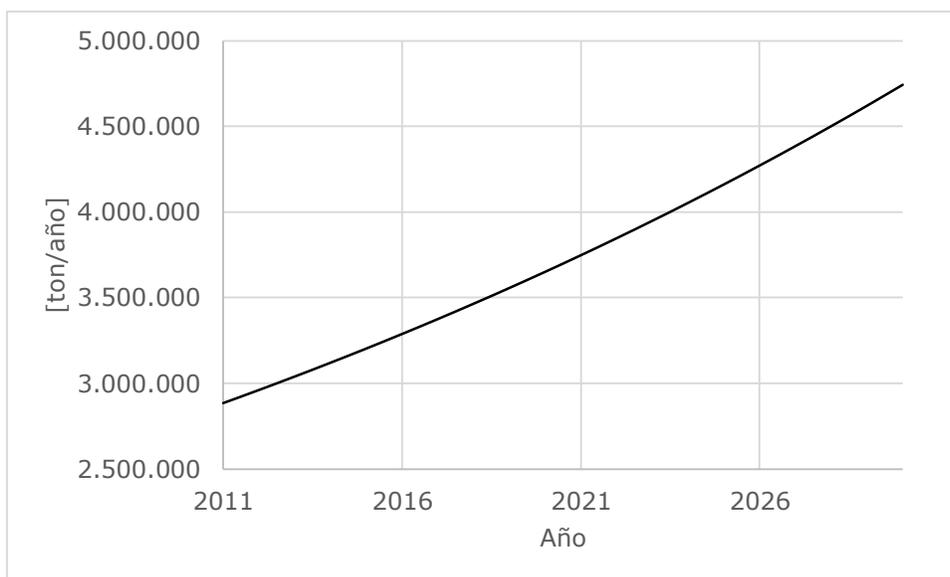


Figura 3.7: Proyección de generación de RSM para la RM hasta el año 2030.

Flujo de los RSM en la RM

El flujo típico de los RSM en la RM corresponde a:

- Origen: Los residuos son generados en los hogares o comercio general y son dispuestos sin separación en bolsas para ser retirados.
- Recolección: La basura es recogida por camiones recolectores 2 o 3 veces a la semana.
- Transporte: Los camiones recolectores llevan los residuos a una estación de transferencia o directamente a su destino de disposición final.
- Estación de transferencia (ET) (si aplica): Lugar de traspaso de los residuos desde los camiones recolectores a camiones de mayor tonelaje o tren, quienes llevan los residuos a su destino de disposición final, disminuyendo así los costos totales de transporte. Los residuos son compactados a una densidad de entre 0,50 y 0,60 [ton/m³].
- Disposición final: Disposición final en relleno sanitario.

Rellenos sanitarios en la RM

Las instalaciones disponibles para el manejo de residuos sólidos domiciliarios y asimilables en la RM son 4 rellenos sanitarios:

Relleno Sanitario Loma Los Colorados (RSLLC)

Operado por KDM S.A, está ubicado en la municipalidad de Til Til (Fundo Las Bateas, Ruta 5 Norte km 65,3). Comenzó su operación en marzo de 1996, tiene un área total de 800 ha, 240 ha para disposición de residuos y una vida útil esperada de 50 años (hasta el año 2046). El año 2013 registró un promedio de ingreso mensual de 176.716 toneladas de residuos.

Cuenta con una ET llamada "Estación de Transferencia Quilicura (ETQ)" donde los residuos son compactados y transferidos a contenedores de 30 toneladas que son transportados en tren.

Cuenta con una central de quema de biogás con una capacidad de 9.500 [m³N/h] produciendo 14,6 MW.

Es el único relleno sanitario que cuenta con una planta de reciclaje de 500 ton/día de capacidad, que utiliza separadores mecánicos y manuales.

Recibe los residuos de las siguientes municipalidades; Cerro Navia, Colina, Conchalí, Curacaví, Huechuraba, Independencia, La Cisterna, La Reina, Lampa, Las Condes, Lo Barnechea, Lo Prado, Maipú, Ñuñoa, Providencia, Pudahuel, Quilicura, Quinta Normal, Recoleta, Renca, San Miguel, Santiago, Vitacura y privados [18].

Relleno Sanitario Santa Marta (RSSM)

Operado por Consocio Santa Marta, está ubicado en Talagante (Predio Rústico Santa Elena de Lonquén s/nº). Comenzó su operación en abril de 2002, tiene un área total de 296 ha, 77 ha para disposición de residuos y una vida útil esperada de 20 años (hasta el año 2022). El año 2013 registró un promedio de ingreso mensual de 109.999 toneladas de residuos.

Cuenta con una ET llamada "Estación de Transferencia Puerta Sur (ETPS)" donde los residuos son compactados y transferidos a contenedores de 60 m³ que son transportados por camiones semirremolque.

Cuenta con una central de quema de biogás con una capacidad de 7.898 [m³N/h] produciendo 13 MW.

Recibe los residuos de las siguientes municipalidades; Buin, El Bosque, La Florida, La Granja, La Pintana, Lo Espejo, Macul, Pedro Aguirre Cerda, Paine, Peñalolen, Pirque, Puente Alto, San José de Maipo, San Bernardo, San Joaquín, San Ramón, Talagante y particulares [18].

Relleno Sanitario Santiago Poniente (RSSP)

Operado por Proactiva Servicios Urbanos, está ubicado en Maipú (Fundo La Ovejera s/nº, Rinconada Lo Vial). Comenzó su operación en octubre de 2002, tiene un área total de 300 ha, 77 ha para disposición de residuos y una vida útil esperada de 22 años (hasta el año 2024). El año 2013 registró un promedio de ingreso mensual de 37.131 toneladas de residuos.

No cuenta con ET. Cuenta con una central de quema de biogás con una capacidad de 3.000 (sólo quema).

Recibe los residuos de las siguientes municipalidades; Cerrillos, Estación Central, Padre Hurtado, Peñalolen, Calera de Tango, El Monte, Isla Maipo, Peñaflo y particulares [18].

Relleno Sanitario Cerros La Leona (RSCLL)

Operado por Gersa S.A, está ubicado en Til-Til (Parcela B Ex Fundo Los Llanos de Rungue, Ruta 5 Norte km 52). Comenzó su operación en marzo de 2013, tiene un área total de 1.368 ha, 116 ha para disposición de residuos y una vida útil esperada de 37 años (hasta el año 2050). El año 2013 registró un promedio de ingreso mensual de 3977 toneladas de residuos.

Cuenta con una ET llamada "Estación de Transferencia Cerro Los Cóndores (ETCLC)," donde los residuos son compactados y transferidos a contenedores de 60 m³ que son transportados por camiones semirremolque.

Cuenta con extracción pasiva de biogás (sólo quema). Sólo cuenta con clientes particulares [18].

En la Tabla 3.4 se puede ver un resumen de los residuos dispuestos en los rellenos mencionados durante el año 2013. Es importante mencionar que lo rellenos sanitarios también pueden recibir residuos no peligrosos de particulares, los cuales pueden o no ser análogos a los RSM en términos de composición y humedad, un ejemplo de estos residuos corresponden a los barroes provenientes de plantas de tratamiento aguas servidas.

Tabla 3.4: Residuos dispuestos en rellenos sanitarios en la RM durante el año 2013.

Instalación	RSM [ton/año]	Particulares y otros [ton/año]	Total [ton/año]
RSLLC	1.627.092	470.477	2.097.569
RSSM	1.102.321	217.664	1.319.985
RSSP	287.997	157.577	445.574
RSCLL	0	39.774	39.774
Total	3.017.410	885.492	3.902.902

Fuente: SEREMI MA RM [18].

Ubicación de los rellenos y estaciones de transferencia

En la Figura 3.8 puede verse la ubicación aproximada de las estaciones de transferencia y de los rellenos sanitarios previamente descritos.

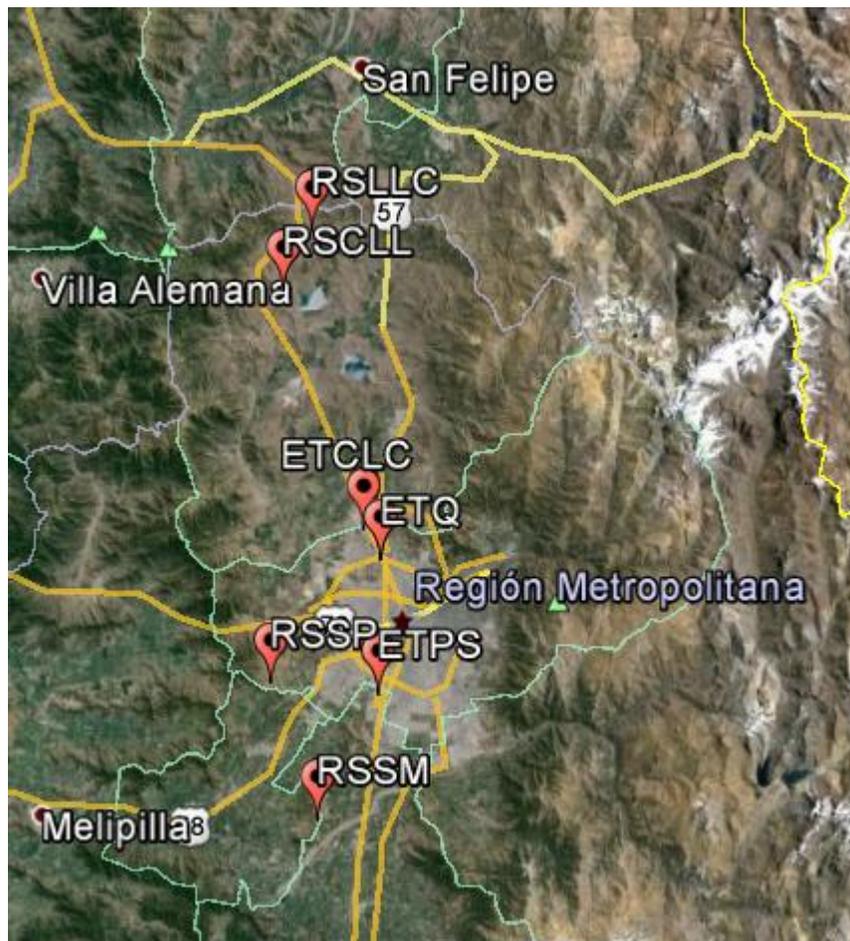


Figura 3.8: Ubicación de las estaciones de transferencia y de los rellenos sanitarios de la RM.
Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

Costos asociados al manejo de RSM

El servicio de recolección, transporte y disposición final de los RSM es realizado por privados contratados por las municipalidades quienes negocian libremente los costos de recolección y disposición, por lo que no existe un precio fijo establecido. El dinero necesario es cobrado indirectamente mediante impuestos a los usuarios finales y la tarifa del sistema es independiente de la cantidad de basura generada, por lo que este sistema no genera incentivos en los usuarios para generar menos residuos ni reciclar.

En general el costo total⁴ de recolección se reparte en [19] [20] [21] [22]:

- 80% asociado a recolección transporte, con un valor promedio de 35 USD por tonelada.
- 20% asociado a disposición final, con un valor promedio de 9 USD por tonelada. Dicho valor es considerablemente más bajo que el de países desarrollados como USA y algunos de Europa, cuyo valor fluctúa entre 44 USD y 175 USD por tonelada [23].

⁴ En ambos casos el tipo de cambio usado fue de 1 USD=690 CLP.

Gestión de residuos en la RM

En la RM existe valorización energética mediante centrales térmicas de biogás (27,6 MW), reutilización mediante compostaje, y reciclaje, siendo este último quien presenta un mayor aporte. Como ya se ha mencionado, no es obligatoria la separación en origen de los RSM, siendo el compostaje y valorización energética iniciativas de privados, mientras que el reciclaje se debe a privados y políticas voluntarias de comunidades o municipalidades. Dentro de los aporte al reciclaje de destacan:

- Recolectores informales de cartón, papel y metales (básicamente latas de aluminio).
- Comunidades: Edificios departamentos y condominios a veces cuentan disposición y recogida selectiva para plásticos, cartones, vidrios y aluminio.
- Políticas municipales: Puntos limpios, recogida selectiva en oficinas y papeleros de la vía pública.
- Políticas regionales: Destaca la iniciativa regional "Santiago Recicla" liderada por la SEREMI de medioambiente de la RM, que tiene como objetivo proveer la infraestructura suficiente para reciclar un 25% de los residuos generados en la RM para el año 2020.

Actualmente del total de residuos producidos en Chile se estima que sólo un 10% es reciclado [24].

Respecto de los RSM, hasta que no se implemente la recogida selectiva y separación en origen, el proceso ideal de gestión es el presentado en la Figura 3.9.

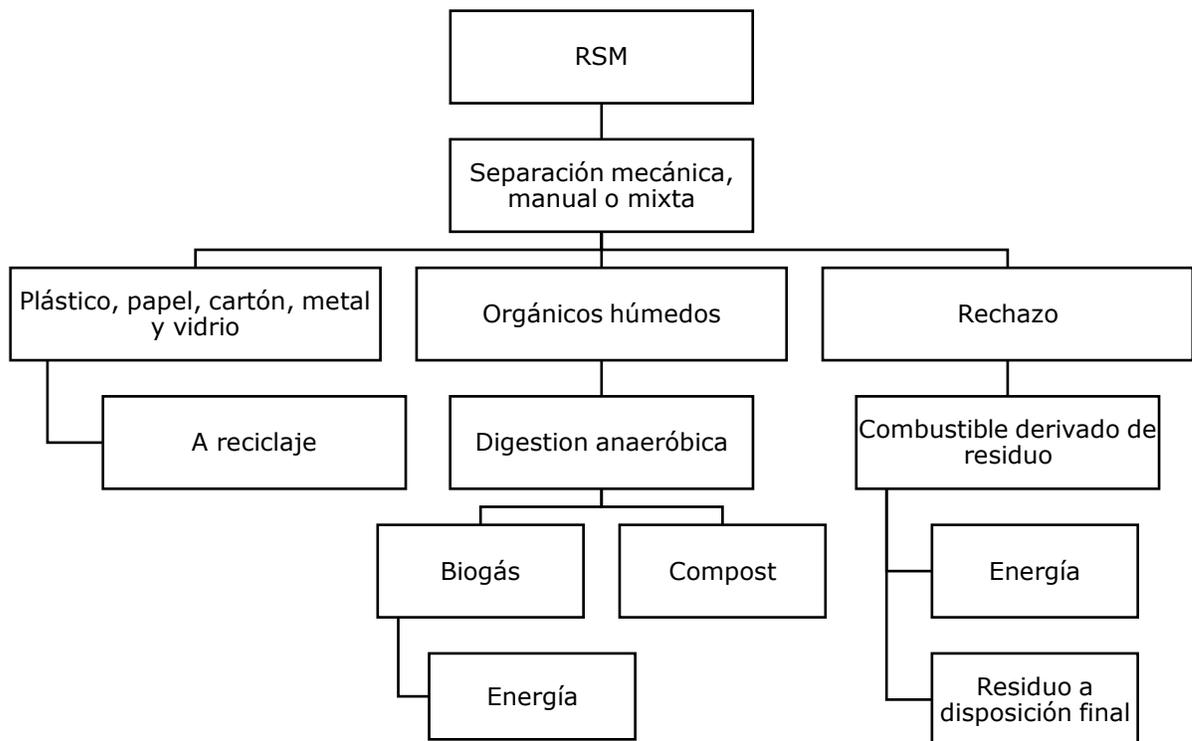


Figura 3.9: Proceso ideal de gestión en RSM no separados en origen.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo estos esfuerzos el año 2010, KDM inaugura el proyecto “Planta Recuperadora de Reciclables Relleno Sanitario Loma Los Colorados”. El diseño de la planta, –considerada la más grande de Sudamérica en su tipo-, contempla un procesamiento inicial de 500 toneladas por día de RSM, equivalentes a aproximadamente el 8% del flujo total de residuos que llegan al relleno [25]. En la Figura 3.10 se puede ver un esquema de funcionamiento de la planta y sus flujos másicos.

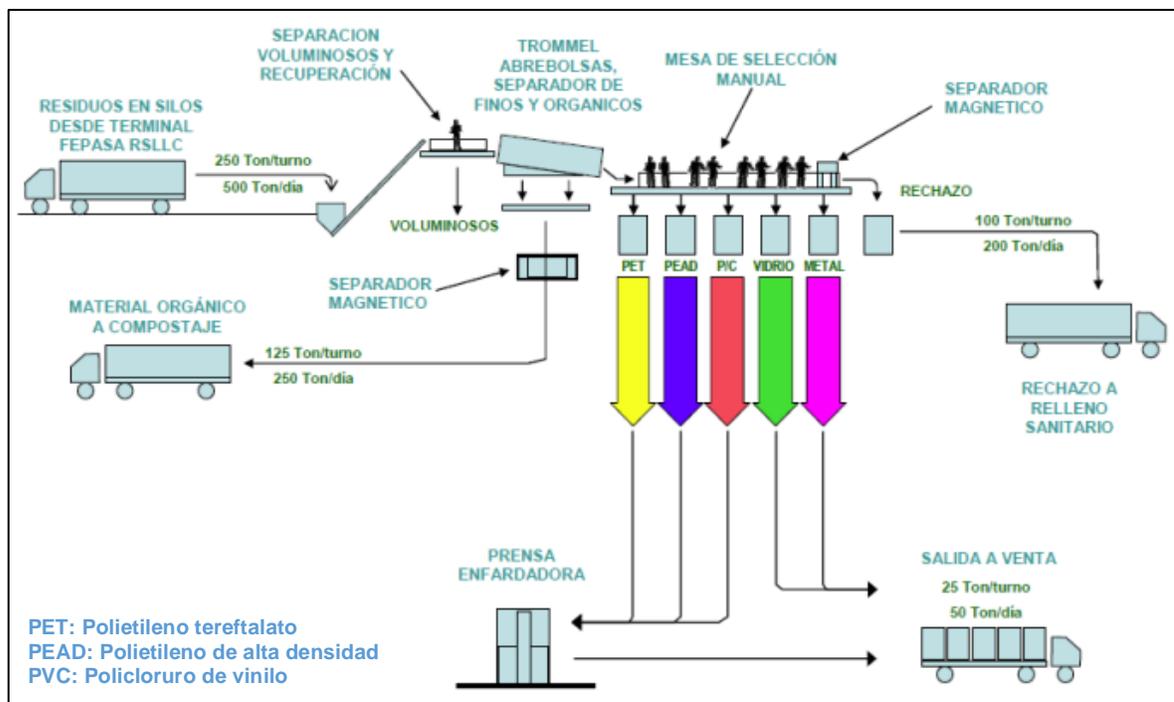


Figura 3.10: Esquema y flujos másicos de la Planta Recuperadora de Reciclables Relleno Sanitario Loma Los Colorados.

Fuente: Municipalidad de Vitacura [20].

El contenido de material reciclable presente en los RSM que llegan al RSLLC según datos de KDM alcanza 15,8% y un 7% es efectivamente recuperado (ver Tabla 3.5), equivalentes a 35 toneladas día, valor inferior al mostrado en la Figura 3.10.

Tabla 3.5: Contenido de materiales reciclables en residuos domésticos y asimilables.

Material	Contenido en RSM [%]	Eficiencia de recuperación	% Recuperado
PET	1,2	80	1,0
HDPE	0,5	90	0,5
LDPE	4,3	30	1,3
Metales	0,4	90	0,4
Papel	2,7	50	1,4
Cartón	2,7	50	1,4
Vidrio	3,3	20	0,7
Tetrapack	0,7	80	0,6
Total	15,8		7,0

Fuente: KDM [26].

Composición de los RSM de la RM

El estudio más completo respecto a composición de los RSM en la RM data del año 2006 y fue encargado por la CONAMA a la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Los componentes principales y su porcentaje en peso pueden verse en la Tabla 3.6, siendo los residuos alimentarios, papel y plásticos los tres principales en aporte.

Tabla 3.6: Componentes principales y su porcentaje en peso de los RSM de la RM.

Componentes principales	% en peso
Residuos alimentos	49,20
Residuos jardín poda	4,96
Papel	10,18
Cartón	3,33
Plásticos	10,07
Tetrapack	0,70
Pañales y celulosas sanitarias	4,95
Gomas	0,11
Cueros	0,07
Vidrio	3,94
Metales	1,80
Madera	0,83
Textiles	1,97
Suciedad y cenizas	4,20
Misceláneos (1)	3,69
Total	100

(1) Pilas, huesos, cuecos, cerámicas, residuos sólidos especiales (2), otros

(2) Residuos que potencialmente podrían presentar alguna característica de peligrosidad

Fuente: CONAMA RM [27].

Estimación del poder calorífico de los residuos

Dentro del poder calorífico se distingue el poder calorífico superior (HHV, del inglés *higher heating value*) y el inferior (LHV, del inglés *lower heating value*). El primero corresponde al calor total desprendido en la combustión incluido el calor latente de vaporización del agua producida en el proceso de combustión. En términos termodinámicos corresponde a la diferencia entre las entalpías de formación de reactantes y productos.

El LHV en contraparte no considera el calor latente de vaporización del agua producida en la combustión. La diferencia en la utilización de uno u otro radica en si el equipo en donde ocurre la combustión es capaz de aprovechar dicho calor latente, por ejemplo, en un motor de combustión interna convencional se debería tener en cuenta el LHV, pues los gases de combustión son liberados a la atmósfera con el agua en forma de vapor.

Además para ambos poderes caloríficos y datos de composición, se distingue la base según se ha medido el indicador:

- Base "como son recibidos" (ar, del inglés *as received*); incluye contenido de humedad y ceniza.
- Base seca (dry, seco en inglés); incluye contenido de ceniza.
- Base seca y libre de ceniza (daf, del inglés *dry ash free*).

La energía disponible en un combustible desconocido puede ser calculada por diversas técnicas; análisis último o elemental, análisis composicional, análisis próximo y por calorimetría. Después de estudiar cada uno de éstos, se ha optado por utilizar un análisis tipo elemental de los RSM debido a que se conocen los porcentajes en peso de los principales constituyentes, y la composición elemental y humedad estimada de cada uno de ellos.

Los datos de composición tipo análisis elemental daf junto a los pesos moleculares de cada átomo, permite calcular la fórmula empírica de los RSM y su peso molecular:

Donde la fórmula empírica tendrá la forma:

$$CH_aO_bN_cS_d \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Y la masa molecular estará dada por:

$$MM_{RSM\ daf} = C + a \cdot H + b \cdot O + c \cdot N + d \cdot S \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

$MM_{RSM\ daf}$:	Masa molecular [kg daf/kmol RSM daf]
C	:	Fracción en peso de carbono
H	:	Fracción en peso de hidrógeno
O	:	Fracción en peso de oxígeno
N	:	Fracción en peso de nitrógeno
S	:	Fracción en peso de azufre

Los datos de la composición tipo análisis elemental dry, permiten también calcular el HHV dry mediante fórmulas.

En particular se utilizara la fórmula de Dulong, pues posee poca diferencia con datos experimentales para éste tipo de residuos [28] [29]:

$$HHV_{RSM\ dry} = 33.801 \cdot C + 144.158 \cdot (H - 0,125 \cdot O) + 9.413 \cdot S \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

$HHV_{RSM\ dry}$:	HHV dry de los RSM [kJ/kg RSM dry]
------------------	---	------------------------------------

Luego para calcular el HHV ar y HHV daf se utiliza:

$$HHV_{RSM\ ar} = (1 - M) \cdot HHV_{RSM\ dry} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$HHV_{RSM\ daf} = \frac{HHV_{RSM\ dry}}{(1 - Ash_{dry})} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

M	:	Porcentaje en peso de humedad
$HHV_{RSM\ ar}$:	HHV ar [kJ/kg RSM ar]
$HHV_{RSM\ dry}$:	HHV dry [kJ/kg RSM dry]
$HHV_{RSM\ daf}$:	HHV daf [kJ/kg RSM daf]
Ash_{dry}	:	Porcentaje de ceniza de los RSM dry

Usando la Ecuación 3.2, la Ecuación 3.5 se puede escribir en términos molares referidos a masa de RSM daf:

$$HHV_{kmol\ RSM\ daf} = HHV_{RSM\ daf} \cdot MM_{RSM\ daf} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

$$HHV_{kmol\ RSM\ daf} \quad : \quad HHV\ daf\ [kJ/kmol\ RSM\ daf]$$

Para calcular ahora el LHV en base molar referida a masa de RSM daf, se utiliza:

$$LHV_{kmol\ RSM\ daf} = HHV_{kmol\ RSM\ daf} - \Delta H_{vap\ H_2O} \cdot (n_{H_2O} + n_{H_2}) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

$$\begin{aligned} LHV_{RSM\ daf\ kmol} & : \quad \text{LHV daf [kJ/Kmol RSM daf]} \\ \Delta H_{vap\ H_2O} & : \quad \text{Entalpía de vaporización del agua a 25 °C [kJ/kmol H2O]} \\ n_{H_2O} & : \quad \text{Moles de H2O debido a humedad [kmol H2O/kmol RSM daf]} \\ n_{H_2} & : \quad \text{Moles de H2 del combustible que formarán H2O [kmol H2/kmol RSM daf]} \end{aligned}$$

Con n_{H_2O} y n_{H_2} calculados mediante:

$$n_{H_2O} = \frac{MM_{RSM\ daf} \cdot M_{waf}}{MM_{H_2O} \cdot (1 - M_{waf})} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$M_{waf} = \left(\frac{100}{1 - Ash_{dry}} \right) \cdot M \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$n_{H_2} = \frac{H}{2} \cdot MM_{RSM\ daf} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde:

$$\begin{aligned} M_{waf} & : \quad \text{Porcentaje de humedad por masa de RSM húmedos y libre de ceniza (waf, del inglés wet ash free)} \\ MM_{H_2O} & : \quad \text{Masa molecular H2O [kg/kmol H2O]} \\ H & : \quad \text{Porcentaje en peso de hidrógeno monoatómico de los RSM dry} \end{aligned}$$

Luego podemos calcular el LHV daf, LHV dry y LHV ar en sus respectivas bases másicas mediante:

$$LHV_{RSM\ daf} = \frac{LHV_{kmol\ RSM\ daf}}{MM_{RSM\ daf}} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$LHV_{RSM\ dry} = (1 - Ash_{dry}) \cdot LHV_{RSM\ daf} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$LHV_{RSM\ ar} = (1 - M) \cdot LHV_{RSM\ dry} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde:

$LHV_{RSM\ daf}$: LHV daf de los RSM daf [kJ/kg RSM daf]
 $LHV_{RSM\ dry}$: LHV dry de los RSM dry [kJ/kg RSM dry]
 $LHV_{RSM\ ar}$: LHV ar de los RSM ar [kJ/kg RSM ar]

Si el combustible es secado hasta cierto porcentaje de humedad (%dry), se deben repetir los cálculos desde la Ecuación 3.4, donde los poderes caloríficos del combustible secado, HHV %dry y LHV %dry, serán obtenidos de forma análoga a los poderes caloríficos en base ar.

Notar que en el caso de los poderes caloríficos superiores, las bases dry y daf del combustible secado serán las mismas que las del combustible sin secar, sin embargo, para los poderes caloríficos inferiores dichas bases serán diferentes a las del combustible sin secar debido a la relación, -propia de su definición-, existente entre el poder calorífico inferior y el contenido de agua del combustible.

3.3 Sector de emisiones de carbono

En 1997 a través del Protocolo de Kioto (PK), diversos países industrializados acuerdan reducir emisiones de seis de sus gases de efecto invernadero (GEI), inicialmente, para fines de 2012; dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O), cuyos principales contribuyentes son el sector energía y transporte, el gas metano (CH_4), cuya principal contribución se encuentra en la descomposición de materia orgánica y de hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6), aportados principalmente por actividades industriales.

A partir de éste protocolo, diversas conferencias conocidas como Conferencia de las Partes (*Conference of the parties* en inglés, COP) y Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el Protocolo de Kyoto (*Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol* en inglés, CMP), organizadas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (*United Nations Framework Convention on Climate Change* en inglés, UNFCCC), que se celebran juntas de manera anual, han fijado los lineamientos de la reducción de gases de efecto invernadero lo que ha significado un estímulo importante al desarrollo de las ERNC a nivel mundial [12].

Así a partir de la necesidad de cumplir con el PK es que se crea un sistema de comercio a través del cual los gobiernos, empresas o individuos pueden vender o adquirir reducciones de gases efecto invernadero. Luego en el mercado del carbono existen dos tipos de transacciones:

Basadas en Proyectos: Se transan reducciones cuantificables de un proyecto. Dentro de este tipo de transacciones funcionan la Implementación Conjunta (IC) y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), en el primero países industrializados, llamados pertenecientes al Anexo I, pueden financiar proyectos de reducción de emisiones en otros países del Anexo I y recibir reducciones certificadas de emisiones (CER's) por ello, el segundo corresponde a un mecanismo similar pero entre países pertenecientes al Anexo I y países fuera de éste, generalmente países en desarrollo.

Comercio de Derechos de Emisión: Se transan derechos de emisión creados y asignados. Los cuales determinan un límite de emisiones para una determinada empresa o entidad. Si un emisor genera menos emisiones de lo permitido deja un margen de permisos de emisión que pueden ser vendidos a otras entidades, que por razones diversas, no consiguieron emitir menos del límite establecido [30].

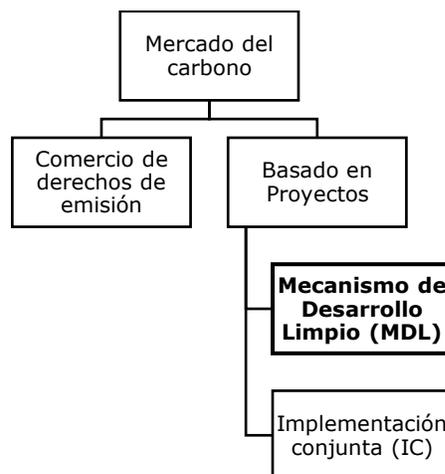


Figura 3.11: Estructura básica del mercado de carbono.

Para saber si el proyecto planteado en este trabajo puede participar de un MDL es necesario revisar el ciclo del proceso MDL, el cual puede dividirse en 7 pasos explicados a continuación [31].

A. Preparación del Documento de Diseño del Proyecto (Project Design Document en inglés, PDD)

Corresponde a un documento pre-formateado de control que el promotor debe completar para mostrar el diseño del proyecto y como éste cumple con los requisitos para la validación del MDL. El tipo de PDD a completar va a depender del tipo y escala del proyecto:

- Proyectos de energía renovable, eficiencia energética y de captación de GEI: Cuando las actividades de energía renovable son de hasta 15 [MW], las de eficiencia energética de hasta 15 [GWh/año] y los de captación de GEI emiten directamente menos de 15 [kton/año] de CO₂ equivalente, son denominados proyectos de pequeña escala.
- Proyectos de forestación y reforestación: Cuando remueven menos de 8 [kton/año] de CO₂ equivalente son considerados proyectos de pequeña escala.
- Programa de actividades: acción voluntaria coordinada por una entidad pública o privada que implementa cualquier política (incluyendo esquemas de incentivos económicos y otros programas voluntarios) que busca la reducción de emisiones de GEI o la remoción de éstos mediante sumideros.

Los aspectos más relevantes para la preparación del PDD corresponden a:

Consulta a los actores locales

Antes de la elaboración del PDD, el promotor debe consultar a los actores locales (individuos, grupos o comunidades afectadas o posiblemente afectadas por las actividades propuestas por el proyecto de MDL o acciones que conduzcan a la ejecución de dichas actividades) observaciones que tengan respecto del proyecto y se debe demostrar éstas han sido tomadas en cuenta.

Evaluación del Impacto Ambiental (EIA)

Se requiere que el promotor analice el impacto ambiental del proyecto y de ser necesario prepare una evaluación de impacto ambiental. Debe ser incluida o anexada al PDD.

Metodologías para estimar la línea de base

La línea de base de la metodología aprobada predice que ocurriría en ausencia del proyecto MDL y las emisiones de gases de efecto invernadero que se producirán. Comparando la línea de base con el proyecto, se puede obtener un estimado de cuanto se espera reducir las emisiones.

Existen diversas metodologías aprobadas por el Consejo Ejecutivo según el tipo de proyecto y su escala. Sin embargo, si no hay una metodología aprobada para establecer una línea de base aplicable a un determinado proyecto, una nueva metodología debe ser presentada para su eventual aprobación, antes de que el proyecto pueda ser validado en su conjunto.

Demostración de adicionalidad

Un proyecto es adicional si la reducción de GEI es por debajo de los que se hubiese emitido en ausencia de la actividad del proyecto. Esto significa que un proyecto no adicional generará créditos de carbono falsos, que en definitiva llevaría a un aumento de las emisiones totales a nivel mundial.

B. Obtención de la aprobación de cada uno de los países involucrados

El promotor debe obtener una confirmación por escrito tanto del país que aloja el proyecto (país no perteneciente al Anexo I) como del país que tiene la intención de compra de las CER's de ese proyecto (país perteneciente al Anexo I) y que ambos participan voluntariamente.

C. Validación y periodo de consulta pública de 30 días

Una vez listo el PDD, un validador, que en general es una empresa privada acreditada y designada por el UNFCCC, lo somete a consulta por un periodo de 30 días en los cuales el público tiene la oportunidad de presentar sus observaciones. Si éstas llevan a una modificación en la metodología de línea de base, el nuevo PDD debe también ser sometido a un nuevo periodo de consulta de 30 días. Luego, si el proyecto cumple con todos los requisitos MDL, el validador presenta un informe de validación al Consejo Ejecutivo.

D. Registro por el Consejo Ejecutivo del MDL

El registro por el Consejo Ejecutivo ocurre 8 semanas después de recibido el informe de validación, a menos de que uno de los países involucrados o al menos tres de los integrantes del Consejo Ejecutivo soliciten una revisión.

E. Monitoreo de la reducción de emisiones

Con el proyecto ya registrado, el promotor comienza a supervisar la reducción de emisiones de acuerdo al plan de seguimiento del PDD. Los operadores del proyecto deben recoger y archivar todos los datos necesarios para calcular las reducciones de emisiones efectivas y escribir un informe de seguimiento.

F. Verificación, certificación y expedición de créditos de reducción de emisiones

Una nueva entidad de validación debe verificar que las reducciones indicadas en el reporte de monitoreo son efectivas, verificándolas cada dos meses durante el periodo de acreditación. Una vez que el verificador confirma que las reducciones se han producido, se certificará por escrito al Consejo Ejecutivo, quién finalmente emite créditos de carbono en el mismo valor a la cantidad de emisiones reducidas verificables.

G. Renovación del periodo de acreditación

Se pueden elegir dos enfoques diferentes para definir la duración del periodo de acreditación:

- Un máximo de siete años con opción de renovarse dos veces como máximo.
- Un máximo de diez años sin opción de renovación.

La renovación del período de acreditación requiere una actualización del PDD, la cual confirme que la línea de base del proyecto sigue siendo válida o ha sido actualizada. El procedimiento para la renovación es similar a la de la solicitud de inscripción.

En este trabajo sólo se realizará la estimación de la reducción de emisiones del proyecto siguiendo las metodologías oficiales. Esto incluye la estimación de la línea de base, que además sirve para determinar que el proyecto es adicional, abarcando de esta forma los aspectos más relevantes del ciclo del proyecto MDL. Un ejemplo con detalles de los cálculos y su resultado se pueden ver en el Anexo A.

3.4 Valorización energética de residuos y gasificación por plasma

El aprovechamiento energético de residuos por medio de combustión, pirolisis o gasificación no es nuevo, aunque el uso de la tecnología de plasma lo es. Las principales diferencias entre estos procesos pueden ser comparadas mediante dos aspectos de operación; el ambiente de reacción y la temperatura. La combustión es una reacción oxidante que ocurre en un ambiente con exceso de oxígeno respecto del valor estequiométrico, a temperaturas entre 850 °C y 1.200 °C. La pirolisis es una reacción de descomposición térmica que ocurre en un ambiente en ausencia de oxígeno a temperaturas entre 400 °C y 900 °C. La gasificación es una reacción que ocurre en un ambiente de reducción donde la cantidad de oxígeno es menor respecto del valor estequiométrico, a temperaturas desde los 400 °C [32]. Una comparación básica entre los procesos más comunes de valorización energética puede verse en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Comparación entre diferentes tipos de valorización energética.

	Gasificación por plasma	Gasificación tradicional	Incineración
Residuos tratados	De todo tipo	Poder calorífico suficientemente alto y humedad suficientemente baja para para mantener calor de reacción necesario	Poder calorífico suficientemente alto y humedad suficientemente baja para para mantener combustión
Tipo de reacción	Reducción. Se utiliza menos oxidante que el estequiométrico. Oxidante limitado y controlado	Reducción. Se utiliza menos oxidante que el estequiométrico. Oxidante limitado y controlado	Oxidante. Se utiliza más oxidante que el estequiométrico. Exceso de oxidante para obtener una combustión completa
Temperatura del proceso	900 °C – 5.000 °C	400 °C - 800 °C	850 °C – 1.200 °C
Eficiencia en la recuperación de energía	Mayor recuperación gruesa de energía debido a descomposición completa a nivel elemental de los residuos	Mayor debido a menor pérdida de calor por déficit de aire. No todo el carbono sólido es descompuesto, por ende no toda la energía es utilizada	Baja debido a que exceso de aire provoca pérdidas de calor por gases de escape calientes difíciles de recuperar
Flexibilidad de uso de productos energéticos	Gas combustible y calor puede ser aprovechado en distintos equipos	Gas combustible y calor puede ser aprovechado en distintos equipos	Sólo calor puede ser aprovechado
Emisiones	Menores que gasificación tradicional e incineración. Gas de combustible debe ser filtrado antes de ser utilizado	Menores que incineración. Gas de combustible debe ser filtrado antes de ser utilizado	Elevadas, medidas de mitigación importantes son requeridas
Contaminantes	Menor cantidad de: Material particulado (MP), dioxinas y furanos, otros contaminantes en forma reducida; H ₂ S, COS, etc.	MP, carbón sólido, alquitranes, ceniza fina y gruesa, dioxinas, furanos, otros contaminantes en forma reducida; H ₂ S, COS, etc.	MP, ceniza fina y gruesa, otros contaminantes en forma oxidada; NO _x , SO _x , etc.
Residuos generados	Vitrificado inerte	Ceniza y carbón sólido	Ceniza
Requerimientos de energía	Alto	Bajo	Bajo

3.4.1 Proceso de gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico a través del cual un compuesto carbonoso es transformado en un gas combustible formado principalmente por distintas proporciones de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂). Cuando está formado principalmente por hidrógeno y dióxido de carbono es llamado gas de síntesis. Los compuestos inorgánicos presentes forman cenizas o vitrificados según el tipo de tecnología de gasificación utilizada.

La principal ventaja de la gasificación es que el gas combustible puede ser quemado en un proceso de combustión directa de alta temperatura de mayor rendimiento y además puede también ser transformado en distintos combustibles líquidos, tal como se aprecia en la Figura 3.12 [33].

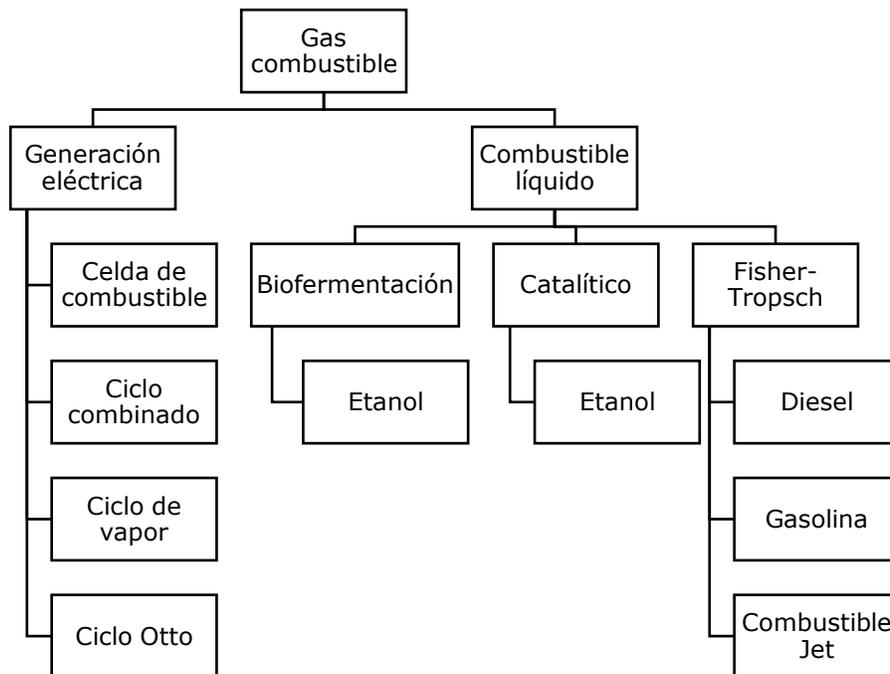


Figura 3.12: Diversos usos del gas de combustible.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso básico de gasificación puede describirse en dos etapas: Una primera etapa de pirólisis que libera los elementos volátiles del compuesto carbonoso, donde el remanente que no se ha volatilizado corresponde principalmente a carbono fijo y cenizas. La segunda etapa corresponde al proceso de gasificación propiamente tal donde el remanente de carbono fijo reacciona con vapor, hidrógeno, aire u oxígeno. La gasificación con aire resulta en un gas combustible diluido en nitrógeno de bajo poder calorífico. La gasificación con oxígeno resulta en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno de mejor calidad con cantidades despreciables de nitrógeno y la gasificación con vapor o "reformado" tiene como resultado la formación de hidrógeno y dióxido de carbono [32].

Cuando parte del compuesto carbonoso es combustionado para proporcionar el calor necesario para la gasificación se habla de gasificación autotérmica y cuando el calor es proporcionado por un medio externo se habla de gasificación alotérmica.

El proceso químico de gasificación es complejo y está compuesto por varias reacciones químicas. Algunas de ellas transforman la materia orgánica en compuestos intermedios que luego son transformados en los productos finales. Si bien el proceso es complejo, se puede simplificar describiéndolo por las siguientes reacciones (rx):

Rx de Boudouard	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	(Endotérmica)	Ecuación 3.14
Rx de gas de agua	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	(Endotérmica)	Ecuación 3.15
Rx de metanación	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	(Exotérmica)	Ecuación 3.16
Rx de desplazamiento de gas de agua	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	(Exotérmica)	Ecuación 3.17
Rx de descomposición de metano	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	(Endotérmica)	Ecuación 3.18

Donde las características más importantes de operación; humedad y composición del combustible, temperatura de operación y cantidad de oxígeno determinarán las cantidades de productos en las reacciones presentadas anteriormente, y por ende la composición y características del gas combustible.

3.4.2 Definición de plasma

El plasma, desde el punto de vista de la física, corresponde a uno de los cuatro estados fundamentales de la materia junto al estado sólido, líquido y gaseoso (ver Figura 3.13), y es de hecho, el estado más abundante de la naturaleza. La mayor parte de la materia en el universo visible se encuentra en estado plasma. Fenómenos terrestres como los rayos y auroras polares junto a artefactos conocidos como monitores, tubos fluorescentes, luces de neón, soldadoras al arco, etc. corresponden al estado plasma o a una aplicación de éste.

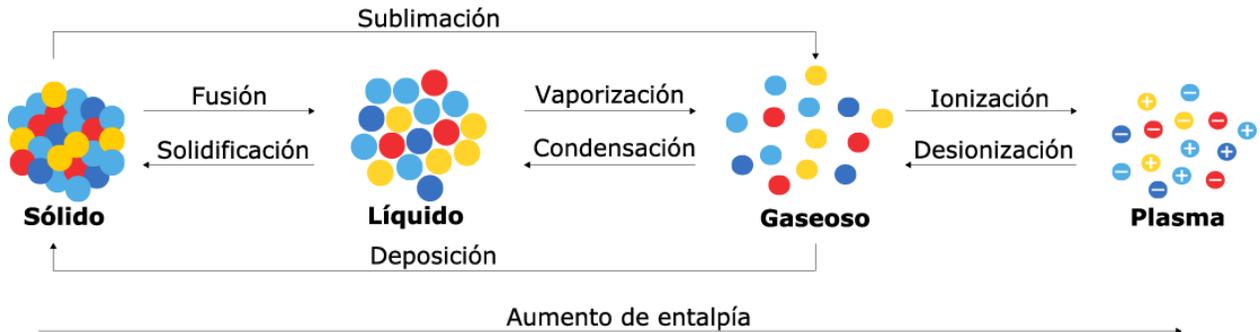


Figura 3.13: Estados de la materia y sus relaciones.
Fuente: Elaboración propia.

La distinción básica entre estos estados recae en la fuerza de los enlaces que mantienen juntas sus partículas constituyentes, más aún, en el equilibrio entre la energía cinética aleatoria (energía térmica) de sus átomos o moléculas y las fuerzas de sus enlaces interpartículas. Así al elevar la temperatura de una sustancia sólida o líquida, sus átomos o moléculas aumentarán su energía cinética térmica hasta superar la energía potencial de enlace interpartículas originando un cambio de fase ya sea a líquido o gas. En el caso de un gas molecular, no ocurre un cambio de fase en el sentido termodinámico, pero cuando se aplica energía suficiente y se supera la energía de enlace molecular, las moléculas irán disociándose gradualmente en átomos y a una temperatura suficientemente elevada las colisiones entre átomos producirán desprendimiento de electrones formando un gas ionizado o plasma que se caracteriza por ser un buen conductor eléctrico susceptible de interacciones electromagnéticas [34].

El plasma se puede caracterizar por su grado de ionización y densidad; el grado de ionización se refiere a la proporción de átomos que han ganado o perdido electrones, lo cual es controlado principalmente por la temperatura de los electrones. La densidad del plasma se refiere en realidad a la densidad de electrones, es decir, al número de electrones por unidad de volumen [34].

El plasma además posee dos estados generales; de equilibrio y no equilibrio. El estado de equilibrio indica que las temperaturas de los electrones, iones y átomos neutros son casi iguales, pudiendo alcanzar temperaturas desde unos pocos miles a más de diez mil grados Kelvin, por lo que el plasma en equilibrio es también llamado plasma térmico. El plasma térmico en general tiene un alto grado de ionización y además como sus iones y átomos representan la mayor parte de la masa del gas y se encuentran a alta temperatura, significa que el plasma térmico posee gran cantidad de energía. Por otro lado, el estado de no equilibrio significa que las temperaturas de los electrones, iones y átomos neutros son diferentes, siendo en general la temperatura de los electrones sustancialmente mayor que el resto de las partículas, además, la temperatura de estas últimas puede ser baja, incluso de orden de cientos de grados Kelvin, por lo que el plasma de no equilibrio es también llamado plasma no térmico [35].

3.4.3 Generación artificial de plasma

Los principales medios para la generación artificial de plasma corresponden a:

Fotoionización

La ionización se produce por absorción de fotones incidentes (Figura 3.14) cuya energía es igual o mayor que el potencial de ionización del átomo absorbente. El exceso de energía del fotón se transforma en energía cinética del par electrón-ion formado. La ionosfera de la Tierra es un ejemplo natural de plasma fotoionizado [34].

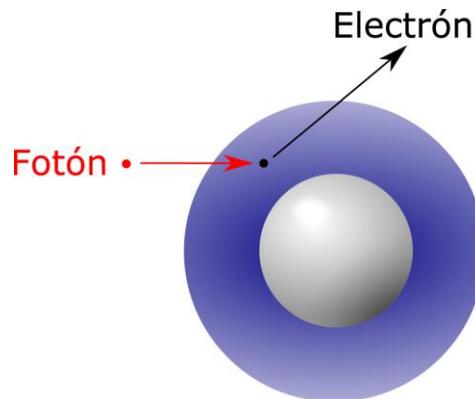


Figura 3.14: Proceso de fotoionización representado en un átomo.
Fuente: Elaboración propia.

Descarga eléctrica en gas

Al aplicar una corriente eléctrica a través de un gas dieléctrico, la diferencia de potencial y el campo eléctrico producido atrae a los electrones hacia el ánodo, y los núcleos hacia el cátodo.

Aumentando el voltaje, la corriente polariza el material por sobre su límite dieléctrico, llamado también punto de ruptura dieléctrica, a partir del cual comienza la ionización. La ionización ocurre como consecuencia de un proceso en cascada (Figura 3.15) donde el primer impacto de un electrón en un átomo neutro produce un ion y dos electrones los cuales impactan átomos de gas neutros produciendo más iones y electrones [36].

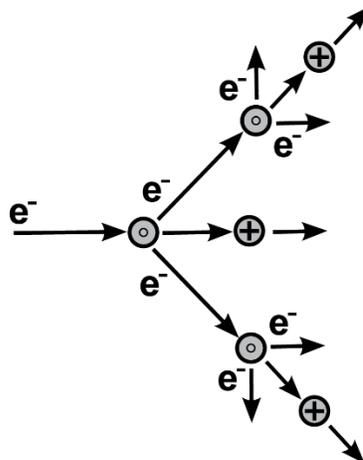


Figura 3.15: Proceso de ionización en cascada.
Fuente: Elaboración propia.

Además dentro del grupo plasmas producidos por descarga eléctrica en gas destacan:

Descargas de baja presión

- Plasma de descarga incandescente: No térmico, generado por la aplicación de corriente directa (*direct current* en inglés, DC) o campos eléctricos oscilantes (radio frecuencia, RF) menores a 100 kHz. Es utilizado en tubos de neón, tubos fluorescentes, monitores, etc.
- Plasma de acoplamiento capacitivo (*capacitive coupled plasma* en inglés, CCP): No térmico, generado por la aplicación de RF a 13,56 [Hz]. Es utilizado en aplicaciones de lámina delgada (semiconductores), grabado, etc.
- Plasma de arco en cascada (*cascaded arc plasma* en inglés): Térmico, produce plasma de alta densidad y baja temperatura.
- Plasma de acoplamiento inductivo (*inductively coupled plasma* en inglés, ICP): No térmico, similar a CCP pero generado por campos magnéticos variables en el tiempo.
- Plasma calentado por ondas: No térmico, generado por RF o microondas, la energía es traspasada al gas mediante campos eléctricos y magnéticos.

Descargas a presión atmosférica

- Descarga de arco eléctrico: plasma térmico de alta potencia y temperatura, generado mediante corriente DC o corriente alterna (*alternating current* en inglés, AC). Es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales; soldadoras, cortadoras de acero, maquinado, etc.
- Descarga de corona: plasma no térmico, generado por alto voltaje aplicado en electrodos con equinas afiladas. Es utilizado en la generación de ozono y precipitadores electrostáticos de partículas.
- Descarga de barrera dieléctrica (*dielectric barrier discharge* en inglés, DBD): plasma no térmico, generado por aplicación de alto voltaje, donde uno o ambos electrodos están recubiertos por un dieléctrico. Tiene aplicaciones en tratamiento de superficies para mejorar adhesión de pinturas, pegamentos, etc.
- Descarga capacitiva: equivalente al plasma de acoplamiento pero a presión atmosférica. Requiere de una mayor potencia.
- Descarga piezoeléctrica directa: plasma no térmico, de baja temperatura, generado mediante un transformador piezoeléctrico. Estos transformadores son muy compactos, por lo que son aptos para aplicaciones donde no se desea el uso de una fuente de poder externa.

3.4.4 Antorchas de plasma térmico

Las antorchas de plasma térmico producen plasma artificialmente mediante descarga de arco eléctrico a presión atmosférica, por lo que producen un plasma térmico de alta potencia y temperatura, pudiendo alcanzar la corriente de plasma entre 5.000 y 10.000 °C [37]. Como ya se mencionó anteriormente pueden utilizar corriente DC o AC, siendo preferida la primera debido a que presenta mayor estabilidad, mejor control, menor consumo de electrodos, menor consumo eléctrico y menor desgaste refractario [38].

Se distinguen en general dos tipos de antorchas de plasma según disposición de electrodos (ver Figura 3.16): De arco eléctrico transferido, donde uno de los electrodos se encuentra fuera de la antorcha, pudiendo formar arcos más largos y localizados. Y de arco eléctrico no transferido, donde ambos electrodos están en la misma antorcha.

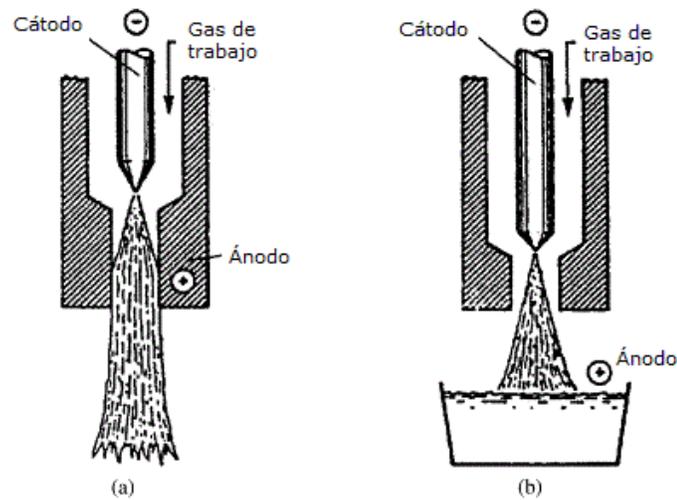


Figura 3.16: Antorchas de plasma; (a) de arco no transferido, (b) de arco transferido.
Fuente: Artinaid.com

El arco eléctrico ocurre en el espacio entre electrodos, por donde circula el gas de trabajo que formará el plasma, y que en general corresponde a aire comprimido. Las bobinas magnéticas tienen como objetivo rotar el arco de modo de mejorar la transferencia de calor. Finalmente el fluido refrigerante tiene como objetivo alargar la vida útil de los electrodos. Un diagrama de componentes puede verse en la Figura 3.17 y una antorcha real en operación en la Figura 3.18.

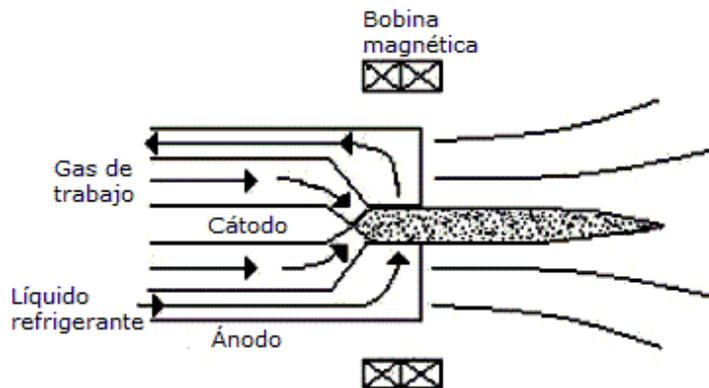


Figura 3.17: Antorcha de plasma de arco no transferido, con sistema de refrigeración y bobinas magnéticas.
Fuente: Leal-Quirós [39].



Figura 3.18: Antorcha de plasma.
Fuente: Westinghouse Plasma Corporation (WPC).

Existen varios proveedores de antorchas de plasma (Anexo B), que ofrecen rangos de potencia desde 5 kW hasta 10.000 kW, con eficiencias que van entre 70 y 90% , donde esta eficiencia representa el porcentaje de potencia del arco que sale de la antorcha y entra al proceso [40] [39]. Los diseños y configuraciones específicas de las antorchas vienen dados por el proceso en cual serán utilizadas.

Las principales aplicaciones de las antorchas de plasma térmico son [41]:

- Deposición de revestimientos y películas: Mediante diversas técnicas tales como atomización por plasma y deposición química o física de vapor por plasma térmico.
- Síntesis de polvos finos: Es posible producir polvos finos utilizando una técnica similar a la utilizada por la deposición química de vapor por plasma térmico donde el vapor es sometido a enfriamiento rápidamente para lograr la nucleación de partículas.
- Metalurgia: Uso en fundido/refundido de metales y en metalurgia extractiva.
- Densificación/compactación: Varios materiales en especial refractarios pueden ser densificados mediante esferización y sinterización mediante plasma.
- Corte y soldadura: Cortes y soldaduras mediante plasma de arco eléctrico son ampliamente conocidos y utilizados en la actualidad. Ejemplo de ello son la soldadura TIG (del inglés *tungsten inert gas*), MIG (del inglés *metal inert gas*) y de arco sumergido.
- Descomposición en constituyentes elementales: La alta temperatura permite descomponer en sus constituyentes elementales un compuesto. Esta es la aplicación de interés de este trabajo.

El general el uso de antorchas de plasma va acompañado de los siguientes equipos accesorios:

- Fuente de poder: Encargada de alimentar con corriente DC la antorcha de plasma.
- Sistema de control: Controla y varía los parámetros de operación; alimentación DC, sistemas de gas y refrigeración.
- Sistema de gas de trabajo: Corresponde a una unidad de aire comprimido o almacenamiento según corresponda.

- Sistema de refrigeración: Unidad encargada de mantener el fluido refrigerante a una temperatura de trabajo adecuada.

3.4.5 Gasificación mediante reactor con antorchas de plasma térmico

Una correcta gasificación requiere de condiciones muy controladas, por lo que se realiza en un equipo llamado reactor de gasificación que contiene uno o varios recipientes cerrados. En general, la geometría del reactor, el número, disposición y características de diseño de las antorchas, así como las características de operación de todo el conjunto son definidas por el proveedor de la tecnología de plasma.

Se distinguen dos principales tipos de tecnología de gasificación por plasma:

- Gasificación en reactores autotérmicos en combinación con plasma térmico; la energía necesaria para la gasificación viene de la combustión parcial del combustible y las antorchas de plasma son utilizadas para realizar cracking térmico al gas combustible que sale del reactor, ayudando así a remover contaminantes y para ayudar al vitrificado de la ceniza. Ejemplos de compañías que utilizan esta disposición son Europlasma (Francia), Plasco (Canadá), Bellwether Gasification Technologies (Alemania), Advanced Plasma Power (Reino Unido), entre otros. En la Figura 3.19 se puede ver la disposición de éste tipo de reactores.

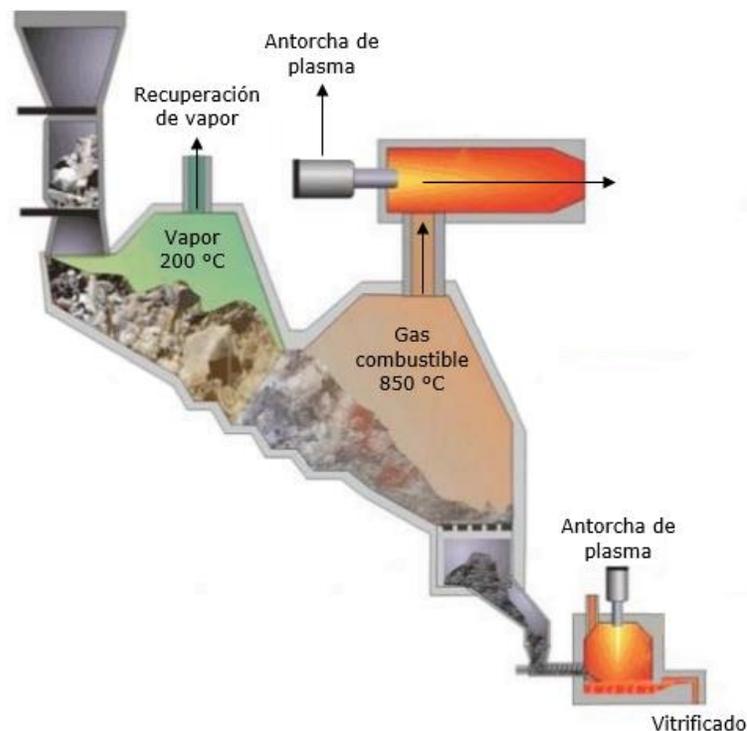


Figura 3.19: Reactor autotérmico.
Fuente: Europlasma.

- Gasificación en reactores alotérmicos con energía aportada por plasma térmico; la energía necesaria para la gasificación es aportada en su totalidad por las antorchas de plasma, por lo que todo el combustible es gasificado impidiendo la formación de ceniza la cual es vitrificada directamente en el proceso de gasificación. Una ventaja importante de este tipo de reactores, es que admiten residuos complicados para otros reactores como lo son los residuos altos en humedad, aunque de todas formas la humedad tiene un impacto negativo importante en el rendimiento del proceso de gasificación [28]. Ejemplos de compañías que utilizan esta disposición son Alter NRG/Westinghouse Plasma Corporation (Canadá/USA), InEnTec (USA), Plazarium (Rusia), MPM Technologies (USA), Pyrogenesis (Canadá), entre otros. En Figura 3.20 la se puede ver la disposición de éste tipo de reactores.

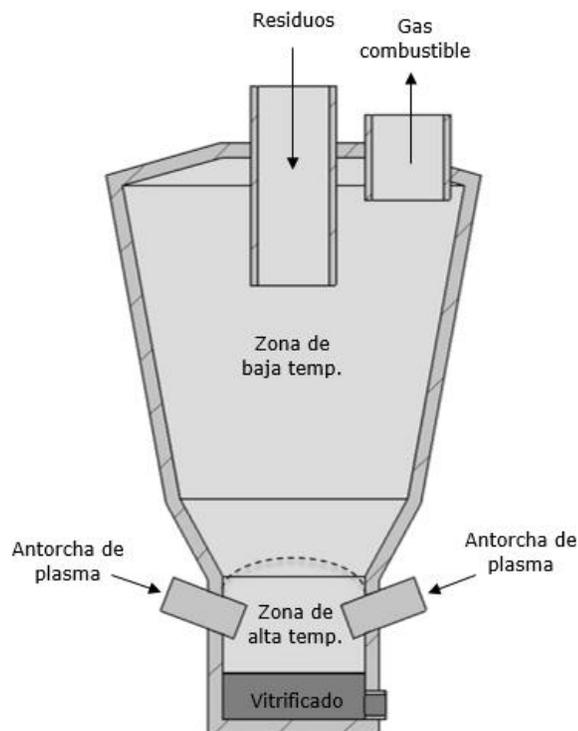


Figura 3.20: Reactor alotérmico.
Fuente: Valmundsson-Janajreh [42].

La principal diferencia de la gasificación tradicional con la por plasma es que esta última permite temperaturas de operación más elevadas en condiciones de cantidad de oxígeno reducido, lo cual permite descomponer prácticamente todos los compuestos del material a excepción de los compuestos radioactivos, los cuales de todas formas quedan atrapados en el vitrificado que forman los compuestos inorgánicos que no se gasifican y que a temperaturas más bajas formarían ceniza. El vitrificado se caracteriza por producir muy pocos lixiviados, por lo que es considerado altamente estable, lo que permite una disposición segura en relleno sanitario o bien su uso como relleno o agregado en construcción. También puede ser utilizado como aislante si ha sido procesado. Esto significa que el uso de rellenos sanitarios podría reducirse a una cantidad mínima e incluso erradicarse.

El vitrificado puede tener diferentes formas (ver Figura 3.21) y características en función del proceso de enfriamiento al que ha sido sometido [39]:

- Si es enfriado al aire libre forma rocas negras y vidriosas similares a vidrio volcánico que puede ser utilizado para recubrimientos similares al asfalto o bien ser moldeado para usarse como material de construcción.

- Si es enfriado con agua forma un vitrificado parecido a arena que permite recuperar fácilmente nódulos de metal.
- Si es enfriado con aire comprimido o se utiliza un sistema centrífugo al momento de estar fundido, formará lana mineral, la cual tiene usos como aislante, absorbente, sustrato para cultivos hidropónicos, etc.



Figura 3.21: (a) Vitrificado enfriado al aire libre. (b) Nódulos de metal. (c) Vitrificado con agua. (d) Vitrificado lana mineral.

Fuente: U.S. Science & Technology Corporation.

Respecto del mercado nacional de lana mineral y de vidrio, se debe mencionar que sólo se ha encontrado un fabricante de dichos productos en Chile, la Compañía Industrial El Volcán S. A., la cual posee dos fábricas ubicadas en Puente Alto, para producir lana mineral y de vidrio respectivamente. La planta de lana mineral no registra documentos en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), por lo que se desconoce su capacidad productiva. Respecto de la planta de lana de vidrio actualmente posee una capacidad de fabricación de 33 toneladas diarias (RCA 131/2006), con una posible ampliación a 66 toneladas diarias, la cual se encuentra en calificación (Resolución de Admisibilidad 476/2016). En la Figura 3.22 se puede observar el total estimado de lana aislante transado en el mercado nacional, teniendo en cuenta además las importaciones de lana mineral y de vidrio (información de aduanas vía ley de transparencia). Durante el año 2015 se transaron aproximadamente 35.000 toneladas de lana aislante.

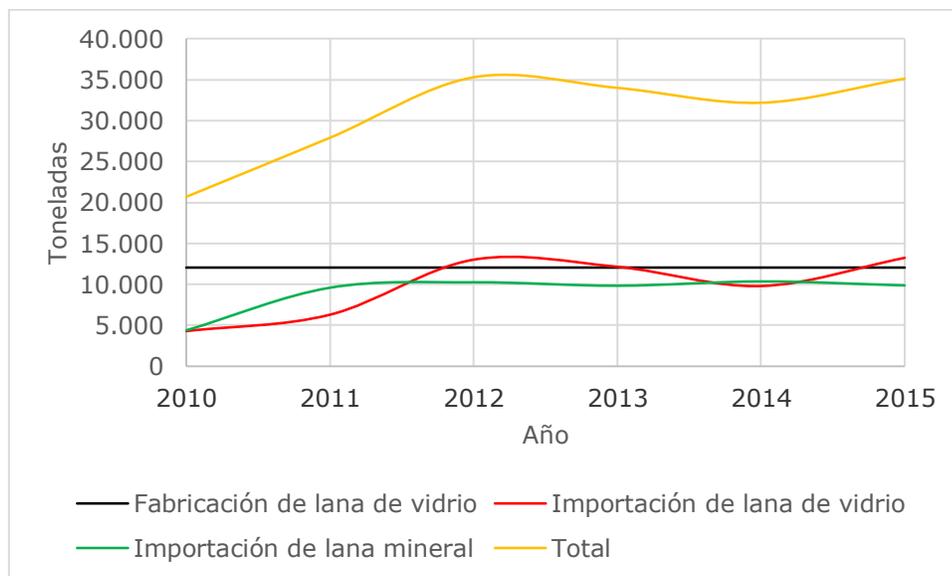


Figura 3.22: Cantidad de lana aislante transada en el mercado nacional entre los años 2010 y 2015.

La alta temperatura y cantidad de oxígeno reducido permite también que el gas combustible contenga menos contaminantes incluidos algunos peligrosos como dioxinas y furanos, los cuales deben ser removidos antes de combustionar el gas.

Respecto de las desventajas del proceso, la principal corresponde al alto consumo eléctrico de las antorchas de plasma, valor altamente dependiente de la cantidad de compuestos carbonosos y humedad del tipo de residuos a tratar [43].

En la actualidad existen varias centrales que utilizan la tecnología de plasma como medio de valorización energética o de tratamiento térmico de residuos. Una lista de éstas puede verse en el Anexo C. De ellas se describirán los aspectos más relevantes de las centrales de Alter NRG Tees Valley 1 y 2 (TV1 y TV2) ubicadas en Teesside, Inglaterra, pues tienen una capacidad similar a la planteada en este trabajo:

- Ambas centrales están diseñadas para procesar 950 toneladas por día de residuos más un 4% de coque metalúrgico cada una [44].
- Los residuos a utilizar corresponden al rechazo de una planta de reciclaje cercana y tienen un poder calorífico inferior de 11.600 [kJ/kg] en base seca que junto coque metalúrgico forman un combustible de 12.810 [kJ/kg] en base seca [44].
- Para cada central Alter NRG declara una generación gruesa de 49,9 MW y neta de 31,8 MW, equivalentes a un rendimiento de 39% y 25% respectivamente [44].
- Cada central ocupa un reactor Westinghouse modelo G65 (Figura 3.23), los más grandes jamás construidos; 25 metros de altura, diámetro inferior de 4 metros y superior de 9 metros, interior recubierto de material refractario, 204 toneladas [45].
- Cada reactor se estima ocupa 6 antorchas Marc 11H, con una potencia disponible de entre 800 y 2.400 kW cada una [46].
- A abril de 2016 TV1 aún se encuentra en testeo y análisis debido a problemas operacionales y la construcción de TV2 se encuentra suspendida desde noviembre de 2015 [47].



Figura 3.23: Reactor de gasificación Westinghouse G65.
Fuente: Westinghouse Plasma Corporation (WPC).

Finalmente para estimar el comportamiento de un gasificador se destacan las siguientes posibilidades [48]:

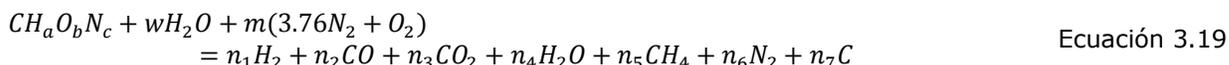
- Experimentos, plantas modelos.
- Simulación.
 - Equilibrio termodinámico.
 - Constantes de equilibrio (modelo estequiométrico).
 - Minimización de la energía libre de Gibbs (modelo no estequiométrico).
 - Modelamiento cinético.
 - Mecánica de fluidos computacional.
 - Redes artificiales neuronales.

Dado el alcance de este trabajo y debido a que la temperatura de operación de un reactor de gasificación por plasma permite suponer que se alcanza el equilibrio termodinámico, es que se ha optado por el modelo estequiométrico para obtener los parámetros de operación más relevantes.

3.4.6 Modelamiento del proceso de gasificación por plasma mediante equilibrio termodinámico (modelo estequiométrico)

El modelo de equilibrio presentado corresponde al desarrollado por Antonios Mountouris, denominado "GasifEq model" [28]. En él se utilizan los datos provenientes del análisis elemental de los RSM a gasificar y se supone que la ceniza, sulfuros, metales y otros elementos de traza, de estar presentes después de la reacción de gasificación, se encuentran en su mayoría en el vitrificado. De todas formas la presencia de estos elementos es importante para el desempeño ambiental del proceso y en este estudio se asume se tratan estos contaminantes en equipos destinados para ello (Sección 4.1.9).

La ecuación global de gasificación es:



Donde los coeficientes n_x denotan las concentraciones estequiométricas a balancear, m es la cantidad de aire y w la cantidad de humedad, todos en kilomoles (kmol) por kmol de RSM. La cantidad de aire controla la cantidad de oxidante que como ya se ha mencionado, es un parámetro importante. La entrada de energía en la Ecuación 3.19 está representada por la temperatura de la reacción, que se debe al calor suministrado por el plasma térmico. Para obtener su valor se hace uso de la conservación de la energía en el balance térmico.

La solución de la Ecuación 3.19 requiere siete ecuaciones independientes. Tres de ellas están determinadas por las constantes de equilibrio, una por balance de entalpía y tres de ellas por balance parcial de masa (para C, H y O).

Equilibrio termodinámico

Aplicando la regla de fase descrita por Tassios [49], se determina que cuando no hay carbón sólido en equilibrio se requieren dos ecuaciones independientes y tres cuando existe carbón sólido remanente. Se eligen la Ecuación 3.15, Ecuación 3.17 y Ecuación 3.18 de las cinco disponibles porque estas se ven favorecidas en presencia de alta humedad, como es el caso de los RSM. Se asume que todos los gases se comportan de manera ideal y que las reacciones ocurren a presión atmosférica.

Luego, tenemos las siguientes constantes:

$$K_1 = \frac{[CO][H_2]}{[C][H_2O]} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

$$K_2 = \frac{[CO_2][H_2]}{[CO][H_2O]} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

$$K_3 = \frac{[CO][H_2]^3}{[CH_4][H_2O]} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Además, la constante de equilibrio se puede escribir como:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Donde:

K : Constante de equilibrio
 ΔG^0 : Cambio en la energía libre de Gibbs estándar [kJ/kmol]

R : Constante ideal de los gases [kJ/K kmol]
 T : Temperatura de la reacción [K]

Luego, utilizando la definición de energía libre de Gibbs a temperatura y presión constantes:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Donde:

ΔH^0 : Cambio en entalpía, tomando la diferencia entre el calor de formación y el calor de reacción [kJ/kmol]
 ΔS^0 : Cambio en la entropía relacionada a la energía absorbida desde el ambiente cuando el proceso progresa hacia el equilibrio termodinámico [kJ/K kmol]

Con:

$$\Delta S^0 = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Donde:

δQ : Calor absorbido desde el ambiente cuando el proceso progresa hacia el equilibrio termodinámico [kJ/kmol]

Combinando la Ecuación 3.23, Ecuación 3.24 y Ecuación 3.25, se obtiene:

$$\Delta H^0 - \delta Q = -RT \ln K \quad \text{Ecuación 3.26}$$

Tomando el parcial de la Ecuación 3.24 con respecto a la temperatura a presión constante, se obtiene:

$$\left(\frac{\partial \Delta G^0}{\partial T} \right)_p = -\Delta S^0 \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Y aplicando el diferencial con respecto a la temperatura, se obtiene:

$$\left[\frac{\partial \left(\frac{\Delta G^0}{T} \right)}{\partial T} \right]_p = -\frac{\Delta G^0}{T^2} + \frac{1}{T} \left(\frac{\partial \Delta G^0}{\partial T} \right) \quad \text{Ecuación 3.28}$$

Utilizando la Ecuación 3.24 y Ecuación 3.25, se obtiene:

$$\left[\frac{\partial \left(\frac{\Delta G^0}{T} \right)}{\partial T} \right]_p = -\frac{\Delta H^0}{T^2} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

Conocida como ecuación Gibbs-Helmholtz. Luego sustituyendo la Ecuación 3.23 y teniendo en cuenta la aplicación a una reacción, se obtiene:

$$\frac{\partial \ln(K)}{\partial T} = \frac{\Delta H_R^0}{RT^2} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Conocida como ecuación de van't Hoff. Luego para calcular la entalpía de formación para una temperatura diferente de la ambiental estándar de 25 °C (298,15 K), se utiliza la ley de Kirchhoff:

$$\Delta H_R^0(T) = \Delta H_R^0(T_0) + \int_{T_0}^T \Delta c_p(T) dT \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Donde el calor específico está dado por:

$$c_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad \text{Ecuación 3.32}$$

$$\Delta c_p(T) = \Delta A + \Delta BT + \Delta CT^2 + \Delta DT^3 + \Delta ET^4 \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Con A, B, C, D, y E coeficientes de regresión para el compuesto químico, que son obtenidos de tablas desde el libro *Chemical Properties Handbook* [50] (Anexo D), y donde los valores de ΔA , ΔB , ΔC , ΔD y ΔE representan el cambio en los coeficientes para cada una de las reacciones de equilibrio, por ejemplo para la Ecuación 3.21 se tiene:

$$\Delta A = A_{CO_2} + A_{H_2} - A_{CO} - A_{H_2O}$$

$$\Delta B = B_{CO_2} + B_{H_2} - B_{CO} - B_{H_2O}$$

$$\Delta C = C_{CO_2} + C_{H_2} - C_{CO} - C_{H_2O}$$

$$\Delta D = D_{CO_2} + D_{H_2} - D_{CO} - D_{H_2O}$$

$$\Delta E = E_{CO_2} + E_{H_2} - E_{CO} - E_{H_2O}$$

Luego sustituyendo la Ecuación 3.33 en la Ecuación 3.31, esta última en la Ecuación 3.30 se obtiene:

$$\int_{K_0}^K d(\ln(K)) = \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_R^0(T_0) + \int_{T_0}^T (\Delta A + \Delta BT + \Delta CT^2 + \Delta DT^3 + \Delta ET^4) dT}{RT^2} dT$$

Integrando:

$$\ln(K) - \ln(K_0) = \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_R^0(T_0) + \Delta AT + \frac{\Delta BT^2}{2} + \frac{\Delta CT^3}{3} + \frac{\Delta DT^4}{4} + \frac{\Delta ET^5}{5} - \Delta AT_0 - \frac{\Delta BT_0^2}{2} - \frac{\Delta CT_0^3}{3} - \frac{\Delta DT_0^4}{4} - \frac{\Delta ET_0^5}{5}}{RT^2} dT$$

Luego:

$$\begin{aligned} \ln(K) - \ln(K_0) = & \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_R^0(T_0) - \Delta AT_0 - \frac{\Delta BT_0^2}{2} - \frac{\Delta CT_0^3}{3} - \frac{\Delta DT_0^4}{4} - \frac{\Delta ET_0^5}{5}}{RT^2} dT \\ & + \int_{T_0}^T \frac{\Delta AT + \frac{\Delta BT^2}{2} + \frac{\Delta CT^3}{3} + \frac{\Delta DT^4}{4} + \frac{\Delta ET^5}{5}}{RT^2} dT \end{aligned}$$

Integrando nuevamente y ordenando, se obtiene finalmente:

$$\begin{aligned} \ln(K) - \ln(K_0) = & \frac{\Delta A}{R} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \frac{\Delta B}{2R} (T - T_0) + \frac{\Delta C}{6R} (T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta D}{12R} (T^3 - T_0^3) \\ & + \frac{\Delta E}{20R} (T^4 - T_0^4) \\ & + \frac{1}{R} \left(-\Delta H_R^0 + \Delta A T_0 + \frac{\Delta B}{2} T_0^2 + \frac{\Delta C}{3} T_0^3 + \frac{\Delta D}{4} T_0^4 + \frac{\Delta E}{5} T_0^5 \right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3.34}$$

Con $\Delta H_R^0 = \sum \Delta H_{f(\text{productos})}^0 - \sum \Delta H_{f(\text{reactantes})}^0$, $K_0 = e^{\frac{-\Delta G^0}{RT_0}}$, T_0 y T temperatura ambiente (25 °C) y de gasificación respectivamente.

Balance de energía

Se aplica un balance de entalpía a la Ecuación 3.19, relacionando el calor de formación de los productos con el calor específico de los reactantes y la energía aportada mediante la Ecuación 3.24 y Ecuación 3.25, obteniéndose:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - \delta Q \quad \text{Ecuación 3.35}$$

Luego con:

$$\Delta H^0(T) = \Delta H_f^0 + \int_{T_0}^T c_p(T) dT \quad \text{Ecuación 3.36}$$

La Ecuación 3.35 se puede escribir como:

$$\Delta G^0 + \delta Q = \Delta H_f^0 + \int_{T_0}^T c_p(T) dT \quad \text{Ecuación 3.37}$$

Con los productos y reactantes de la ecuación global de gasificación, representando el término entrópico como entrada de energía desde el plasma térmico (δQ) para producir la reacción, se obtiene el balance de calor:

$$\begin{aligned} H_{f,waste}^0 + w H_{f,H_2O(l)}^0 + m H_{f,O_2}^0 + 3,76 m H_{f,N_2}^0 + Q_{in} \\ = n_1 H_{f,H_2}^0 + n_2 H_{f,CO}^0 + n_3 H_{f,CO_2}^0 + n_4 H_{f,H_2O(g)}^0 + n_5 H_{f,CH_4}^0 \\ + n_6 H_{f,N_2}^0 + n_7 H_{f,C}^0 \\ + \int_{T_1}^{T_2} \left(n_1 c_{p,H_2} + n_2 c_{p,CO} + n_3 c_{p,CO_2} + n_4 c_{p,H_2O(g)} + n_5 c_{p,CH_4} \right. \\ \left. + n_6 c_{p,N_2} + n_7 c_{p,C} \right) dT \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

Donde T_0 y T son la temperatura ambiente (25 °C) y de gasificación respectivamente y los calores de formación de los compuestos gaseosos y agua (como líquido y vapor) corresponden a los términos $H_{f,x}^0$. El calor específico, $c_{p,x}$, es calculado mediante la Ecuación 3.32 y los coeficientes obtenidos desde el libro *Chemical Properties Handbook* [50] (Anexo D).

Es importante mencionar que la energía requerida para vitrificación no está incluida en la Ecuación 3.38. La energía para vitrificación corresponde a la energía requerida para elevar la temperatura de los compuestos inorgánicos a temperaturas elevadas, generalmente a 1550 °C y se puede estimar mediante [28]:

$$\dot{Q}_{vit} = \dot{m}_{vit} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Ecuación 3.39

Donde:

\dot{Q}_{vit}	:	Energía requerida para elevar la temperatura del vitrificado de T_1 a T_2 [kJ/s]
\dot{m}_{vit}	:	Flujo másico de vitrificado [kg/s]
c_p	:	Calor específico del vitrificado, se asigna un valor de 1,1 [kJ/kg K]
T_2	:	Temperatura caliente de vitrificado, se asigna un valor de 1.550 °C
T_1	:	Temperatura fría de vitrificado, corresponde a la temperatura ambiente

Balance de masa

A partir del balance parcial de masa para el carbono, hidrógeno y oxígeno, se obtiene:

Balance carbono:	$1 = n_2 + n_3 + n_5 + n_7$	Ecuación 3.40
------------------	-----------------------------	---------------

Balance hidrógeno:	$2w + 1,44 = 2n_1 + 2n_4 + 4n_5$	Ecuación 3.41
--------------------	----------------------------------	---------------

Balance oxígeno:	$w + 0,66 + 2m = n_2 + 2n_3 + n_4$	Ecuación 3.42
------------------	------------------------------------	---------------

Con lo cual se completan las ecuaciones necesarias para la obtención de las incógnitas n_1 a n_7 . Debido a la complejidad del sistema, se recomienda resolver utilizando software como *MathCad* o *Matemathica*, sin embargo, en este trabajo se utilizará una temperatura óptima de reacción, -la misma utilizada por Antonios Mountouris [28]-, en la cual no existe carbono sólido en los productos equilibrio, por lo que el sistema se reduce a un problema de seis incógnitas y seis ecuaciones; dos de equilibrio (Ecuación 3.17 y Ecuación 3.18), una de balance de entalpía y tres de balance parcial de masa (para C, H y O), lo cual disminuye la complejidad del sistema permitiendo su resolución mediante software de planillas de cálculo que tengan herramienta *Solver*.

Una vez resuelta la Ecuación 3.19, se puede calcular el HHV del gas combustible "como es producido", es decir de la mezcla de H_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4 y N_2 , en moles referidos a masa de RSM daf, mediante:

$$HHV_{gas \text{ ap kmol RSM daf}} = \sum_i n_i \cdot HHV_i$$

Ecuación 3.43

Donde:

$HHV_{gas \text{ ap kmol RSM daf}}$:	HHV "como es producido" (ap, del inglés <i>as produced</i>) del gas [kJ/kmol RSM daf]
n_i	:	kmol del compuesto i [kmoli/kmol RSM daf]
HHV_i	:	HHV del compuesto i [kJ/kmoli]

El HHV de cada compuesto se obtiene calculando la diferencia entre las entalpías de formación de reactantes y productos. Los resultados pueden verse en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: HHV para cada compuesto del gas combustible.

Compuesto	Operación	HHV [kJ/kmol]
H ₂	$-\left(\Delta H_{f,H_2O}^0 - (\Delta H_{f,H_2}^0 + \Delta H_{f,O_2}^0/2)\right)$	241.800
CO	$-\left(\Delta H_{f,CO_2}^0 - (\Delta H_{f,CO}^0 + (2/3) \cdot \Delta H_{f,O_2}^0)\right)$	283.000
CH ₄	$-\left((\Delta H_{f,CO_2}^0 + 2 \cdot \Delta H_{f,H_2O}^0) - (\Delta H_{f,CH_4}^0 + 2 \cdot \Delta H_{f,O_2}^0)\right)$	802.300

Fuente: Elaboración propia en base a Chemical Properties Handbook [50].

Para calcular ahora el LHV ap en base molar referida a masa de RSM daf, se utiliza:

$$LHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} = HHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} - \Delta H_{vap,H_2O} \cdot n_{H_2} \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Donde:

$$\begin{aligned} LHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} & : \text{ LHV ap del gas [kJ/kmol RSM daf]} \\ \Delta H_{vap,H_2O} & : \text{ Entalpía de vaporización del agua a 25 °C [kJ/kmol H2O]} \\ n_{H_2} & : \text{ Moles de H2 del combustible que formarán H2O, igual a } n_1 \text{ en Ecuación 3.19 [kmol H2/kmol RSM daf]} \end{aligned}$$

Es importante notar que en la Ecuación 3.44 no se toma en cuenta el contenido de H2O debido a que ésta se encuentra en estado vapor gracias a la energía proporcionada por las antorchas de plasma.

Luego podemos obtener el LHV ar del gas combustible referido a su propia masa, mediante:

$$LHV_{gas\ ap} = \frac{LHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf}}{kg_{gas\ ap}} \quad \text{Ecuación 3.45}$$

$$kg_{gas\ ap} = MM_{RSM\ daf} + w \cdot MM_{H_2O} + m \cdot MM_{O_2} + 3,76 \cdot m \cdot MM_{N_2} \quad \text{Ecuación 3.46}$$

Donde:

$$\begin{aligned} LHV_{gas\ ap} & : \text{ LHV ap del gas [kJ/kg gas]} \\ MM_{RSM\ daf} & : \text{ Masa molecular de los RSM daf [kg daf/kmol RSM daf]} \\ MM_{H_2O} & : \text{ Masa molecular H2O [kg/kmol H2O]} \\ MM_{O_2} & : \text{ Masa molecular O2 [kg/kmol O2]} \\ MM_{N_2} & : \text{ Masa molecular N2 [kg/kmol N2]} \end{aligned}$$

El calor sensible del gas combustible en kJ por kmol referidos a RSM daf, $Q_{s\ gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf}$, se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.36 y puede expresarse en términos de su propia masa mediante:

$$Q_{s\ gas\ ap} = \frac{Q_{s\ gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf}}{kg_{gas}} \quad \text{Ecuación 3.47}$$

Donde:

$$\begin{aligned} Q_{s\ gas\ ap} & : \text{ Calor sensible del gas [kJ/kg gas]} \\ Q_{s\ gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} & : \text{ Calor sensible del gas [kJ/kmol RSM daf]} \end{aligned}$$

El calor latente del gas combustible se calcula mediante:

$$Q_{l\ gas\ ap} = HHV_{gas\ ap} - LHV_{gas\ ap} \quad \text{Ecuación 3.48}$$

Donde:

$$Q_{l\ gas\ ap} \quad : \quad \text{Calor latente del gas [kJ/kg gas]}$$

Los flujos de masa más relevantes se obtienen mediante:

$$\dot{m}_{RSM\ daf} = \dot{m}_{RSM\ ar} \cdot (1 - M) \cdot (1 - Ash_{dry}) \quad \text{Ecuación 3.49}$$

$$\dot{m}_{Ash} = \dot{m}_{RSM\ daf} \cdot \left(\left(\frac{1}{1 - Ash_{dry}} \right) - 1 \right)$$

$$\dot{m}_{RSM\ \%dry} = \frac{\dot{m}_{RSM\ daf} + \dot{m}_{Ash}}{1 - M_f} \quad \text{Ecuación 3.50}$$

$$\dot{m}_{H_2O\ evap} = \dot{m}_{RSM\ ar} - \dot{m}_{RSM\ \%dry} \quad \text{Ecuación 3.51}$$

$$\dot{m}_m = \dot{n}_{RSM\ daf} \cdot m \cdot (MM_{O_2} + 3,76 \cdot MM_{N_2}) \quad \text{Ecuación 3.52}$$

$$\dot{n}_{RSM\ daf} = \dot{m}_{RSM\ ar} \cdot (1 - M) \cdot \left(\frac{1 - Ash_{dry}}{MM_{RSM\ daf}} \right) \quad \text{Ecuación 3.53}$$

$$\dot{m}_{gas\ ap} = \dot{m}_m + \dot{n}_{RSM\ daf} \cdot w \cdot MM_{H_2O} + \dot{m}_{RSM\ daf} \quad \text{Ecuación 3.54}$$

$$\dot{m}_{vit} = \dot{m}_{Ash} \quad \text{Ecuación 3.55}$$

Donde:

$\dot{m}_{RSM\ daf}$:	Flujo másico de RSM daf [kg RSM daf/s]
$\dot{m}_{RSM\ ar}$:	Flujo másico de RSM ar [kg RSM ar/s]
M	:	Porcentaje de humedad RSMI
Ash_{dry}	:	Porcentaje de ceniza de los RSM dry
\dot{m}_{Ash}	:	Flujo másico de contenido de ceniza [kg/s]
$\dot{m}_{RSM\ \%dry}$:	Flujo másico de RSM %dry [kg RSM %dry/s]
M_f	:	Porcentaje de humedad final RSM (si aplica)
$\dot{m}_{H_2O\ evap}$:	Flujo másico de agua evaporada en proceso de secado [kg/s]
\dot{m}_m	:	Flujo másico de aire total [kg/s]
$\dot{n}_{RSM\ daf}$:	Flujo de moles en base a RSM daf [kmol RSM daf/s]
$\dot{m}_{gas\ ap}$:	Flujo másico de gas combustible ap [kg/s]
\dot{m}_{vit}	:	Flujo másico de vitrificado [kg/s]

Eficiencia de la gasificación

La eficiencia del proceso gasificación se mide mediante la denominada eficiencia de gas frío (CGE, *cold gas efficiency* en inglés):

$$\eta_{CGE} = \frac{\dot{m}_{gas\ ap} \cdot LHV_{gas\ ap}}{\dot{m}_{res} \cdot LHV_{res} + \frac{\dot{Q}_{gas}}{\eta_{torch}}} \quad \text{Ecuación 3.56}$$

Donde:

η_{CGE}	:	CGE del proceso de gasificación
\dot{m}_{res}	:	Flujo másico de residuos que entran al gasificador [kg/s]
LHV_{res}	:	LHV de los residuos que entran al gasificador [kJ/kg]
\dot{Q}_{gas}	:	Energía requerida para el proceso de gasificación por plasma [kJ/s]
η_{torch}	:	Eficiencia de las antorchas de plasma

Parámetros importantes y sus principales efectos

Temperatura de reacción: Al aumentar la temperatura existe un aumento en el poder calorífico del gas combustible y una disminución en la eficiencia de gas frío, debido a que aumenta la concentración de CO y disminuye levemente la concentración de H₂, por lo que el poder calorífico del gas combustible aumenta marginalmente en relación a la energía necesaria para mantener la temperatura elevada. Luego la temperatura de gasificación escogida corresponde a 1.273 K, debido a que a esta temperatura ya se alcanza la descomposición completa del combustible y la destrucción de compuestos peligrosos como dioxinas y furanos. Además a esta temperatura no existe carbono sólido en los productos en equilibrio por lo que el modelamiento del proceso de gasificación se simplifica [28] [51].

Humedad del combustible: Al aumentar la humedad del combustible existe una disminución en el poder calorífico del gas combustible y una disminución en la eficiencia de gas frío debido a que se requiere energía adicional que es utilizada en la evaporación del contenido de humedad [28].

Cantidad de oxidante: Al aumentar la cantidad de oxidante existe una disminución en el poder calorífico del gas combustible y una disminución en la eficiencia de gas frío debido principalmente a la dilución del gas combustible en el contenido de N₂ del aire. También tiene como consecuencia una disminución en el uso de energía debido a que una mayor cantidad de H₂ y CO se han oxidado a H₂O y CO₂ respectivamente [28].

4 Aspectos generales del diseño conceptual y del análisis económico de la central

Debido al alto impacto de la humedad de los RSM en el rendimiento del proceso de gasificación por plasma (ver Sección 4.1.4), se ha realizado el estudio de la central con 3 configuraciones:

- 1.000 [ton/día] de RSM ar son tratados directamente en el gasificador.
- 1.000 [ton/día] de RSM ar son secados previo a su ingreso al gasificador (RSM %dry).
- 1.000 [ton/día] de RSM ar son previamente clasificados, separando el material reciclable y la materia orgánica húmeda, donde el rechazo, denominado RDF (del inglés *refuse derived fuel*), ingresa al gasificador.

Se ha establecido que la central opera 330 días al año.

Además para cada configuración se estudia el impacto de fabricar aislante de lana mineral a partir del vitrificado, debido a que posee un mayor precio de venta.

En esta sección se describen los aspectos generales del diseño conceptual y del análisis económico de la central para dichas configuraciones. En la Figura 4.1 se puede ver un diagrama general simplificado de la central.

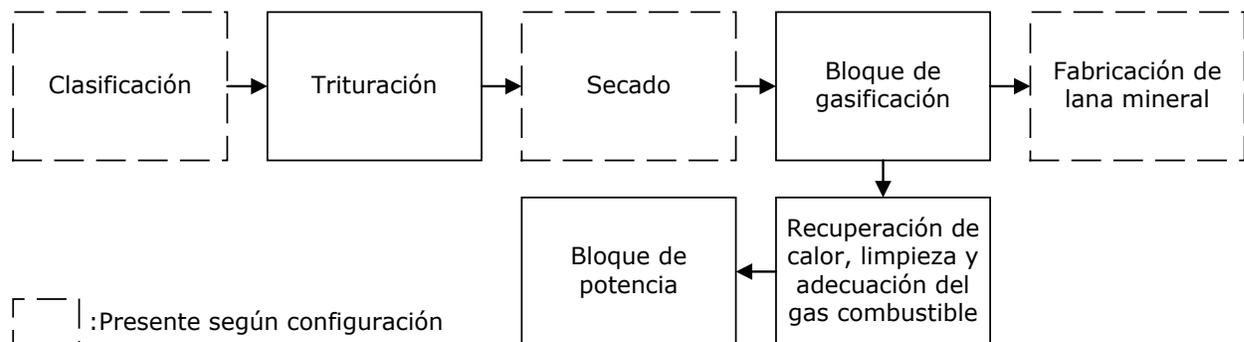


Figura 4.1: Diagrama general simplificado de la central.

4.1 Diseño conceptual de la central

4.1.1 Ubicación y superficie

Se ha determinado que la central debe estar ubicada fuera de los límites urbanos de la RM y debido a la reciente puesta en marcha del Relleno Sanitario Cerros La Leona (RSCLL) en la zona norte, se ha escogido como lugar de emplazamiento la zona sur, en particular en las cercanías de la Hacienda Carén, Mostazal, VI región del Libertador Bernardo O´Higgins, justo bajo el límite sur de la RM. En la Figura 4.2 se puede ver la ubicación general de la central y la de los distintos rellenos sanitarios y estaciones de transferencia.

Esta ubicación se encuentra a 75 km al sur del centro de Santiago, y 60 km al sur de la Estación de Transferencia Puerta Sur (ETPS), con buen acceso desde la Ruta 5 Sur a través de la ruta H-111, en una zona de baja densidad poblacional. En sus cercanías pasa el Río Peuco y la línea de transmisión a 220 kV Alto Jahuel – Candelaria.

La ubicación corresponde a una zona rural de la comuna de Mostazal, por lo que el uso de suelo está regulado por el Plan Regulador Intercomunal (PRI), donde se indica que el tipo de uso está definido por la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). La LGUC y la OGUC permiten actividades industriales para zonas rurales, por lo que la ubicación seleccionada es apta para el tipo de actividad previo sometimiento al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). En la Figura 4.3, se puede ver la ubicación de la central y su entorno con mayor detalle.

La superficie a utilizar se ha definido en 100.000 m², tomando como referencia las superficies de las centrales TV1 y TV2.

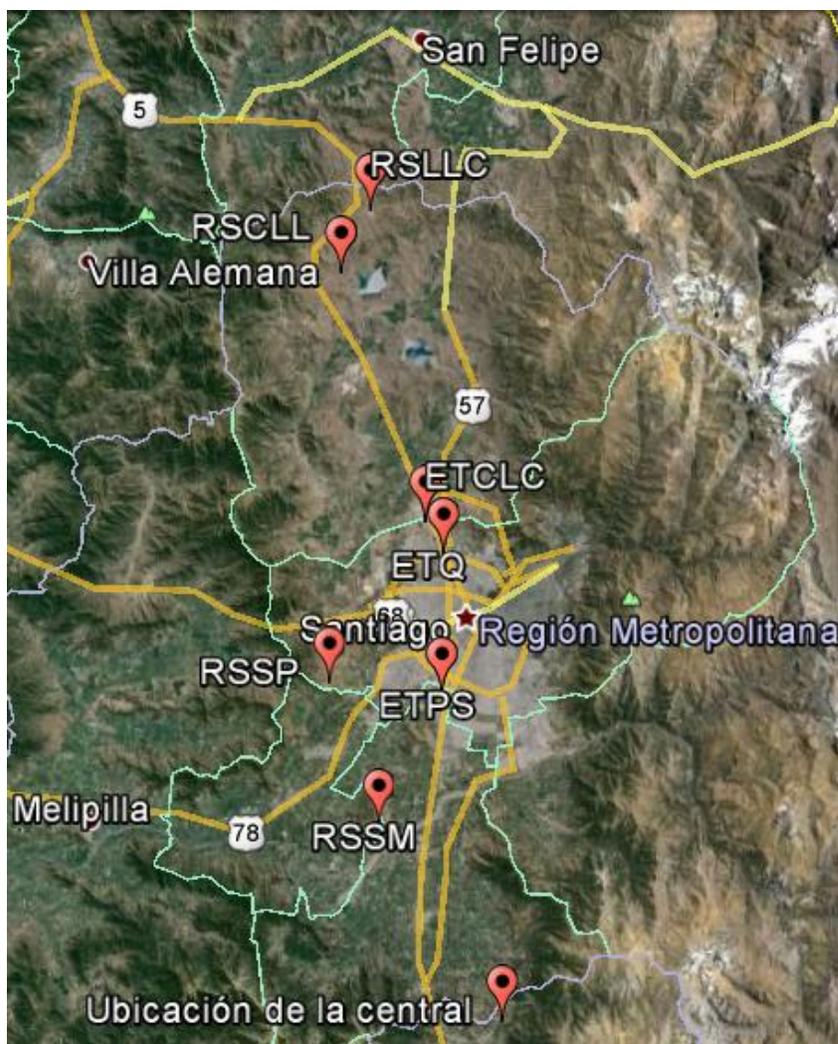


Figura 4.2: Ubicación general de la central.
Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

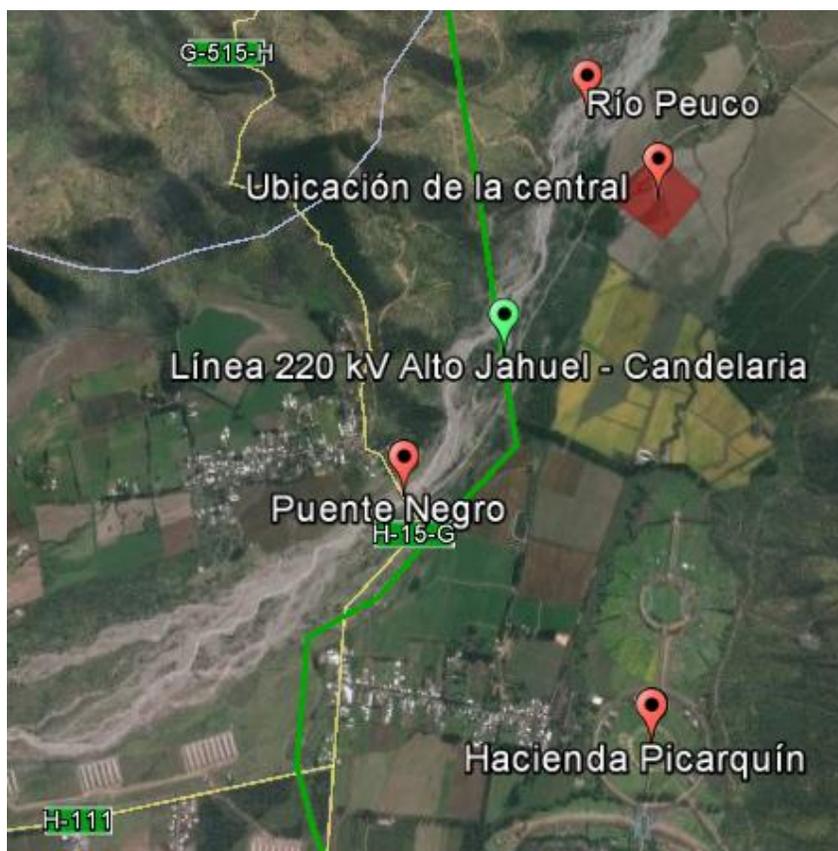


Figura 4.3: Detalle de la ubicación de la central y sus alrededores. El área en rojo corresponde a la superficie total de la central. La línea verde corresponde a la línea de transmisión a 220 kV Alto Jahuel - Candelaria. La línea blanca delimita la RM y VI Región.

Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

4.1.2 Residuos aceptados

Los residuos aceptados corresponden a RSM y asimilables no seleccionados. Una lista con la codificación LER de los residuos aceptados puede verse en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Codificación LER de residuos aceptados.

Código LER	Descripción
20	RESIDUOS MUNICIPALES (RESIDUOS DOMÉSTICOS Y RESIDUOS ASIMILABLES PROCEDENTES DE LOS COMERCIOS, INDUSTRIAS E INSTITUCIONES), INCLUIDAS LAS FRACCIONES RECOGIDAS SELECTIVAMENTE
20 02	Residuos de parques y jardines (incluidos los residuos de cementerios)
20 02 01	Residuos biodegradables
20 02 02	Tierra y piedras
20 02 03	Otros residuos no biodegradables
20 03	Otros residuos municipales
20 03 01	Mezclas de residuos municipales
20 03 02	Residuos de mercados
20 03 03	Residuos de limpieza viaria
20 03 04	Lodos de fosas sépticas
20 03 06	Residuos de la limpieza de alcantarillas
20 03 07	Residuos voluminosos
20 03 99	Residuos municipales no especificados en otra categoría

4.1.3 Composición y humedad de los RSM ar

Utilizando los datos de la Tabla 3.6 y datos de composición tipo análisis elemental y humedad de los componentes de los RSM ar, se puede obtener la composición tipo análisis elemental de los RSM ar como un todo.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.2, el contenido de humedad de los RSM de la RM se estima en un 42,71%, valor superior al de países que actualmente utilizan tecnología de plasma para tratamiento de RSM. El alto contenido de humedad se debe principalmente al alto contenido de residuos de alimentos y de jardín cuya principal composición es agua.

Tabla 4.2: Composición tipo análisis elemental y humedad los RSM de la RM como son recibidos.

Componentes principales	% En peso base húmeda (1)	Humedad típica (2)	% En peso base seca	% En peso base seca (3)					
				C	H	O	N	S	Ceniza
Residuos alimentos	49,20	70	25,81	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Residuos jardín poda	4,96	60	3,47	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
Papel	10,18	6	16,73	49,1	6,1	43,0	-	0,2	1,5
Cartón	3,33	5	5,53	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Plásticos	10,07	2	17,26	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Tetrapack (4)	0,70	10	1,10	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Pañales y celulosas sanitarias (5)	4,95	60	3,46	48,4	7,6	38,8	0,5	0,4	4,1
Gomas	0,11	2	0,19	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0
Cueros	0,07	10	0,11	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Vidrio	3,94	2	6,75	0,5	0,1	0,4	-	-	98,9
Metales	1,80	2	3,08	4,5	0,6	4,3	-	-	90,5
Madera	0,83	60	0,58	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Textiles	1,97	10	3,10	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Suciedad y cenizas	4,20	8	6,76	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Misceláneos (6)	3,69	6	6,07	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Total	100	42,81	100	42,24	5,44	28,57	0,97	0,21	22,57

(1) ESTUDIO CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARIOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA - CONAMA RM 2006

(2) Solid Waste Engineering (2011) - William A. Worrell, P. Arne Vesilind

(3) Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues - Tchobanoglous et al (1993)

(4) y (5) Humedades estimadas

(6) Pilas, huesos, cueros, cerámicas, residuos sólidos especiales (*), otros

(*) Residuos que potencialmente podrían presentar alguna característica de peligrosidad

4.1.4 Impacto de la humedad final en la generación eléctrica neta

Para tener una idea del impacto de la humedad en la generación neta de electricidad, se ha utilizado el modelo GasifEq (ver Sección 4.1.7) para distintos valores de humedad final de 1.000 [ton/día] de RSM ar recibidos. La cantidad de oxidante utilizado corresponde a 0,35 [kmol O₂/kmol RSM daf].

La potencia eléctrica bruta se ha calculado suponiendo un rendimiento neto del bloque de potencia de un 60% y se ha restado el consumo de las antorchas de plasma. Los resultados pueden verse en la Figura 4.4, donde el aumento en humedad tiene como consecuencia una pequeña disminución en la potencia eléctrica bruta y un alto impacto negativo en la potencia eléctrica neta, debido al aumento considerable en el consumo de las antorchas de plasma.

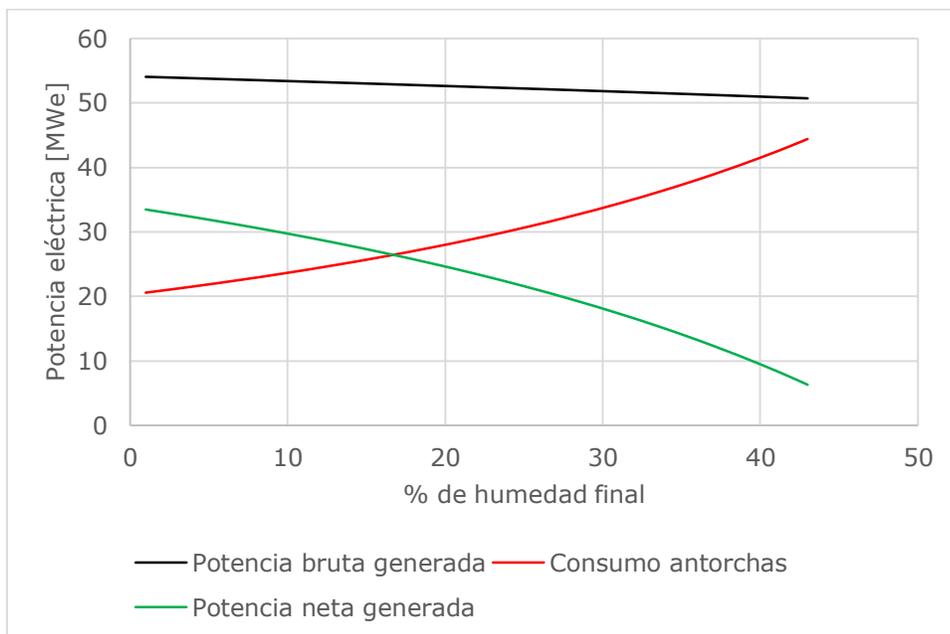


Figura 4.4: Variación de la potencia eléctrica bruta, consumo eléctrico de las antorchas de plasma y potencia eléctrica neta, con la variación de la humedad final de los RSM ar.

4.1.5 Transporte de los residuos

Debido a la distancia entre la central y los principales espacios urbanos, no es viable llevar la basura directamente mediante camiones recolectores, por lo que habría que utilizar una estación de transferencia. Teniendo en cuenta una compactación de 0,5 [ton/m³] se estima que son necesarios 34 viajes de camiones semirremolque de 60 m³ para cumplir con las 1000 toneladas diarias, lo que es equivalente a 1 camión cada 42 minutos aproximadamente.

Dentro de los alcances de este trabajo no está incluido el estudio de una estación de transferencia. De todas formas se debe evaluar la posibilidad de negociar con Consocio Santa Marta el uso de su ET "Estación de Transferencia Puerta Sur (ETPS)", donde el uso de residuos de la central correspondería a un 25% del manejo diario actual de residuos de la ETPS.

4.1.6 Tratamiento de los residuos

Los residuos son transportados mediante correas transportadoras desde el acopio a distintas opciones de tratamiento, según corresponda:

- Trituración: Los RSM sólo son triturados antes de entrar al gasificador.

- Trituración y secado: Los RSM son triturados y secados antes de entrar al gasificador.
- Clasificación y trituración: Se separa la materia orgánica húmeda y los compuestos reciclables de los RSM. El RDF es triturado y entra al gasificador.

Luego, los principales equipos a considerar son:

Correas transportadoras

El consumo eléctrico de las correas transportadoras se ha estimado mediante:

$$\dot{E}_{belt} = \left(\frac{4}{1000} \cdot \frac{3600}{1000} \right) \cdot \dot{m}_{RSM} \cdot H \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

\dot{E}_{belt}	:	Potencia eléctrica del sistema de correas transportadoras [MWe]
\dot{m}_{RSM}	:	Flujo de masa de RSM transportados [kg RSM/s]
H	:	Altura a transportar [m]

Como se aprecia en la Ecuación 4.1, la estimación del consumo eléctrico debido a las correas transportadoras es independiente del número de unidades y sólo influye el flujo de masa total transportado.

Equipo de trituración

El equipo de trituración consta de dos etapas. Una primera con un tamaño medio de trituración de 300 mm y luego con un tamaño medio de trituración de 50 mm. La potencia eléctrica necesaria se ha calculado mediante:

$$\dot{E}_{trit} = \frac{3,6}{1000} \cdot E_{trit} \cdot \dot{m}_{RSM} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

\dot{E}_{trit}	:	Potencia eléctrica del sistema de trituración [MWe]
E_{trit}	:	Factor de requerimiento eléctrico, 7 [kWh/ton RSM ar]
\dot{m}_{RSM}	:	Flujo de masa de RSM a triturar [kg RSM/s]

Sistema de secado

El secado de los RSM se puede realizar utilizando; el calor sensible recuperado durante el enfriamiento del gas combustible, utilizando el calor sensible de los gases de combustión que salen de la caldera HRSG (del inglés *heat recovery steam generator*) o mediante una combinación de ambos. Se prefiere la segunda opción, pues la alta temperatura de salida del gas combustible desde el gasificador permite su utilización en la caldera HRSG, en particular en el circuito del sobrecalentador aportando potencia al ciclo de vapor, y en cambio el calor de los gases de combustión que salen de la caldera si no es utilizado, se perdería.

Los principales equipos utilizados para el secado de RSM y sus características se pueden apreciar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Tipos de secadores y sus principales características.

Parámetro	Tipo de secador		
	Rotatorio	Flash	De correa
Tasa de evaporación [ton/hr]	3 - 23	4,8 - 17	0,5 - 40
Temperatura de operación [°C]	200 - 600	150 - 280	30 - 200
Capacidad [ton/hr]	3 - 45	4,4 - 16	-
Disminución de humedad [%]	10 - 45	10 - 45	15-25
Caída de presión [kPa]	2,5 - 3,7	7,5	0,5
Tamaño óptimo de partícula [mm]	19 - 50	-	-
Tamaño máximo de partícula [mm]	25 - 125	0,5 - 50	-
Requerimiento térmico [GJ/ton H2O evap]	3,0 - 4,0	2,7 - 2,8	1,3 - 2,5

Fuente: Elaboración propia en base a Li, Chen, Zhang, N Finney, N Sharifi, Swithenbank [52]

Todos ellos pueden utilizar diversos gases de trabajo como gas caliente; aire caliente, gases de combustión y vapor sobrecalentado, aunque se evita el uso de aire, debido a que implica un mayor riesgo de incendio.

De los equipos disponibles se ha elegido utilizar un secador de correa, en su configuración más simple; correas perforadas por las cuales pasa el gas caliente. Si bien este tipo de secadores tienen una menor capacidad de descarga de humedad, permiten operar a bajas temperaturas, evitando así emisiones no deseadas y riesgo de incendio, reduciendo además su costo. La capacidad de disminución de humedad de operación será la máxima para este tipo de equipos, un 25%. Se tiene entonces que la humedad final de los RSM secados será de un 17,81% al momento de ingresar al gasificador cuando exista secado.

El requerimiento térmico del equipo de secado se ha determinado mediante:

$$\dot{Q}_{\text{secado}} = Q_{\text{secado}} \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O evap}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{secado}} &: \text{Potencia térmica del sistema de secado [MW]} \\ Q_{\text{secado}} &: \text{Factor de requerimiento térmico, 2,5 [MJ/kg H}_2\text{O evap]} \text{ (Tabla 4.3)} \\ \dot{m}_{\text{H}_2\text{O evap}} &: \text{Flujo másico de agua evaporada teniendo en cuenta una humedad} \\ &\text{final de 17,81\%} \end{aligned}$$

El requerimiento eléctrico del sistema de secado se ha estimado mediante:

$$\dot{E}_{\text{secado}} = 3,6 \cdot E_{\text{secado}} \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O evap}} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{secado}} &: \text{Potencia eléctrica del sistema de secado [MWe]} \\ E_{\text{secado}} &: \text{Factor de requerimiento eléctrico, 0,1 [kWh/kg H}_2\text{O evap]} \\ \dot{m}_{\text{H}_2\text{O evap}} &: \text{Flujo másico de agua evaporada teniendo en cuenta una humedad} \\ &\text{final de 17,81\%} \end{aligned}$$

Sistema de clasificación

El sistema de clasificación está basado en el que actualmente opera en el RSLLC, perteneciente a KDM. Corresponde a un sistema mixto, pues utiliza equipos mecánicos y personal para llevar a cabo la clasificación. Sus principales equipos son:

- Correa de elevación.
- Correa de preclasificación
- Desgarrador de bolsas.
- Trommel de preclasificación.
- Correa de derivación de finos.
- Correa de derivación de medios.
- Correa de clasificación de gruesos.
- Correa de clasificación de medios.
- Separador de ferrosos.
- Separador de Eddy-Current.
- Enfardadora.

La potencia eléctrica requerida por los equipos se ha estimado mediante:

$$\dot{E}_{RDF} = \frac{3,6}{1000} \cdot E_{RDF} \cdot \dot{m}_{RSM\ ar} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde:

\dot{E}_{RDF}	:	Potencia eléctrica del sistema clasificación [MWe]
E_{RDF}	:	Factor de requerimiento eléctrico, 11 [kWh/ton RSM ar]
$\dot{m}_{RSM\ ar}$:	Flujo de masa de RSM a clasificar [kg RSM/s]

4.1.7 Bloque de gasificación

Modelamiento del proceso mediante GasifEq

Los parámetros utilizados en el modelo GasifEq son:

Temperatura ambiente

Se utilizará la temperatura estándar, luego:

$$T_a = 298 [K] \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Flujo másico del combustible sólido que entra al gasificador

Depende del tratamiento que hayan tenido los RSM.

Temperatura de reacción de gasificación

Se utilizará el valor óptimo comentado en la Sección 3.4.6, luego:

$$T_g = 1273 [K] \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Eficiencia de las antorchas de plasma

Se utilizará un valor intermedio respecto del rango entregado en la Sección 3.4.4, luego:

$$\eta_{torch} = 0,85 \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Humedad del combustible

Depende del tratamiento que hayan tenido los RSM.

Cantidad de oxidante

Para determinar la cantidad óptima de oxidante a utilizar, se obtiene el LHV del gas combustible y la potencia requerida para la gasificación para diferentes cantidades de oxígeno utilizando el modelo GasifEq. El valor escogido debe ser superior a 4.000 [kJ/kg], pues corresponde a un mínimo requerido de operación para una gran variedad de turbinas de gas [53]. Es importante mencionar que la potencia eléctrica bruta generada se mantendrá prácticamente constante con la variación de la cantidad de oxidante, ya que al aumentar el valor del LHV disminuye la cantidad de gas producido al ser menor la dilución en aire de éste.

Para estos parámetros se obtendrá:

- Reacción de gasificación en equilibrio.
- Concentración de cada compuesto del gas combustible.
- Poder calorífico de los RSM.
- Potencia eléctrica requerida por las antorchas de plasma.
- Poder calorífico, calor sensible y latente del gas combustible.
- Flujos de masa.
- Eficiencia de gas frío del proceso de gasificación.

Gasificador y antorchas de plasma

Se define utilizar un solo equipo de reacción, análogo en forma a los reactores G65 de Westinghouse, utilizados en las centrales de Tees Valley (ver Sección 3.4.5). Este reactor tiene capacidad para un rango de entre 450 y 1.000 [ton/día] de RSM. Respecto de las antorchas de plasma, las más grandes en capacidad de potencia de Westinghouse, corresponden al modelo Marc 11H, cuya capacidad máxima es de 2.400 kW. Para operar a 2.400 kW, estas antorchas utilizan un voltaje de 1.200 VDC y una corriente de 2.000 ADC cada una, el máximo para el cual están diseñadas. Luego para cumplir con los requerimientos de energía para gasificación y vitrificado se debe utilizar un número de antorchas que cubra el requerimiento calculado por el modelamiento mediante GasifEq.

Respecto del gas de trabajo se ha optado por utilizar aire debido a su bajo costo. Para determinar la cantidad de aire necesario, se ha utilizado información de Westinghouse sobre el requerimiento de flujo de aire según la potencia (ver Figura 4.5) [54].

Debido a la tendencia lineal de la información de la Figura 4.5, se ha proyectado hasta una operación a 2.400 kW obteniéndose la Figura 4.6. Luego, el flujo de aire utilizado por antorcha según la potencia de operación puede calcularse mediante:

$$\dot{m}_{air\ torch\ un} = \frac{1}{7133,4} \cdot (\dot{E}_{torch\ un} - 569,17) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde:

$\dot{m}_{air\ torch\ un}$: Flujo de aire requerido por antorcha de plasma [kg air/s]
 $\dot{E}_{torch\ un}$: Potencia de operación por antorcha de plasma [kWe]

Cuyo valor es congruente con información proveniente de otras simulaciones [55].

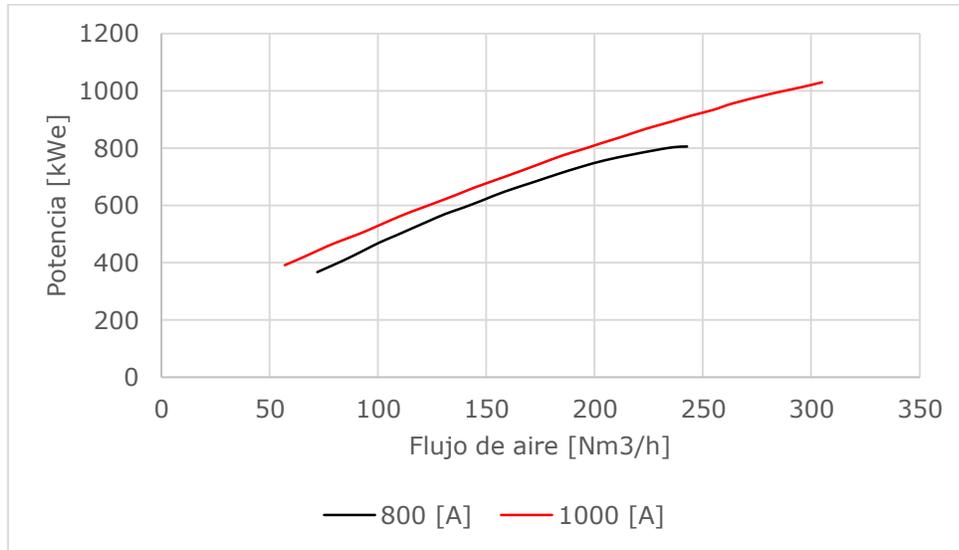


Figura 4.5: Información original sobre flujo de aire y potencia para antorcha Marc 11H de Westinghouse.

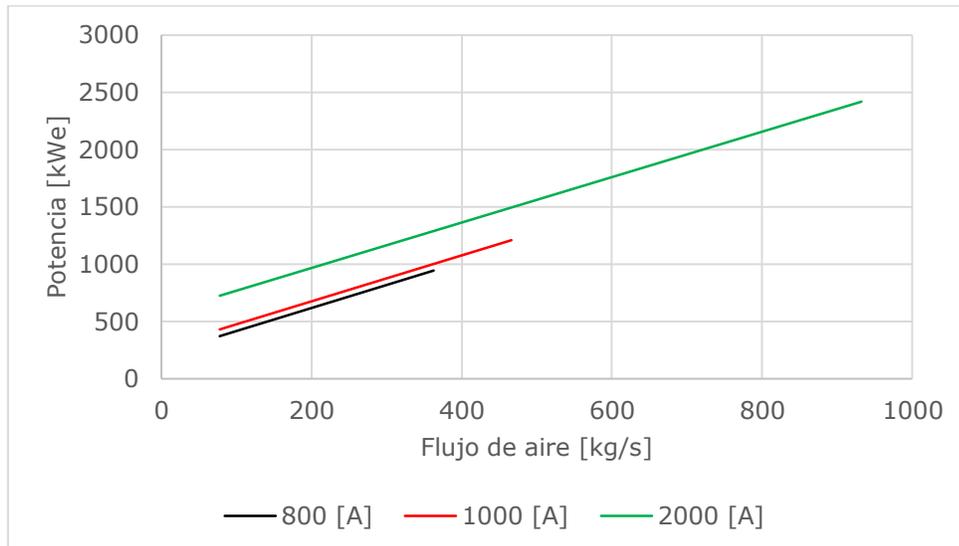


Figura 4.6: Proyección de flujo de aire y potencia para antorchas Marc 11H de Westinghouse.

Equipos accesorios

Corresponden a los descritos en la Sección 3.4.4, en esta sección interesan sus potencias eléctricas:

Fuente de poder

La potencia eléctrica asociada a pérdidas de transformación, \dot{E}_{DC} , se ha estimado como un 5% del requerimiento eléctrico total de las antorchas de plasma, luego:

$$\dot{E}_{DC} = (1 - 5\%) \cdot \dot{E}_{torch\ tot} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Donde:

\dot{E}_{DC} : Potencia asociada a pérdidas de transformación [MWe]

$\dot{E}_{torch\ tot}$: Potencia total requerida por las antorchas de plasma [MWe]

Sistema de control

Potencia no considerada.

Sistema de gas de trabajo

Se considera que este equipo provee el aire necesario para las antorchas de plasma y la diferencia necesaria para el proceso de gasificación (aire suplementario). Su potencia es calculada mediante:

$$\dot{E}_{comp} = 3,6 \cdot E_{comp} \cdot \dot{m}_{air} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Donde:

\dot{E}_{comp} : Potencia del compresor [MWe]
 E_{comp} : Factor de requerimiento eléctrico, 0,07 [kWh/kg air]. Calculado en base a un rendimiento de 5 NCFM por HP
 \dot{m}_{air} : Flujo de masa total de aire [kg air/s]

Sistema de refrigeración

Consumo no considerado.

Balance de calor y masa

Se presentará para cada caso.

4.1.8 Fabricación de lana mineral

La fabricación de lana mineral contempla los siguientes equipos:

- Sistema de formación de lana mediante centrifugado del vitrificado.
- Sistema colector de distribución de la lana.
- Sistema de moldeado de la lana.
- Sistema de corte.
- Sistema de empaquetado.

La potencia eléctrica requerida por los equipos, se ha estimado mediante:

$$\dot{E}_{LM} = \frac{3,6}{1000} \cdot E_{LM} \cdot \dot{m}_{vit/LM} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Donde:

\dot{E}_{LM} : Potencia eléctrica del sistema de fabricación de lana mineral [MWe]
 E_{LM} : Factor de requerimiento eléctrico, 325 [kWh/ton vitrificado]
 $\dot{m}_{vit/LM}$: Flujo de masa del vitrificado para fabricación de lana mineral [kg vit/s]

Se estima además que un 87% del total del vitrificado es transformado en lana mineral.

4.1.9 Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible

Al dejar el gasificador, el gas combustible sale a temperatura de gasificación y contiene diversas impurezas que deben ser removidas antes de su utilización. Antes del proceso de limpieza y adecuación, el gas combustible es enfriado en un intercambiador de calor gas/vapor, similar en construcción a la zona del sobrecalentador de la caldera HRSG (del inglés *heat recovery steam generator*), para aprovechar parte de la energía térmica del gas combustible en el ciclo de vapor o en secado de los RSM, si corresponde.

El gas deja el intercambiador a una temperatura de 500 °C para prevenir la reformación de dioxinas y furanos.

El calor sensible recuperado en kJ por kmol referidos a RSM daf, $Q_{s\ rec\ gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf}$, se obtiene mediante la Ecuación 3.36, aplicada a la temperatura de gasificación y a la de enfriamiento (500 °C), y puede expresarse en términos de su propia masa mediante:

$$Q_{s\ rec\ gas\ ap} = \frac{Q_{s\ rec\ gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf}}{kg\ gas} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Donde:

$$\begin{aligned} Q_{s\ rec\ gas\ ap} &: \text{Calor sensible recuperado del gas [kJ/kg gas]} \\ Q_{s\ rec\ gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} &: \text{Calor sensible recuperado del gas [kJ/kmol RSM daf]} \end{aligned}$$

Respecto de la limpieza y adecuación del gas combustible, corresponde a la limpieza de diversas impurezas, dentro de las cuales se controla principalmente; cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF), amoníaco (NH₃), pequeñas cantidades de material particulado (MP), sulfuro de hidrógeno (H₂S), mercurio (Hg), dioxinas y furanos. Además, la adecuación incluye el uso de un compresor de gas combustible.

Debido a que la modelación del proceso de gasificación mediante GasifEq no entrega datos de composición de las impurezas, se describirán cualitativamente los principales equipos y se estimará su requerimiento eléctrico teniendo como referencia los mismos equipos aplicados en una central de ciclo combinado con gasificación integrada tradicional (IGCC, del inglés *integrated gasification combined cycle*) de una capacidad bruta equivalente.

Los principales equipos corresponden a [44]:

- Lavador de gases de enfriamiento rápido: Utiliza líquidos atomizados para remover HCl, HF, NH₃ y PM. Además, el gas combustible es enfriado rápidamente de modo de evitar el reformado de dioxinas y furanos.
- Precipitador electroestático húmedo: Es utilizado para remover MP.
- Compresor de gas combustible: Es utilizado para aumentar la presión del gas combustible de modo de cumplir las especificaciones de los siguientes equipos, incluida la turbina de gas.
- Equipo de hidrólisis de sulfuro de carbonilo (COS): Reactor catalítico para convertir el COS en H₂S.
- Filtro de carbón activado granulado para mercurio: Filtro de carbón activado granulado impregnado con azufre (S) para remoción de Hg.

- Remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S): Se utiliza un sistema redox líquido para eliminar el H₂S. En general, existe una tendencia a utilizar la tecnología propietaria LO-CAT de Merichem para este proceso.

La potencia eléctrica requerida por el sistema de limpieza y adecuación del gas combustible, incluido el compresor, se estimado como un 4% de la potencia eléctrica bruta generada por la central (calculada en la sub sección siguiente).

$$\dot{E}_{LA} = 4\% \cdot \dot{E}_{bruta} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{LA} & : \text{Potencia del sistema de limpieza y adecuación del gas combustible} \\ & \quad \text{[MWe]} \\ \dot{E}_{bruta} & : \text{Potencia bruta de generación [MWe]} \end{aligned}$$

4.1.10 Bloque de potencia

El bloque de potencia corresponde a un ciclo combinado, es decir; turbina de gas, caldera HRSG y turbina de vapor. Para el sistema de refrigeración del ciclo de vapor se ha optado por una torre de refrigeración húmeda de tiro forzado, debido a que si bien no se encontraron datos de caudal del Rio Peuco, se sospecha no es suficiente para utilizar refrigeración por captación directa sin causar un impacto considerable.

La potencia bruta de generación se ha estimado teniendo en cuenta que aproximadamente dos tercios de ésta son producidos por la turbina de gas y un tercio por la turbina de vapor, luego:

$$\dot{E}_{bruta} = \left(\frac{\eta_{neto\ CC} \cdot \dot{m}_{gas\ ap}}{1000} \right) \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot LHV_{gas\ ap} + \frac{1}{3} \cdot (LHV_{gas\ ap} + Q_{s\ rec\ CV}) \right) \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{bruta} & : \text{Potencia bruta de generación [MWe]} \\ \eta_{neto\ CC} & : \text{Rendimiento neto de un ciclo combinado tradicional, 60\%} \\ \dot{m}_{gas\ ap} & : \text{Flujo másico de gas combustible ap [kg/s]} \\ LHV_{gas\ ap} & : \text{LVH ap del gas combustible [kJ/kg gas ap]} \\ Q_{s\ rec\ CV} & : \text{Calor sensible recuperado del enfriamiento del gas combustible,} \\ & \quad \text{que es utilizado en el ciclo de vapor [kJ/kg gas ap]} \end{aligned}$$

Esta potencia bruta considera todos los consumos internos asociados a un ciclo combinado tradicional incluidas las perdidas asociadas a la subestación eléctrica encargada de elevar el voltaje a 220 [kV].

Además, el calor sensible de los gases de combustión que salen de la caldera HRSG y que es utilizado en el proceso de secado, cuando corresponde, es calculado mediante:

$$\dot{Q}_{s\ gc} = Q_{s\ gc} \cdot \dot{m}_{gas\ ap} \cdot \frac{LHV_{gas\ ap}}{1000} \quad \text{Ecuación 4.16}$$

Donde:

$$\dot{Q}_{s\ gc} \quad : \quad \text{Calor sensible de los gases de combustión [MW]}$$

$Q_{s\ gc}$:	Pérdida estimada asociada al calor sensible de los gases de combustión en chimenea para un ciclo combinado tradicional, 12%
$\dot{m}_{gas\ ap}$:	Flujo másico de gas combustible ap [kg/s]
$LHV_{gas\ ap}$:	LVH ap del gas combustible [kJ/kg gas ap]

4.1.1.1 Potencia y rendimiento neto

La potencia y rendimiento neto de la central se ha calculado mediante:

$$\dot{E}_{neto} = \dot{E}_{bruta} - \dot{E}_{ci} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

$$\eta_{neto} = \frac{\dot{E}_{neto}}{\dot{m}_{res} \cdot \frac{LHV_{res}}{1000}} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde:

\dot{E}_{neto}	:	Potencia neta de generación [MWe]
\dot{E}_{bruta}	:	Potencia bruta de generación [MWe]
\dot{E}_{ci}	:	Potencia requerida por los equipos asociados a tratamiento de residuos, gasificación y limpieza y adecuación del gas combustible [MWe]
η_{neto}	:	Rendimiento neto de la central
\dot{m}_{res}	:	Flujo másico de residuos que entran al gasificador, ya sean RSM ar, %dry o RDF [kg/s]
LHV_{res}	:	LHV de los residuos que entran al gasificador, ya sean RSM ar, %dry o RDF [kJ/kg]

4.2 Análisis económico

4.2.1 Costos de inversión

Para determinar los costos de inversión se utilizarán costos unitarios para los equipos que lo permitan y cuando el costo de inversión a estimar esté basado en el costo de un equipo de referencia, se tendrá en cuenta el efecto de la capacidad mediante el uso de la Ecuación 4.19.

$$C_r = C_b \left(\frac{A_r}{A_b} \right)^n \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde:

C_r	:	Costo del equipo requerido
C_b	:	Costo del equipo base
A_r	:	Atributo del equipo requerido
A_b	:	Atributo del equipo base
n	:	Exponente de costo, en general se utiliza un valor entre 0,4 y 0,8. En este trabajo se utilizará un valor de 0,7

Para las conversiones de precios se han utilizado los datos de la Tabla 4.4. Los precios obtenidos en USD para cierto año han sido actualizados según la inflación correspondiente entre dicho año y el año 2016.

Tabla 4.4: Conversiones entre divisas y unidades de cuenta.

UF	26.172	[CLP]
USD	690	[CLP]
EUR	1,106235	[USD]

Terreno

Se estima un costo unitario de 0,20 [UF/m²] para un terreno rural ubicado en las cercanías de la zona de emplazamiento seleccionada. El costo unitario final puede verse en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Costo del terreno.

Superficie	100.000	[m ²]
Costo unitario	0,20	[UF/m ²]
Costo unitario	7,59	[USD/m ²]
Costo	758.609	[USD]

Correas transportadoras

El costo unitario de las correas transportadoras se ha estimado según el largo requerido, para lo cual se ha utilizado como referencia la central TV1 (ver Figura 4.7). El costo unitario puede verse en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Valor de las correas transportadoras.

Costo unitario	1.500	[USD/ft]
Costo unitario	4.864	[USD/m]
Fuente: Beumer Group [56]		
Largo total	580	[m]
Costo	2.821.012	[USD]

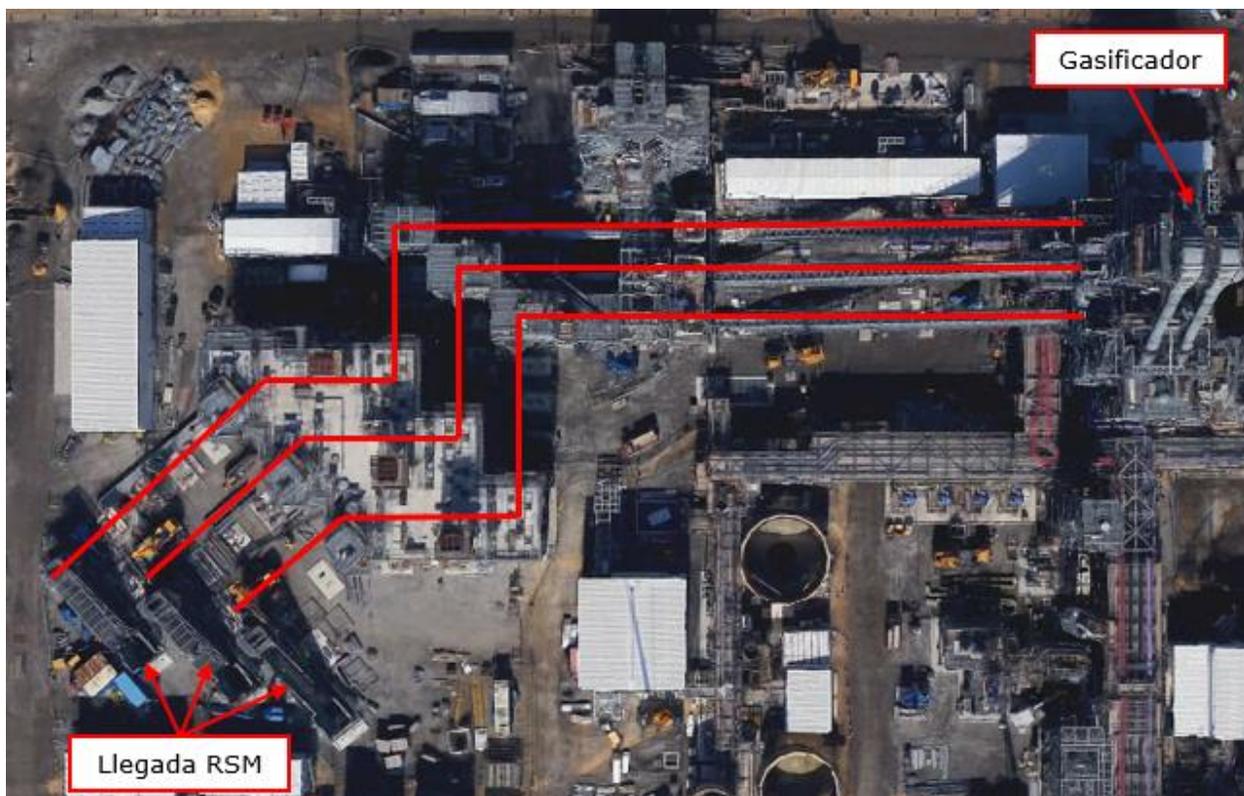


Figura 4.7: Transporte de RSM mediante correas transportadoras en la central TV1.

Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth.

Equipo de trituración

El costo del equipo de trituración se obtendrá utilizando el equipo base de la Tabla 4.7 y la Ecuación 4.19.

Tabla 4.7: Costo del equipo de trituración de referencia.

Costo	585.698 [USD] (1977)
Costo	2.321.707 [USD]
Capacidad	56,70 [ton/hr]

Fuente: Woodruff, Bales [57]

Secado

El costo del equipo de secado se obtendrá utilizando el equipo base de la Tabla 4.8 y la Ecuación 4.19.

Tabla 4.8: Costo del equipo de secado de referencia.

Costo	323.000 [USD]
Capacidad	7,6 [ton/hr]

Fuente: Hanning Li, K Finney [58]

Planta de reciclaje

El costo de la planta de reciclaje corresponde al mismo de la planta de KDM, ubicada en el RSLLC, cuya capacidad media es de 500 [ton/día] operando con 2 turnos de 7 horas cada uno, sin embargo, la capacidad máxima de esta planta con 3 turnos de 7 horas es de 1.050 [ton/día]. El costo es de 1.000.000 USD [59].

Gasificador y equipos accesorios

Del equipo de gasificación y accesorios, es de los se conoce menos información de costos, debido a que su aplicación en tratamiento de residuos es relativamente nueva, y los proveedores de tecnología plasma son reacios a entregar información de costos si no existe respaldo de la existencia de inversión para la realización de un proyecto de este tipo. De ocho proveedores de tecnología plasma consultados, sólo uno, Plazarium, entregó valores gruesos de costos.

Además surge la inquietud sobre cuál es la referencia adecuada del costo unitario; toneladas de residuos tratados o potencia plasma requerida. Para la capacidad del reactor referir los costos a la capacidad en toneladas parece ser la mejor opción, sin embargo, la potencia requerida, que depende de la composición de los residuos a tratar, en particular de su contenido de humedad, será clave en el número de antorchas de plasma requeridas, y debido a su alto costo de inversión, un índice de precios referido a potencia total requerida por las antorchas de plasma parece una buena opción.

Respecto de la información disponible, se ha recopilado la siguiente:

- a. Primero a modo de referencia el costo unitario para un bloque de gasificación tradicional, utilizado en una central IGCC tradicional es del orden de 1.375.000 USD por MWe bruto. Teniendo en cuenta además que la generación eléctrica de 1.000 [ton/día] de residuos es del orden de 50 MW, se estima que el costo unitario asociado a flujo de residuos es de 68.750 [USD/ton/día].
- b. Información periodística indica que el costo total de las centrales TV1 y TV2 se encuentra entre 200 y 500 MM USD cada una. Sin embargo, estos costos pueden no ser representativos debido a que dichas centrales han presentado problemas técnicos

y no es posible distinguir si corresponden a problemas en la ingeniería propia del proyecto o a problemas de la tecnología plasma propiamente tal. De hecho, Air Products el principal patrocinador del proyecto ha decidido desligarse de éste [60] [47].

- c. Plazarium indica que el costo unitario de sus equipos de gasificación hasta la limpieza del gas combustible (incluida), referido al flujo de residuos es de 4.800 [EUR/kg/hr] o 221.247 [USD/ton/día]. Plazarium ofrece equipos en un rango de entre 10 y 1.000 [kg/hr]. Al ser consultados sobre las opciones para procesar 1.000 [ton/día] plantean la utilización de 100 reactores de 10 [ton/día] de capacidad, lo cual indican, significaría una disminución de precio de entre 20% y 40%. En opinión del autor no parece viable la utilización de 100 reactores individuales, sin embargo, la utilización de un solo reactor debería significar una disminución en los costos, aunque no es posible afirmar si correspondería a la indicada por Plazarium [61]. Para poder tener una estimación del costo unitario de Plazarium sin el sistema de limpieza se ha utilizado el costo unitario del sistema de limpieza de gas combustible asociado a una central IGCC tradicional, que corresponde a 765.000 USD por MW brutos, y teniendo en cuenta además que la generación eléctrica de 1.000 [ton/día] de residuos es del orden de 50 MW, se estima entonces, que costo unitario de Plazarium para el sistema de gasificación es de 182.997 [USD/ton/día].
- d. Plazarium indica que el costo de su antorcha de plasma de mayor potencia, 300 kWe, es de 442.500 EUR o 489.509 USD. Este costo incluye los accesorios requeridos para la operación, luego el costo unitario referido a potencia es de 1.632 [USD/kWe] [61].
- e. Información periodística indica que 4 Antorchas de plasma Westinghouse modelo Marc 3 de 300 kWe cada una, tienen un costo de 1 MM USD. No se indica si se incluyen equipos accesorios requeridos para su funcionamiento. Referido a potencia, corresponde a un valor unitario de 833 [USD/kWe] [62].
- f. Información de Cormark Securities Inc., un agente Canadiense de inversiones independiente, indica; "un gasificador Westinghouse modelo G65, controles, instrumentación y servicios de ingeniería" tienen un costo de 22 MM USD. No existe claridad si en controles e instrumentación se incluyen antorchas de plasma y unidad generadora de aire de trabajo. Debido a que la capacidad máxima del gasificador G65 es 1.000 [ton/día], el valor unitario referido flujo másico de RSM corresponde a 22.000 [USD/ton/día] [63].
- g. Información periodística indica que "un equipo de gasificación por plasma para RSM Westinghouse, controles, instrumentación y servicios de ingeniería" para una planta de 600 [ton/día] de RSM tiene un costo de 15 MM USD que referido a flujo de residuos corresponde a un costo unitario de 25.000 [USD/ton/día]. No existe claridad si en controles e instrumentación se incluyen antorchas de plasma y unidad generadora de aire de trabajo [64].
- h. SCS Engineers estima que el costo de un bloque de gasificación completo para el tratamiento de 300 [ton/día] es de 27 MM USD, que referido a flujo de residuos corresponde a un costo unitario de 91.333 [USD/ton/día] [65].

Finalmente el costo del sistema de gasificación será obtenido mediante el promedio simple entre los costos obtenidos con la información de la Tabla 4.9 (puntos f, g, y h) y la Ecuación 4.19.

Tabla 4.9: Costos de los equipos de gasificación de referencia.

Westinghouse 1	
Costo	22.000.000 [USD]
Capacidad	1.000 [ton/día]
Westinghouse 2	
Costo	15.000.000 [USD]
Capacidad	600 [ton/día]
SCS Engineers	
Costo	27.000.000 [USD]
Capacidad	300 [ton/día]

Fabricación de lana mineral

El costo del bloque de fabricación de lana mineral se obtendrá utilizando el equipo base de la Tabla 4.10 y la Ecuación 4.19.

Tabla 4.10: Costo del bloque de fabricación de lana mineral de referencia.

Costo	6.000.000 [USD]
Capacidad	62 [ton/día]

Fuente: Bruce J. Clark, Marc J. Rogoff [65]

Recuperador de calor

Debido a que el recuperador de calor es similar en construcción a la etapa del sobrecalentador de la caldera HRSG, se utilizará el costo de un equipo de referencia (Tabla 4.11) y la Ecuación 4.19, para obtener el costo del equipo.

Tabla 4.11: Costo del equipo de recuperación de calor de referencia.

Costo	5.091.000 [USD]
Capacidad (DUTY)	40 [MW]

Limpieza y adecuación del gas combustible

El costo del sistema de limpieza y adecuación del gas combustible se obtendrá utilizando los equipos base de la Tabla 4.12 y la Ecuación 4.19. Las capacidades de los equipos de referencia se refieren a la potencia bruta de generación.

Tabla 4.12: Costo de los equipos de limpieza y adecuación del gas combustible de referencia.

Sistema de limpieza	
Costo	51.232.000 [USD]
Capacidad	67 [MWe]
Compresor de combustible	
Costo	3.140.000 [USD]
Capacidad	56 [MWe]

Bloque de potencia

Se utilizará el costo unitario de una central de ciclo combinado tradicional. Dicho costo incluye todo lo necesario para su funcionamiento; turbina de gas, caldera HRSG, turbina de vapor, condensador enfriado por agua, sistema de monitoreo de emisiones, generadores eléctricos, transformadores eléctricos elevadores de voltaje, bombas, estanques, torre de evaporación húmeda de tiro forzado, intercambiadores de calor auxiliares, monorrieles para mantenimiento, compresores de aire menores, instrumentación general, equipos de medio y bajo voltaje, obras civiles, edificaciones, montaje eléctrico y cableado, montaje de equipos, piping, etc. El costo unitario corresponde a 1.415 [USD/kWe bruto].

4.2.2 Costos de operación y mantenimiento (O&M)

En base a información de Plazarium, el costo general de operación y mantenimiento anual se ha definido como un 7% del costo total de inversión, para las 3 configuraciones de la central.

Cuando se incluye fabricación de lana mineral, se deben tener en cuenta los principales insumos requeridos, que son utilizados en el proceso de moldeado de la lana mineral y corresponden a aglutinantes; aproximadamente un 2% de resina fenólica y un 1% de aceite impregnante, que aumenta la resistencia de la lana mineral a la humedad. El costo de la resina fenólica se ha definido en 3.000 [USD/ton] y el del aceite impregnante en 5.500 [USD/ton].

Para la configuración que incluye separación de residuos se incluyen además los costos de operación de la Tabla 4.13, que corresponde a la operación mediante 3 turnos de 7 horas cada uno, necesarios para cumplir con el procesamiento de 1.000 toneladas diarias de RSM ar. El número de trabajadores por turno es de 35 personas, el detalle de éstos se puede ver en la Tabla 4.14 [59].

Tabla 4.13: Costos de O&M del bloque de separación de residuos.

Costos de operación	[USD/año]
Mano de obra fija	222.381
Mano de obra variable	433.859
Agua	6.594
Baños, aseo y desinfecciones	14.506
Mantención	26.375
Total	703.714

Tabla 4.14: Cargo y número de personas por turno.

Cargo	Número de personas por turno
Jefe	1
Supervisor	1
Administrativo de ventas	1
Operación y mantención	1
Acomodador	1
Operador cargador	1
Enfardadores	2
Recuperadores	24
Operador horquilla	1
Despachador	1
Bodeguero	1
Total	35

4.2.3 Ingresos

Las fuentes de ingresos corresponden a:

- Ingresos por venta de energía: Corresponde al ingreso debido a la energía vendida, el precio medio de mercado del SIC para el año 2014 fue de 96,4 [USD/MWh], sin embargo, debido a que durante el primer semestre del año 2016 el costo de la energía ha disminuido de manera importante, se utilizará un valor de 65 [USD/MWh], sin reajuste.
- Ingresos por potencia firme: Las centrales generadoras de electricidad conectadas a la red reciben un pago por potencia firme. La potencia firme la determina el CDEC, pero puede estimarse como la potencia neta por el factor de planta. El valor promedio del precio de potencia para el SIC para el año 2014 alcanzó un valor de 8,3 [USD/kW Mes].
- Ingresos por venta de CER's: La reducción de emisiones certificadas es calculada para cada configuración de la central siguiendo el procedimiento del ejemplo del Anexo A. El valor de los bonos de carbono ha tenido una drástica disminución en los últimos años, sin embargo durante el año 2015 y comienzos del 2016 se ha mantenido cercano a los 5 [USD/tCO₂e].
- Ingresos por comercialización de atributo verde: Debido al aumento de la matriz ERNC en Chile, el precio de las transacciones por atributo verde ha ido a la baja. El precio promedio de los traspasos de energía del año 2014 para el SIC fue de 6,7 [USD/MWh].
- Ingresos por tratamiento de residuos: Es análogo al precio por disposición de RSM en rellenos sanitarios, que corresponde a 9 [USD/ton].
- Venta de vitrificado o lana mineral: El vitrificado enfriado al aire libre puede ser vendido como relleno para construcción. Es análogo al ripio que tiene un costo estimado de 11 [USD/ton]. Debido a que es un sustituto poco conocido se ha fijado su precio de venta en 5 [USD/ton]. Para el caso de la lana mineral, el precio de venta de ésta, se sitúa entre 2.000 y 5.000 [USD/ton], por lo que para hacer más atractiva su venta se ha fijado su precio de venta en 1.000 [USD/ton]. Además, debido a que la central en cualquiera de sus configuraciones con fabricación de lana mineral produciría una cantidad similar a la que actualmente se transa en el mercado nacional, se ha establecido un máximo de producción de 8.750 toneladas anuales, equivalentes a aproximadamente un 25% del valor transado en el mercado nacional.

4.2.4 Flujo de caja, VAN y TIR

El flujo de caja permite determinar los indicadores VAN y TIR. El horizonte de evaluación se ha fijado en 25 años y la tasa de descuento para calcular el VAN se ha fijado en 10%, valores típicos para la evaluación de proyectos de generación eléctrica.

La vida útil de la central se ha definido en 25 años y la depreciación se ha estimado linealmente tomando la inversión total sin considerar la inversión en terreno, para los 25 años de vida útil. El impuesto a las utilidades se ha fijado en un 25%.

5 Análisis de la central utilizando RSM ar

5.1 Diseño conceptual de la central

5.1.1 Tratamiento de los residuos

La composición y humedad de los residuos que entran al gasificador corresponde a lo mostrado en la

Tabla 4.2. El único tratamiento corresponde a trituración, luego los consumos eléctricos son:

Correas transportadoras

El consumo eléctrico de las correas transportadoras se ha estimado utilizando la Ecuación 4.1:

$$\dot{E}_{belt} = \left(\frac{4}{1000} \cdot \frac{3600}{1000} \right) \cdot \dot{m}_{RSM\ ar} \cdot (H_1 + H_2) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

$$\begin{array}{ll} \dot{m}_{RSM\ ar} & : \quad 11,57 \text{ [kg RSM ar/s]} \\ H_1 & : \quad \text{Altura entre equipos menores, 1 [m]} \\ H_2 & : \quad \text{Altura del gasificador, 25 [m]} \end{array}$$

Luego:

$$\dot{E}_{belt} = 4,33 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Equipo de trituración

El consumo eléctrico del equipo de trituración se ha estimado utilizando la Ecuación 4.2, luego:

$$\dot{E}_{trit} = 0,29 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

5.1.2 Bloque de gasificación

Modelamiento del proceso mediante GasifEq

Cantidad de oxidante

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.7, se obtiene la Figura 5.1, luego:

$$m = 0,34 \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol RSM daf}} \right] \quad \text{Ecuación 5.4}$$

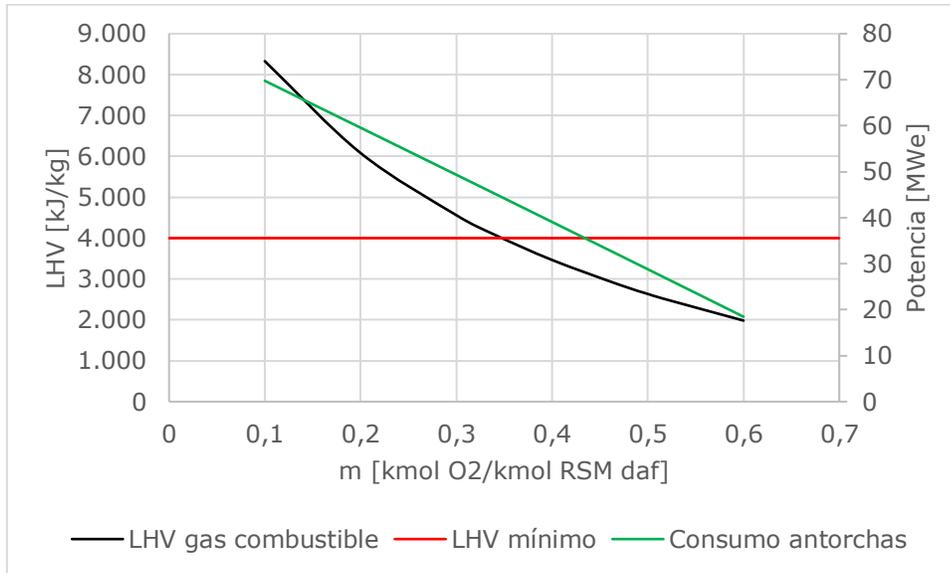
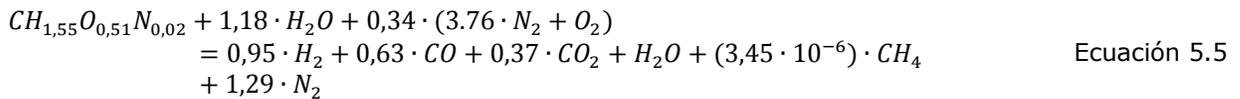


Figura 5.1: Variación del poder calorífico inferior del gas combustible y de la energía requerida para la gasificación según la cantidad de oxidante. Configuración utilizando RSM ar.

Utilizando el procedimiento descrito en la Sección 3.2.5, "Estimación del poder calorífico de los residuos" y el modelo GasifEq (Sección 3.4.6), se obtiene:

Reacción de gasificación en equilibrio



$$MM_{RSM\ daf} = 22 \left[\frac{kg\ daf}{kmol\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Concentración de cada compuesto del gas combustible

Tabla 5.1: Concentración de cada compuesto del gas combustible. Configuración utilizando RSM ar.

Compuesto	%m/m	%v/v
H ₂	2,123%	22,493%
CO	19,664%	14,878%
CO ₂	18,055%	8,693%
H ₂ O	20,025%	23,570%
CH ₄	0,000%	0,000%
N ₂	40,133%	30,366%

Calores RSM ar

$$HHV_{RSM\ ar} = 9.717 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ ar} \right] \quad \text{Ecuación 5.7}$$

$$HHV_{RSM\ daf} = 21.944 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$HHV_{kmol\ RSM\ daf} = 482.706 \left[\frac{kJ}{kmol\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$LHV_{kmol\ RSM\ daf} = 396.664 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.10}$$

$$LHV_{RSM\ daf} = 18.032 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.11}$$

$$LHV_{RSM\ dry} = 13.963 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ dry} \right] \quad \text{Ecuación 5.12}$$

$$LHV_{RSM\ ar} = 7.985 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ ar} \right] \quad \text{Ecuación 5.13}$$

Potencia eléctrica requerida por las antorchas de plasma

$$\dot{E}_{gasif} = 42,29 [MWe] \quad \text{Ecuación 5.14}$$

$$\dot{E}_{vit} = 2,95 [MWe] \quad \text{Ecuación 5.15}$$

Calores del gas combustible

$$HHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} = 409.366 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.16}$$

$$LHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} = 367.350 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 5.17}$$

$$LHV_{gas\ ap} = 4.084 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 5.18}$$

$$Q_s\ gas\ ap = 1.574 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 5.19}$$

$$Q_l\ gas\ ap = 467 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 5.20}$$

Flujos de masa

$$\dot{m}_{RSM\ ar} = 11,57 \left[\frac{kg\ RSM\ ar}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.21}$$

$$\dot{m}_{RSM\ daf} = 5,13 \left[\frac{kg\ RSM\ daf}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.22}$$

$$\dot{m}_{Ash} = 1,49 \left[\frac{kg\ Ash}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.23}$$

$$\dot{m}_m = 10,88 \left[\frac{kg\ aire\ total}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.24}$$

$$\dot{n}_{RSM\ daf} = 0,23 \left[\frac{kmol\ RSM\ daf}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.25}$$

$$\dot{m}_{gas\ ap} = 20,96 \left[\frac{kg\ gas\ ap}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.26}$$

$$\dot{m}_{vit} = 1,49 \left[\frac{kg \ vit}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.27}$$

$$\dot{m}_{vit/LM} = 0,35 \left[\frac{kg \ vit}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.28}$$

Eficiencia de gas frío

$$\eta_{CGE} = 0,81 \quad \text{Ecuación 5.29}$$

Gasificador y antorchas de plasma

Para cubrir la necesidad energética del proceso de gasificación se requieren 19 antorchas de plasma Westinghouse modelo Marc 11H o equivalentes.

Luego, el flujo de aire utilizado por antorcha según la potencia de operación puede calcularse mediante la Ecuación 4.9, obteniéndose:

$$\dot{m}_{air \ torch \ un} = 0,254 \left[\frac{kg \ air}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.30}$$

Luego, las 19 antorchas de plasma requieren:

$$\dot{m}_{air \ torch} = 4,83 \left[\frac{kg \ air}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.31}$$

Finalmente el aire suplementario necesario para el proceso puede obtenerse mediante:

$$\dot{m}_{air \ sup} = \dot{m}_m - \dot{m}_{air \ torch} = 6,05 \left[\frac{kg \ air}{s} \right] \quad \text{Ecuación 5.32}$$

Equipos accesorios

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.7, se obtiene:

$$\dot{E}_{DC} = 2,26 \ [MWe] \quad \text{Ecuación 5.33}$$

$$\dot{E}_{comp} = 2,74 \ [MWe] \quad \text{Ecuación 5.34}$$

Balance de calor y masa

En base a la información calculada en la Sección 5.1.2, se presenta en la Figura 5.2 el balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma.

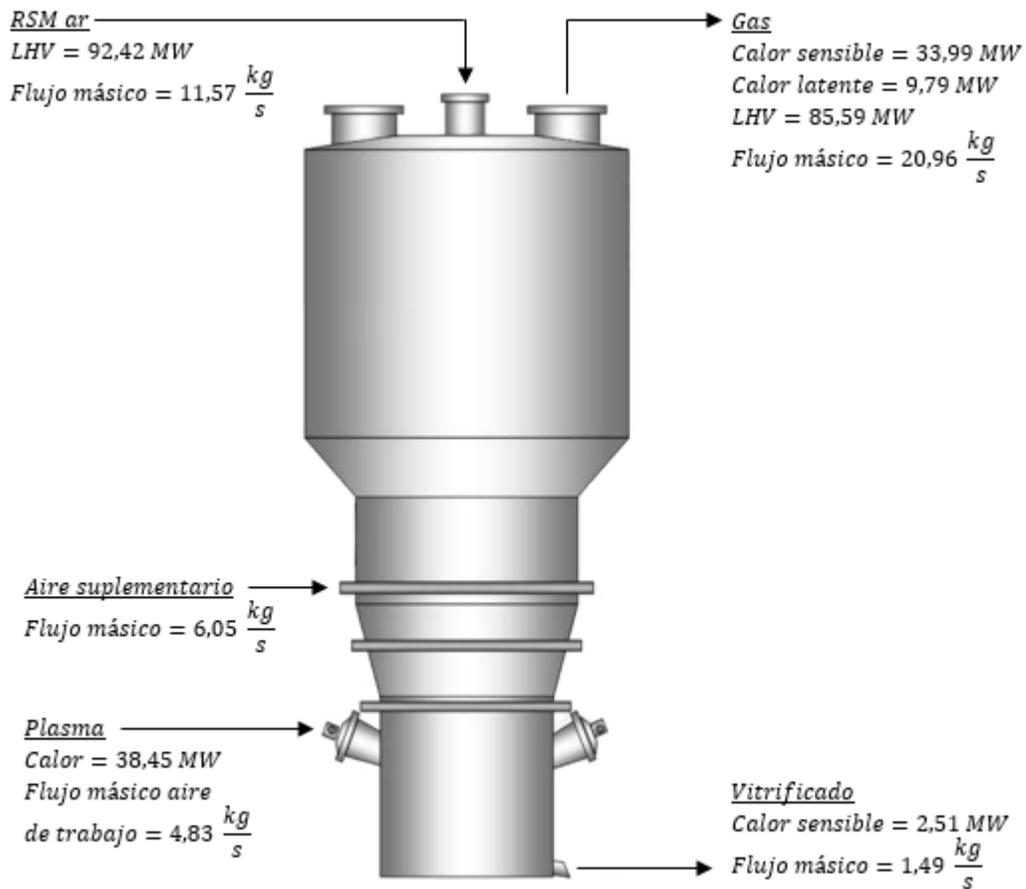


Figura 5.2: Balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma. Configuración utilizando RSM ar.

5.1.3 Fabricación de lana mineral

Utilizando la Ecuación 4.12, teniendo en cuenta el rendimiento en la fabricación y el límite de producción anual de 8.750 toneladas de lana mineral, se obtiene:

$$\dot{E}_{LM} = 0,41 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 5.35}$$

5.1.4 Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.9 se obtiene:

$$Q_{s \text{ rec gas ap}} = 847,36 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg gas ap}} \right] \quad \text{Ecuación 5.36}$$

$$\dot{E}_{LA} = 2,20 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 5.37}$$

5.1.5 Bloque de potencia

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.10, se obtiene:

$$\dot{E}_{bruta} = 54,91 [MWe] \quad \text{Ecuación 5.38}$$

$$\dot{Q}_{s_{gc}} = 10,27 [MW] \quad \text{Ecuación 5.39}$$

5.1.6 Potencia y rendimiento neto

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.11, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

$$\dot{E}_{neto} = -2,16 [MWe] \quad \text{Ecuación 5.40}$$

Con fabricación de lana mineral:

$$\dot{E}_{neto} = -2,57 [MWe] \quad \text{Ecuación 5.41}$$

Como se puede apreciar para ambos casos existe un déficit energético, por lo que no se ha calculado el rendimiento de la central para estos casos.

5.2 Análisis económico

5.2.1 Costos de inversión

Utilizando los datos de la Sección 4.2.1, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

Tabla 5.2: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral.

Ítem	Costo [USD]
Terreno	758.609
Correas transportadoras	2.821.012
Trituración	1.871.334
Bloque plasma	35.388.002
Recuperador de calor del gas	2.873.399
Limpieza del gas y adecuación del gas	47.634.014
Bloque CC	77.692.084
Total	169.038.455

Con fabricación de lana mineral:

Tabla 5.3: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral.

Ítem	Costo [USD]
Terreno	758.609
Correas transportadoras	2.821.012
Trituración	1.871.334
Bloque plasma	35.388.002
Recuperador de calor del gas	2.873.399
Fabricación de lana mineral	10.024.743
Limpieza del gas y adecuación del gas	47.634.014
Bloque CC	77.692.084
Total	179.063.197

5.2.2 Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Utilizando los datos de la Sección 4.2.2, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

- El costo general de O&M corresponde a 11.779.589 [USD/año].

Con fabricación de lana mineral:

- El costo general de O&M incluida la mantención de los equipos de fabricación de lana mineral, corresponde a 12.481.321 [USD/año].
- El costo de operación asociado a la fabricación de lana mineral corresponde a 1.156.609 [USD/año] (ver Tabla 5.4).

Tabla 5.4: Costos de operación de la fabricación de lana mineral. Configuración utilizando RSM ar.

Cantidad de resina	201 [ton/año]
Costo resina	3.000 [USD/ton]
Cantidad de aceite impregnante	101 [ton/año]
Costo aceite impregnante	5.500 [USD/ton]
Costo total anual	1.156.609 [USD/año]

5.2.3 Ingresos

Corresponden a los indicados en la Sección 4.2.3.

Para determinar la emisión de CER's para la central en esta configuración, se ha utilizado el procedimiento mostrado en el Anexo A, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6. Como puede verse, cuando no hay fabricación de lana mineral, la central no alcanza a compensar sus emisiones en cada uno de los tres periodos de siete años. Sólo alcanza a compensar sus emisiones en los últimos tres años del último periodo.

Para el caso de la central con fabricación de lana mineral, el panorama es peor, pues alcanza a compensar sólo en los últimos dos años del último periodo. Luego, en ambos casos la central no califica para emitir CER's al no ser aditiva. Esto se produce porque en esta configuración la central requiere energía, perdiéndose así la opción de desplazar fuentes de generación fósiles, por lo que la reducción de emisiones se debe principalmente a evitar la formación de CH₄ en rellenos sanitarios.

5.2.4 Flujo de caja, VAN y TIR

- El flujo de caja para la central sin fabricación de lana mineral puede verse en la Tabla E.1 (Anexo E). Para este caso, el VAN tiene un valor de -257 MM USD y además la operación de la central arroja pérdidas para cada uno de los años del horizonte de evaluación, por lo que no es posible obtener una TIR ni recuperar la inversión.
- El flujo de caja para la central con fabricación de lana mineral puede verse en la Tabla E.2 (Anexo E). Para este caso, el VAN tiene un valor de -207 MM y además la operación de la central arroja pérdidas para cada uno de los años del horizonte de evaluación, por lo que no es posible obtener una TIR ni recuperar la inversión.

Tabla 5.5: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral.

Año	BE _y [tCO ₂ e]	PE _y [tCO ₂ e]	LE _y [tCO ₂ e]	ER _y [tCO ₂ e]	ER _y acumulada [tCO ₂ e]
1	16.042	139.305	0	-123.263	-123.263
2	41.006	139.305	0	-98.299	-221.562
3	62.698	139.305	0	-76.607	-298.169
4	81.618	139.305	0	-57.687	-355.856
5	98.187	139.305	0	-41.118	-396.973
6	112.757	139.305	0	-26.548	-423.521
7	125.622	139.305	0	-13.682	-437.204
8	137.221	139.305	0	-2.083	-439.287
9	147.381	139.305	0	8.076	-431.211
10	156.466	139.305	0	17.161	-414.050
11	164.624	139.305	0	25.319	-388.731
12	171.980	139.305	0	32.675	-356.057
13	178.638	139.305	0	39.333	-316.723
14	184.688	139.305	0	45.384	-271.340
15	190.206	139.305	0	50.901	-220.438
16	195.255	139.305	0	55.951	-164.488
17	199.891	139.305	0	60.586	-103.902
18	204.161	139.305	0	64.856	-39.046
19	208.104	139.305	0	68.799	29.753
20	211.755	139.305	0	72.450	102.203
21	215.145	139.305	0	75.840	178.044

Tabla 5.6: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral.

Año	BE _y [tCO ₂ e]	PE _y [tCO ₂ e]	LE _y [tCO ₂ e]	ER _y [tCO ₂ e]	ER _y acumulada [tCO ₂ e]
1	13.612	139.305	0	-125.692	-125.692
2	38.577	139.305	0	-100.728	-226.420
3	60.269	139.305	0	-79.036	-305.456
4	79.189	139.305	0	-60.116	-365.572
5	95.758	139.305	0	-43.547	-409.119
6	110.328	139.305	0	-28.977	-438.095
7	123.193	139.305	0	-16.111	-454.207
8	134.829	139.305	0	-4.476	-458.683
9	144.988	139.305	0	5.683	-453.000
10	154.073	139.305	0	14.768	-438.232
11	162.231	139.305	0	22.926	-415.306
12	169.587	139.305	0	30.282	-385.024
13	176.245	139.305	0	36.940	-348.083
14	182.296	139.305	0	42.991	-305.093
15	187.813	139.305	0	48.508	-256.584
16	192.863	139.305	0	53.558	-203.027
17	197.498	139.305	0	58.194	-144.833
18	201.768	139.305	0	62.463	-82.370
19	205.711	139.305	0	66.406	-15.964
20	209.362	139.305	0	70.058	54.094
21	212.752	139.305	0	73.447	127.541

5.2.5 Análisis de sensibilidad

Sin fabricación de lana mineral

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN y de la TIR para la variación del precio del procesado de residuos (Figura 5.3) y para la variación del precio del vitrificado sin tratar (Figura 5.4). No existe ningún costo del bloque de gasificación que permita rentabilidad, por lo que no se hará un análisis de sensibilidad de este parámetro.

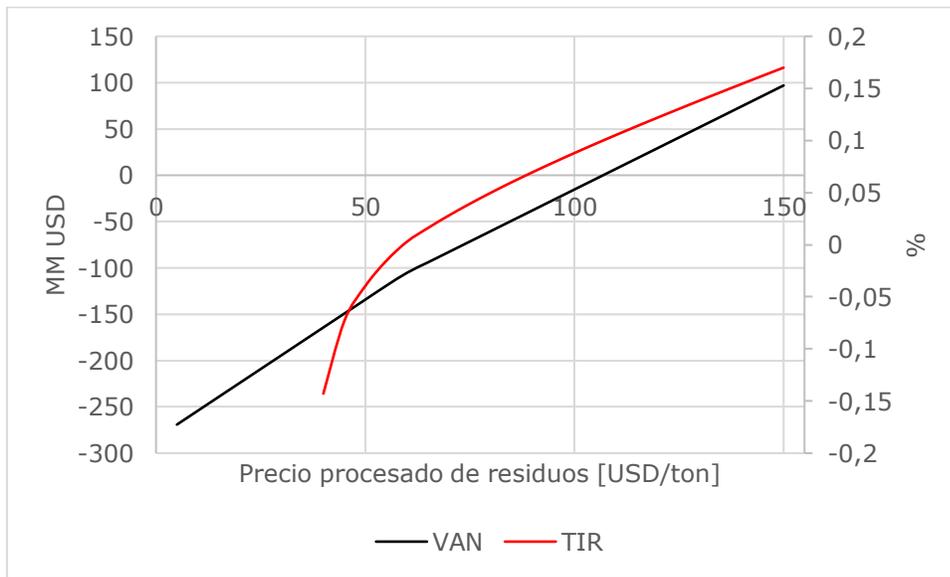


Figura 5.3: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral.

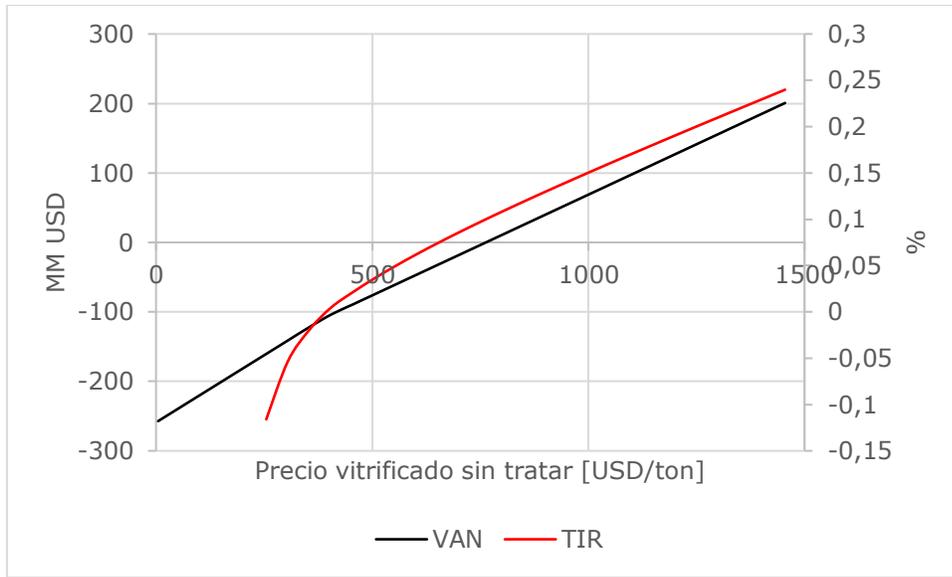


Figura 5.4: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del vitrificado sin tratar. Configuración utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral.

Con fabricación de lana mineral

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN y de la TIR para la variación del precio del procesado de residuos (Figura 5.5) y para la variación del precio de la lana mineral (Figura 5.6). No existe ningún costo del bloque de gasificación ni una cantidad de lana mineral producida que permitan rentabilidad, por lo que no se hará un análisis de sensibilidad de estos parámetros.

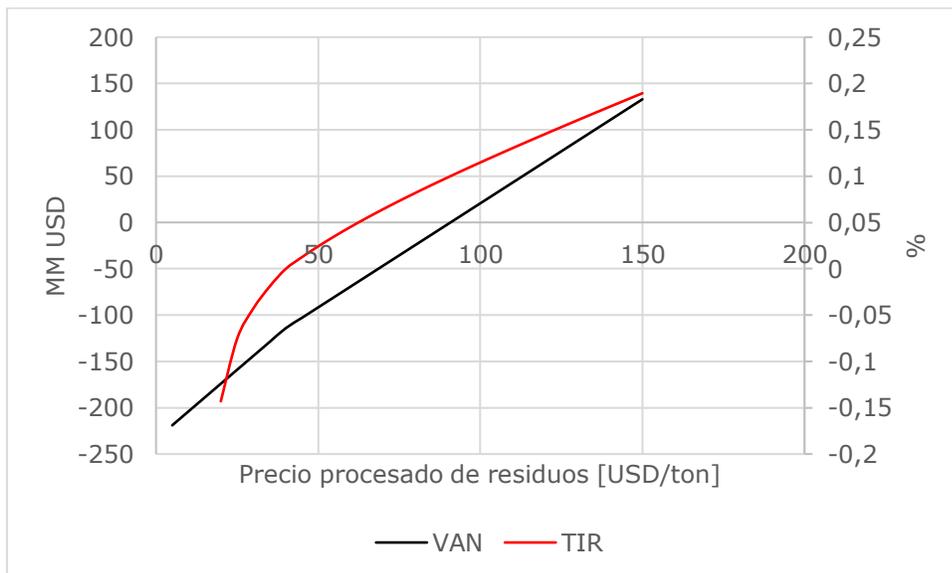


Figura 5.5: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral.

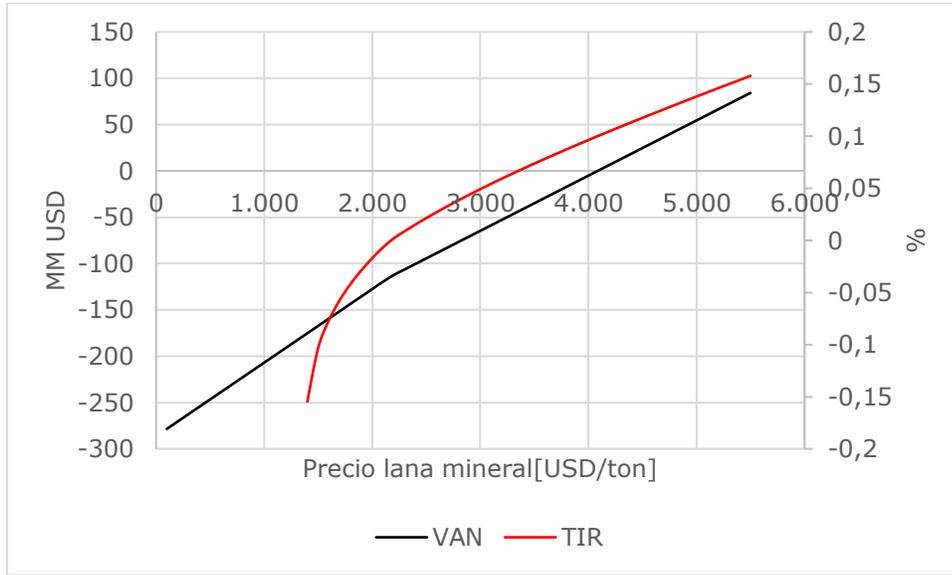


Figura 5.6: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio de la lana mineral. Configuración utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral.

6 Análisis de la central utilizando RSM %dry

6.1 Diseño conceptual de la central

6.1.1 Tratamiento de los residuos

La composición de los residuos que entran al gasificador corresponde al mostrado en la Tabla 4.2, pero con una humedad del 17,81% debido al secado realizado, luego los requerimientos son:

Correas transportadoras

El consumo eléctrico de las correas transportadoras se ha estimado utilizando la Ecuación 4.1:

$$\dot{E}_{belt} = \left(\frac{4}{1000} \cdot \frac{3600}{1000} \right) \cdot (\dot{m}_{RSM\ ar} \cdot H_1 + \dot{m}_{RSM\ \%dry} \cdot H_2) \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

\dot{m}_{RSM_ar}	:	Flujo de masa de RSM ar, 11,57 [kg RSM ar/s]
H_1	:	Altura entre equipos menores, 1 [m]
$\dot{m}_{RSM\ \%dry}$:	Flujo de masa de RSM %dry, 8,05 [kg RSM %dry/s] (Ecuación 3.50)
H_2	:	Altura del gasificador, 25 [m]

Luego:

$$\dot{E}_{belt} = 3,07 [MWe] \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Equipo de trituración

El consumo eléctrico del equipo de trituración se ha estimado utilizando la Ecuación 4.2, luego:

$$\dot{E}_{trit} = 0,29 [MWe] \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Equipo de secado

El requerimiento térmico y eléctrico del equipo de secado se ha determinado mediante la Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4 respectivamente, teniendo en cuenta un flujo de agua evaporada de 3,52 [kg H₂O/s] (Ecuación 3.51):

$$\dot{Q}_{secado} = 8,80 [MW] \quad \text{Ecuación 6.4}$$

$$\dot{E}_{secado} = 1,27 [MWe] \quad \text{Ecuación 6.5}$$

6.1.2 Bloque de gasificación

Modelamiento del proceso mediante GasifEq

Cantidad de oxidante

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.7, se obtiene la Figura 5.1, luego:

$$m = 0,42 \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol RSM } daf} \right]$$

Ecuación 6.6

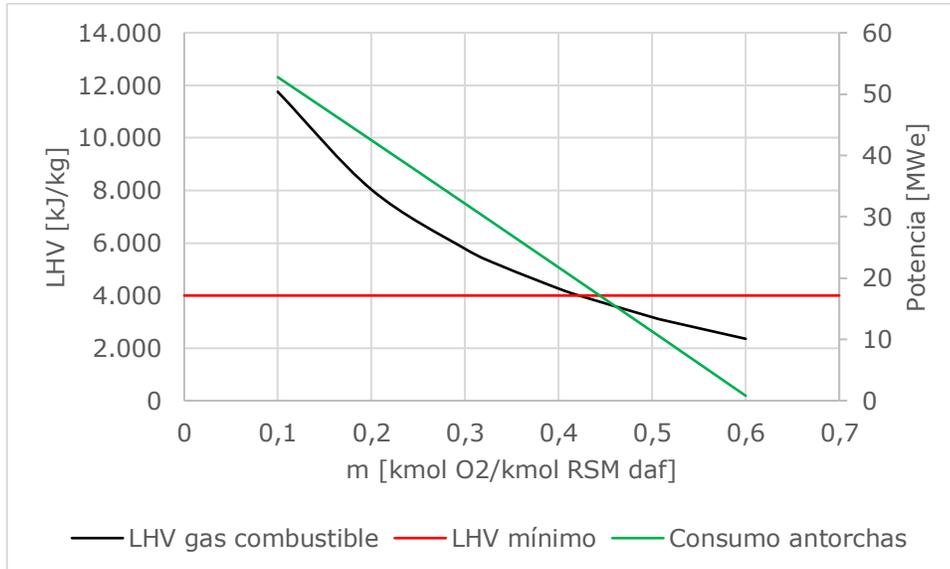
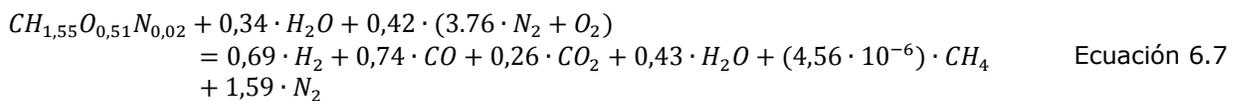


Figura 6.1: Variación del poder calorífico inferior del gas combustible y de la energía requerida para la gasificación según la cantidad de oxidante. Configuración utilizando RSM %dry.

Utilizando el procedimiento descrito en la Sección 3.2.5, "Estimación del poder calorífico de los residuos" y el modelo GasifEq (Sección 3.4.6), se obtiene:

Reacción de gasificación en equilibrio



Ecuación 6.7

$$MM_{RSM \text{ } daf} = 22 \left[\frac{\text{kg } daf}{\text{kmol RSM } daf} \right]$$

Ecuación 6.8

Concentración de cada compuesto del gas combustible

Tabla 6.1: Concentración de cada compuesto del gas combustible. Configuración utilizando RSM %dry.

Compuesto	%m/m	%v/v
H ₂	1,597%	18,488%
CO	24,185%	19,998%
CO ₂	13,306%	7,002%
H ₂ O	9,025%	11,609%
CH ₄	0,000%	0,000%
N ₂	51,886%	42,903%

Calores RSM %dry

$$HHV_{RSM\ dry} = 16.991 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ dry} \right] \quad \text{Ecuación 6.9}$$

$$HHV_{RSM\ \%dry} = 13.965 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ \%dry} \right] \quad \text{Ecuación 6.10}$$

$$HHV_{RSM\ ar} = 9.717 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ ar} \right] \quad \text{Ecuación 6.11}$$

$$HHV_{RSM\ daf} = 21.944 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 6.12}$$

$$HHV_{kmol\ RSM\ daf} = 428.706 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 6.13}$$

$$LHV_{kmol\ RSM\ daf} = 433.624 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 6.14}$$

$$LHV_{RSM\ daf} = 19.713 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 6.15}$$

$$LHV_{RSM\ dry} = 15.264 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ dry} \right] \quad \text{Ecuación 6.16}$$

$$LHV_{RSM\ \%dry} = 12.545 \left[\frac{kJ}{kg\ RSM\ \%dry} \right] \quad \text{Ecuación 6.17}$$

Potencia eléctrica requerida por las antorchas de plasma

$$\dot{E}_{gasif} = 16,71 [MWe] \quad \text{Ecuación 6.18}$$

$$\dot{E}_{vit} = 2,95 [MWe] \quad \text{Ecuación 6.19}$$

Calores del gas combustible

$$HHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} = 375.188 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 6.20}$$

$$LHV_{gas\ ap\ kmol\ RSM\ daf} = 345.038 \left[\frac{kmol}{kg\ RSM\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 6.21}$$

$$LHV_{gas\ ap} = 4.021 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 6.22}$$

$$Q_s\ gas\ ap = 1.391 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 6.23}$$

$$Q_l\ gas\ ap = 351 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 6.24}$$

Flujos de masa

$$\dot{m}_{RSM\ ar} = 11,57 \left[\frac{kg\ RSM\ ar}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.25}$$

$$\dot{m}_{RSM\ daf} = 5,13 \left[\frac{kg\ RSM\ daf}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.26}$$

$$\dot{m}_{Ash} = 1,49 \left[\frac{kg\ Ash}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.27}$$

$$\dot{m}_{RSM\ \%dry} = 8,05 \left[\frac{kg\ RSM\ \%dry}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.28}$$

$$\dot{m}_{H2O\ evap} = 3,52 \left[\frac{kg\ H2O\ evap}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.29}$$

$$\dot{m}_m = 13,43 \left[\frac{kg\ aire\ total}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.30}$$

$$\dot{n}_{RSM\ daf} = 0,23 \left[\frac{kmol\ RSM\ daf}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.31}$$

$$\dot{m}_{gas\ ap} = 19,99 \left[\frac{kg\ gas\ ap}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.32}$$

$$\dot{m}_{vit} = 1,49 \left[\frac{kg\ vit}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.33}$$

$$\dot{m}_{vit/LM} = 0,35 \left[\frac{kg\ vit}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.34}$$

Eficiencia de gas frío

$$\eta_{CGE} = 0,75 \quad \text{Ecuación 6.35}$$

Gasificador y antorchas de plasma

Para cubrir la necesidad energética del proceso de gasificación se requieren 9 antorchas de plasma Westinghouse modelo Marc 11H o equivalentes.

Luego, el flujo de aire utilizado por antorcha según la potencia de operación puede calcularse mediante la Ecuación 4.9, obteniéndose:

$$\dot{m}_{air\ torch\ un} = 0,226 \left[\frac{kg\ air}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.36}$$

Luego, las 9 antorchas de plasma requieren:

$$\dot{m}_{air\ torch} = 2,04 \left[\frac{kg\ air}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.37}$$

Finalmente el aire suplementario necesario para el proceso puede obtenerse mediante:

$$\dot{m}_{air\ sup} = \dot{m}_m - \dot{m}_{air\ torch} = 11,40 \left[\frac{kg\ air}{s} \right] \quad \text{Ecuación 6.38}$$

Equipos accesorios

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.7, se obtiene:

$$\dot{E}_{DC} = 0,98 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 6.39}$$

$$\dot{E}_{comp} = 3,39 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 6.40}$$

Balace de calor y masa

En base a la información calculada en la Sección 6.1.2, se presenta en la Figura 6.2 el balace de calor y masa del proceso de gasificación por plasma.

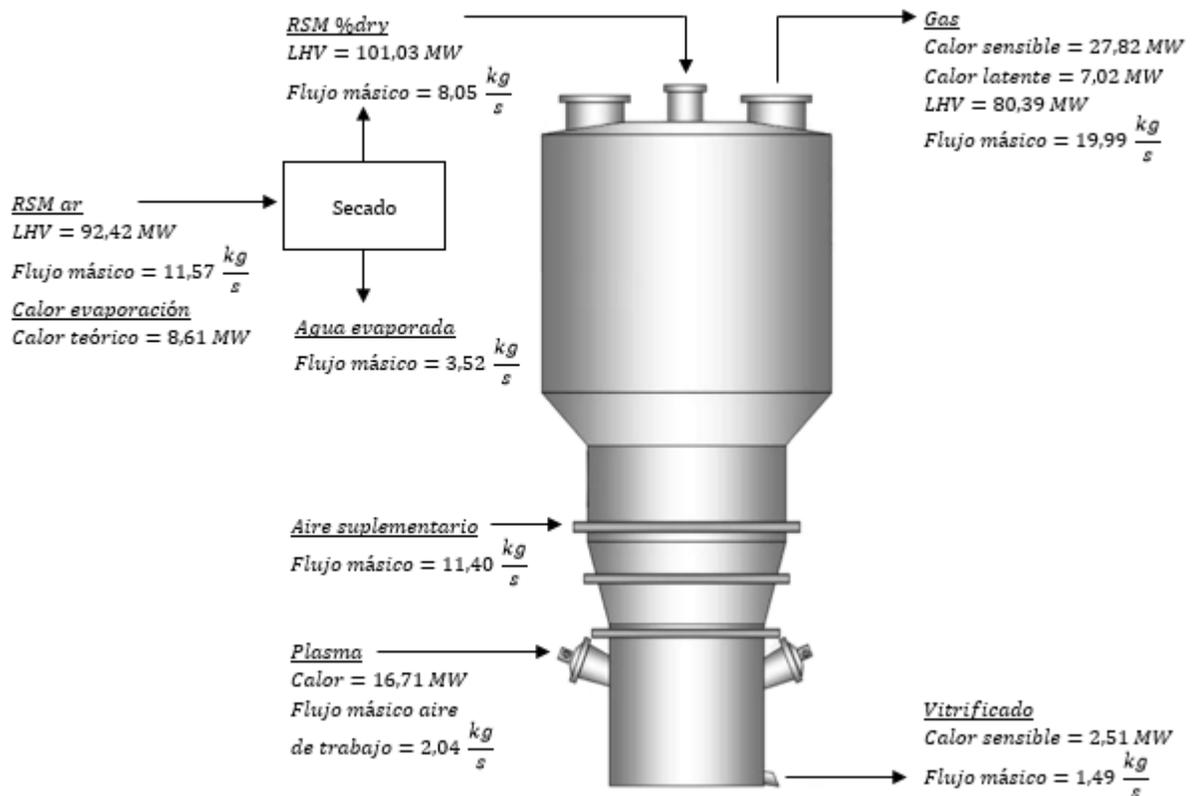


Figura 6.2: Balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma. Configuración utilizando RSM %dry.

6.1.3 Fabricación de lana mineral

Utilizando la Ecuación 4.12, teniendo en cuenta el rendimiento en la fabricación y el límite de producción anual de 8.750 toneladas de lana mineral, se obtiene:

$$\dot{E}_{LM} = 0,41 \text{ [MWe]} \quad \text{Ecuación 6.41}$$

6.1.4 Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.9 se obtiene:

$$Q_{s rec gas ap} = 745,20 \left[\frac{kJ}{kg gas ap} \right] \quad \text{Ecuación 6.42}$$

$$\dot{E}_{LA} = 2,05 [MWe]$$

Ecuación 6.43

6.1.5 Bloque de potencia

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.10, se obtiene:

$$\dot{E}_{bruta} = 51,22 [MWe]$$

Ecuación 6.44

$$\dot{Q}_{s,gc} = 9,65 [MW]$$

Ecuación 6.45

Puede apreciarse que el valor de la Ecuación 6.45 es superior al requerido por el equipo de secado (Ecuación 6.4).

6.1.6 Potencia y rendimiento neto

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.11, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

$$\dot{E}_{neto} = 20,52 [MWe]$$

Ecuación 6.46

$$\eta_{neto} = 20,31\%$$

Ecuación 6.47

Con fabricación de lana mineral:

$$\dot{E}_{neto} = 20,10 [MWe]$$

Ecuación 6.48

$$\eta_{neto} = 19,90\%$$

Ecuación 6.49

6.2 Análisis económico

6.2.1 Costos de inversión

Utilizando los datos de la Sección 4.2.1, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

Tabla 6.2: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral.

Ítem	Costo [USD]
Terreno	758.609
Correas transportadoras	2.821.012
Trituración	1.871.334
Secado	1.062.882
Bloque plasma	27.454.076
Recuperador de calor del gas	2.541.323
Limpieza del gas y adecuación del gas	45.369.423
Bloque CC	72.469.768
Total	154.348.426

Con fabricación de lana mineral:

Tabla 6.3: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral.

Ítem	Costo [USD]
Terreno	758.609
Correas transportadoras	2.821.012
Trituración	1.871.334
Secado	1.062.882
Bloque plasma	27.454.076
Recuperador de calor del gas	2.541.323
Fabricación lana mineral	10.024.743
Limpieza del gas y adecuación del gas	45.369.423
Bloque CC	72.469.768
Total	164.373.168

6.2.2 Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Utilizando los datos de la Sección 4.2.2, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

- El costo general de O&M corresponde a 10.751.287 [USD/año].

Con fabricación de lana mineral:

- El costo general de O&M, incluida la mantención de los equipos de fabricación de lana mineral, corresponde a 11.453.019 [USD/año].
- El costo de operación asociado a la fabricación de lana mineral corresponde a 1.156.609 [USD/año] (ver Tabla 6.4).

Tabla 6.4: Costos de operación de la fabricación de lana mineral. Configuración utilizando RSM %dry.

Cantidad de resina	201 [ton/año]
Costo resina	3.000 [USD/ton]
Cantidad de aceite impregnante	101 [ton/año]
Costo aceite impregnante	5.500 [USD/ton]
Costo total anual	1.156.609 [USD/año]

6.2.3 Ingresos

Corresponden a los indicados en la Sección 4.2.3.

Para determinar la emisión de CER's para la central en esta configuración, se ha utilizado el procedimiento mostrado en el Anexo A, obteniéndose los resultados de la Tabla 6.5 y la Tabla 6.6.

6.2.4 Flujo de caja, VAN y TIR

- El flujo de caja para la central sin fabricación de la lana mineral puede verse en la Tabla E.3 (Anexo E). Para este caso el VAN tiene un valor de -113 MM USD y la TIR un valor de -2,0%.
- El flujo de caja para la central con fabricación de la lana mineral puede verse en la Tabla E.4 (Anexo E). Para este caso el VAN tiene un valor de -73 MM USD y la TIR un valor de 3,6%. La recuperación de la inversión ocurre al diecisieteavo año de operación.

Tabla 6.5: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral.

Año	BE_y [tCO₂e]	PE_y [tCO₂e]	LE_y [tCO₂e]	ER_y [tCO₂e]
1	150.408	139.305	0	11.103
2	175.373	139.305	0	36.068
3	197.064	139.305	0	57.760
4	215.985	139.305	0	76.680
5	232.554	139.305	0	93.249
6	247.124	139.305	0	107.819
7	259.989	139.305	0	120.684
8	269.585	139.305	0	130.281
9	279.745	139.305	0	140.440
10	288.830	139.305	0	149.525
11	296.988	139.305	0	157.683
12	304.344	139.305	0	165.039
13	311.002	139.305	0	171.697
14	317.052	139.305	0	177.747
15	322.570	139.305	0	183.265
16	327.619	139.305	0	188.314
17	332.255	139.305	0	192.950
18	336.525	139.305	0	197.220
19	340.468	139.305	0	201.163
20	344.119	139.305	0	204.814
21	347.509	139.305	0	208.204

Tabla 6.6: CER's emitidos. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral.

Año	BE_y [tCO₂e]	PE_y [tCO₂e]	LE_y [tCO₂e]	ER_y [tCO₂e]
1	147.920	139.305	0	8.615
2	172.885	139.305	0	33.580
3	194.576	139.305	0	55.271
4	213.497	139.305	0	74.192
5	230.066	139.305	0	90.761
6	244.636	139.305	0	105.331
7	257.501	139.305	0	118.196
8	267.134	139.305	0	127.829
9	277.293	139.305	0	137.989
10	286.378	139.305	0	147.074
11	294.537	139.305	0	155.232
12	301.892	139.305	0	162.588
13	308.551	139.305	0	169.246
14	314.601	139.305	0	175.296
15	320.119	139.305	0	180.814
16	325.168	139.305	0	185.863
17	329.804	139.305	0	190.499
18	334.073	139.305	0	194.768
19	338.016	139.305	0	198.712
20	341.668	139.305	0	202.363
21	345.058	139.305	0	205.753

6.2.5 Análisis de sensibilidad

Sin fabricación de lana mineral

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN y de la TIR para la variación del precio del procesado de residuos (Figura 6.3) y para la variación del precio del vitrificado sin tratar (Figura 6.4). No existe ningún costo del bloque de gasificación que permita rentabilidad, por lo que no se hará un análisis de sensibilidad de este parámetro.

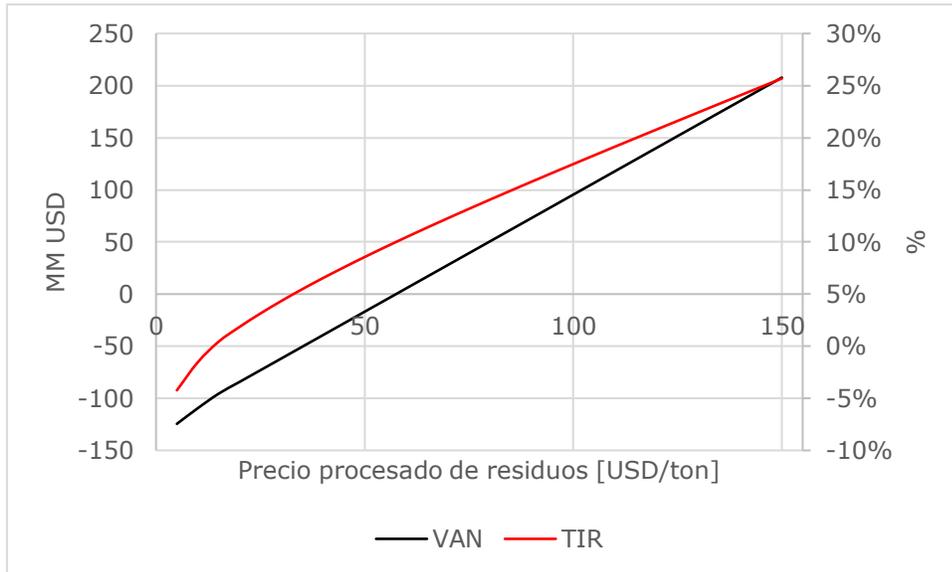


Figura 6.3: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral.

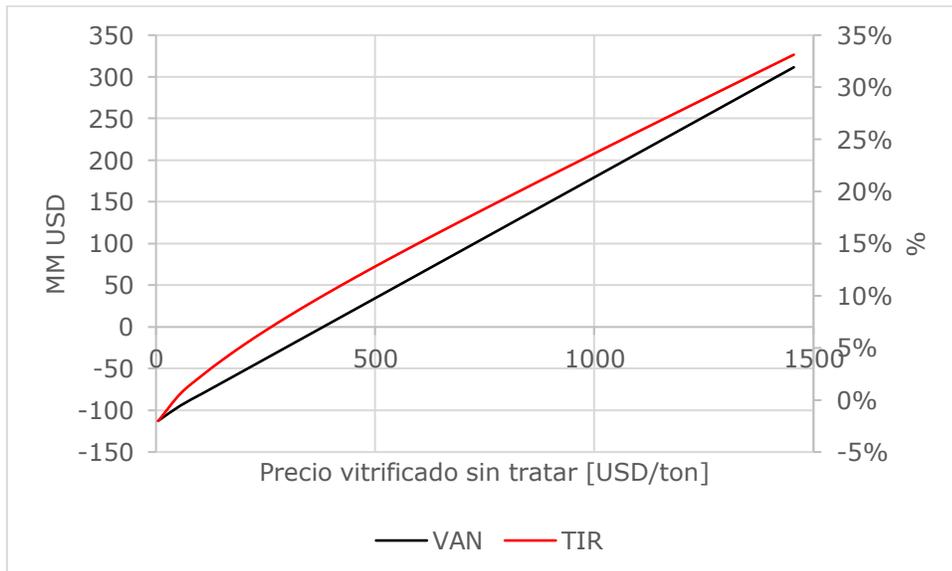


Figura 6.4: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del vitrificado sin tratar. Configuración utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral.

Con fabricación de lana mineral

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN y de la TIR para la variación del precio del procesado de residuos (Figura 6.5), para la variación del precio de la lana mineral (Figura 6.6) y para la variación de las toneladas de lana mineral producidas por año (Figura 6.7). No existe ningún costo del bloque de gasificación que permita rentabilidad, por lo que no se hará un análisis de sensibilidad de este parámetro.

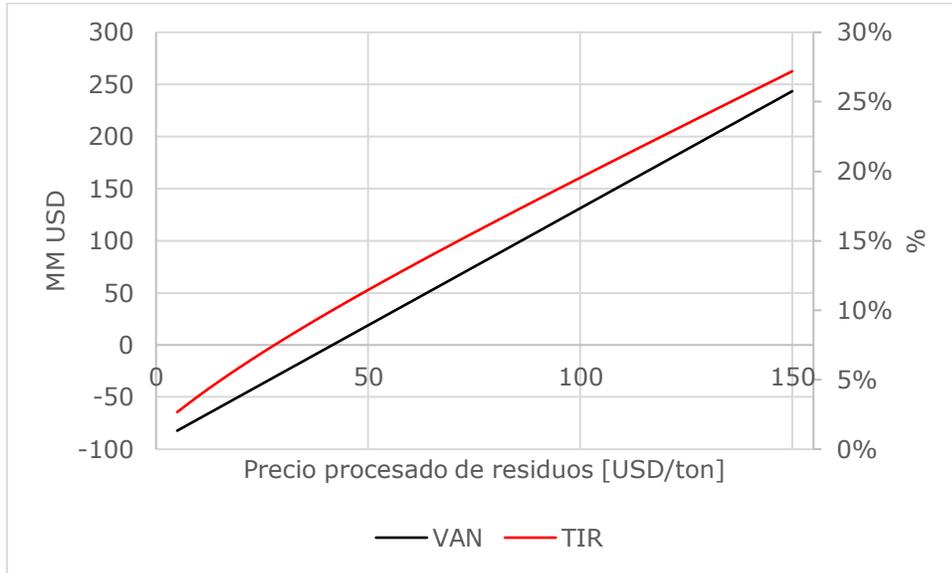


Figura 6.5: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral.

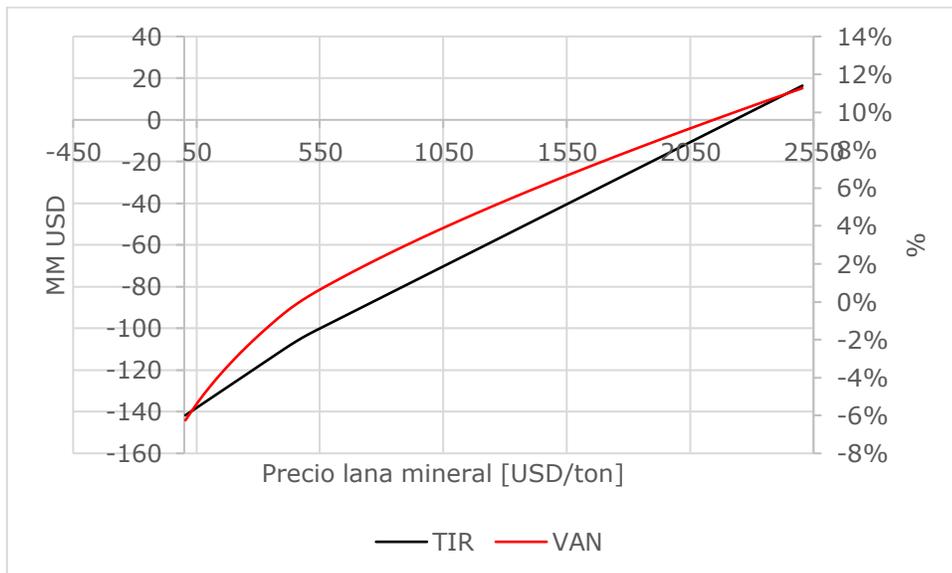


Figura 6.6: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio de la lana mineral. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral.

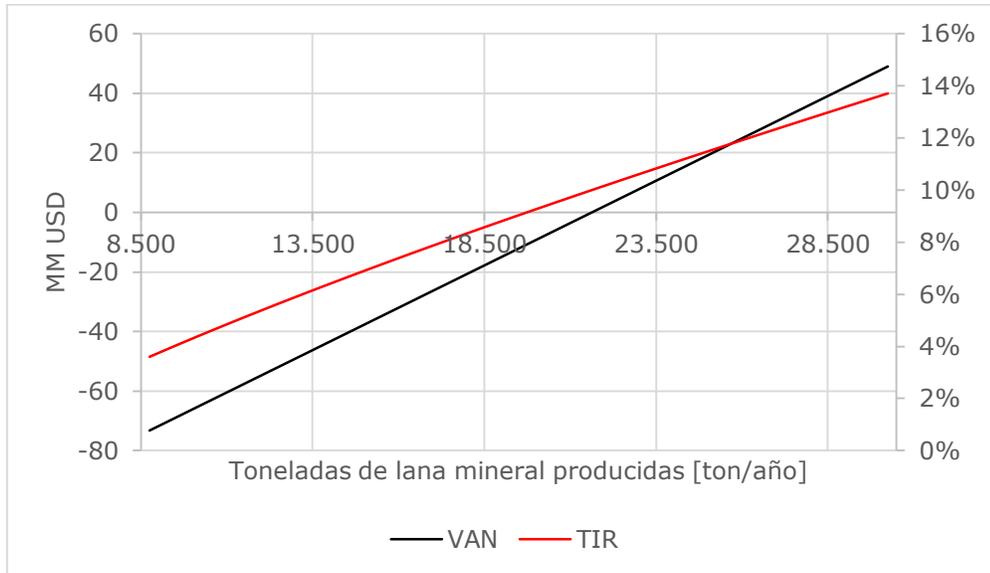


Figura 6.7: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con las toneladas de lana mineral producidas por año. Configuración utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral.

7 Análisis de la central utilizando RDF

7.1 Diseño conceptual de la central

7.1.1 Tratamiento de los residuos

Planta de reciclaje

Una planta de reciclaje además de seguir la secuencia óptima en términos de gestión de residuos (ver Sección 3.2.3), permite ingresos por reciclaje y separar los componentes que mayor impacto tienen en la humedad total; los residuos alimentarios y de jardín, que deben ser dispuestos fuera de la planta en relleno sanitario o ser usados para digestión anaeróbica.

La planta sería similar a la operada por KDM en el RSLLC (ver Sección 3.2.5), pero del doble de capacidad diaria. Utilizando los datos de recuperación de esta misma (ver Tabla 3.5) y las características de los RSM como son recibidos (Tabla 4.2), se puede estimar el siguiente desglose:

- 541,6 toneladas diarias son destinadas a relleno sanitario o digestión anaeróbica fuera de la planta.
- 68,9 toneladas diarias corresponden a material reciclable valorizable.
- 388,6 toneladas diarias corresponden a combustible RDF destinado a gasificación.

De esta forma el RDF para gasificación tendrá la composición y humedad de la Tabla 7.1.

El consumo eléctrico de la planta de reciclaje se ha estimado mediante la Ecuación 4.5, teniendo en cuenta que se procesan 1.000 [ton/día] de RSM ar, luego:

$$\dot{E}_{RDF} = 0,46 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.1}$$

Correas transportadoras

El consumo eléctrico de las correas transportadoras se ha estimado utilizando la Ecuación 4.1:

$$\dot{E}_{belt} = \left(\frac{4}{1000} \cdot \frac{3600}{1000} \right) \cdot (\dot{m}_{RSM\ ar} \cdot H_1 + \dot{m}_{RDF} \cdot H_2) \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Donde:

\dot{m}_{RSM_ar}	:	Flujo de masa de RSM ar, 11,57 [kg RSM ar/s]
H_1	:	Altura entre equipos menores, 1 [m]
\dot{m}_{RDF}	:	Flujo de masa de RDF [kg RDF/s]
H_2	:	Altura del gasificador, 25 [m]

Luego:

$$\dot{E}_{belt} = 1,79 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.3}$$

Tabla 7.1: Composición tipo análisis elemental y humedad del RDF.

Componentes principales	% En peso base húmeda (1)	Humedad típica (2)	% En peso base seca	% En peso base seca (3)					
				C	H	O	N	S	Ceniza
Papel	22,72	6	24,60	49,1	6,1	43,0	-	0,2	1,5
Cartón	5,10	5	5,57	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Plásticos	18,97	2	21,40	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Tetrapack (4)	0,36	10	0,37	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Pañales y celulosas sanitarias (5)	12,74	60	5,87	48,4	7,6	38,8	0,5	0,4	4,1
Gomas	0,28	2	0,32	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0
Cueros	0,18	10	0,19	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Vidrio	8,44	2	9,53	0,5	0,1	0,4	-	-	98,9
Metales	3,71	2	4,18	4,5	0,6	4,3	-	-	90,5
Madera	2,14	60	0,98	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Textiles	5,07	10	5,25	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Suciedad y cenizas	10,81	8	11,45	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Misceláneos (6)	9,50	6	10,28	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Total	100	13,17	100	39,15	4,96	24,00	0,29	0,14	31,46

(1) ESTUDIO CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARIOS EN LA REGIÓN METROPOLITANA - CONAMA RM 2006

(2) Solid Waste Engineering (2011) - William A. Worrell, P. Arne Vesilind

(3) Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues - Tchobanoglous et al (1993)

(4) y (5) Humedades estimadas

(6) Pilas, huesos, cueros, cerámicas, residuos sólidos especiales (*), otros

(*) Residuos que potencialmente podrían presentar alguna característica de peligrosidad

Equipo de trituración

El consumo eléctrico del equipo de trituración se ha estimado utilizando la Ecuación 4.2 teniendo en cuenta el flujo de RDF triturado, luego:

$$\dot{E}_{trit} = 0,11 [MWe]$$

Ecuación 7.4

7.1.2 Bloque de gasificación

Modelamiento del proceso mediante GasifEq

Cantidad de oxidante

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.7, se obtiene la Figura 7.1, luego:

$$m = 0,44 \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol } RSM \text{ daf}} \right]$$

Ecuación 7.5

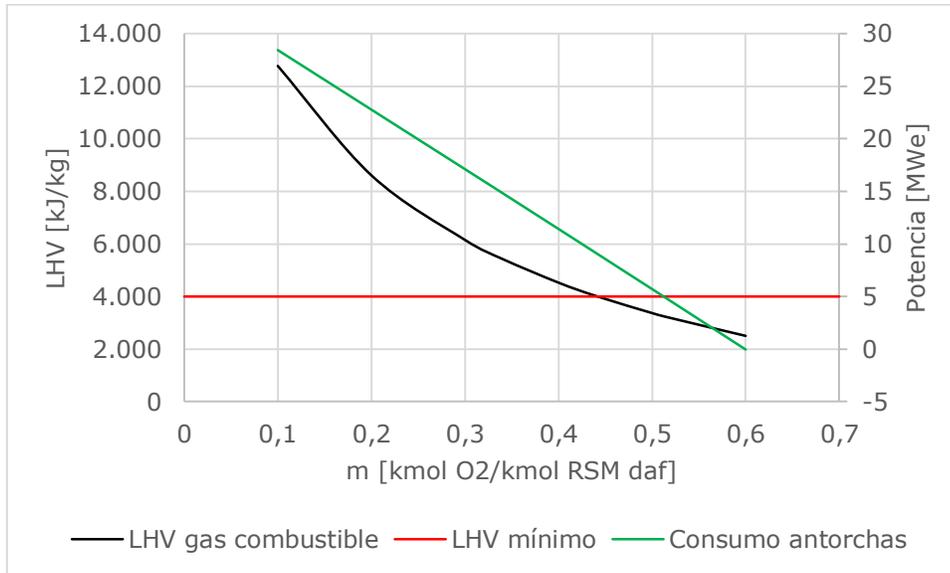
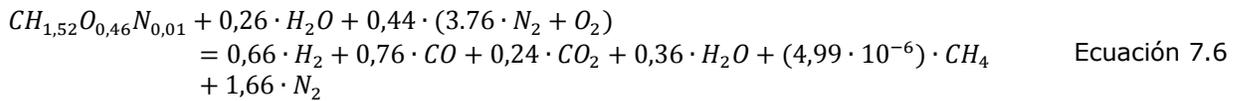


Figura 7.1: Variación del poder calorífico inferior del gas combustible y de la energía requerida para la gasificación según la cantidad de oxidante. Configuración utilizando RDF.

Utilizando el procedimiento descrito en la Sección 3.2.5, "Estimación del poder calorífico de los residuos" y el modelo GasifEq (Sección 3.4.6), aplicado de manera análoga a los RSM, se obtiene:

Reacción de gasificación en equilibrio



$$MM_{RDF\ daf} = 21 \left[\frac{kg\ daf}{kmol\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.7}$$

Concentración de cada compuesto del gas combustible

Tabla 7.2: Concentración de cada compuesto del gas combustible. Configuración utilizando RDF.

Compuesto	%m/m	%v/v
H ₂	1,525%	17,844%
CO	24,883%	20,795%
CO ₂	12,050%	6,408%
H ₂ O	7,586%	9,861%
CH ₄	0,000%	0,000%
N ₂	53,956%	45,092%

Calores RDF

$$HHV_{RDF\ dry} = 16.072 \left[\frac{kJ}{kg\ RDF\ dry} \right] \quad \text{Ecuación 7.8}$$

$$HHV_{RDF} = 13.955 \left[\frac{kJ}{kg\ RDF} \right] \quad \text{Ecuación 7.9}$$

$$HHV_{RDF\ daf} = 23.449 \left[\frac{kJ}{kg\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.10}$$

$$HHV_{kmol\ RDF\ daf} = 492.621 \left[\frac{kmol}{kg\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.11}$$

$$LHV_{kmol\ RDF\ daf} = 447.779 \left[\frac{kmol}{kg\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.12}$$

$$LHV_{RDF\ daf} = 21.314 \left[\frac{kJ}{kg\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.13}$$

$$LHV_{RDF\ dry} = 14.609 \left[\frac{kJ}{kg\ RDF\ dry} \right] \quad \text{Ecuación 7.14}$$

$$LHV_{RDF} = 12.685 \left[\frac{kJ}{kg\ RDF} \right] \quad \text{Ecuación 7.15}$$

Potencia eléctrica requerida por las antorchas de plasma

$$\dot{E}_{gasif} = 6,72 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.16}$$

$$\dot{E}_{vit} = 2,42 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.17}$$

Calores del gas combustible

$$HHV_{gas\ ap\ kmol\ RDF\ daf} = 374.942 \left[\frac{kmol}{kg\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.18}$$

$$LHV_{gas\ ap\ kmol\ RDF\ daf} = 346.062 \left[\frac{kmol}{kg\ RDF\ daf} \right] \quad \text{Ecuación 7.19}$$

$$LHV_{gas\ ap} = 4.021 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 7.20}$$

$$Q_s\ gas\ ap = 1.367 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 7.21}$$

$$Q_l\ gas\ ap = 336 \left[\frac{kJ}{kg\ gas\ ap} \right] \quad \text{Ecuación 7.22}$$

Flujos de masa

$$\dot{m}_{RSM\ ar} = 11,57 \left[\frac{kg\ RSM\ ar}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.23}$$

$$\dot{m}_{RDF} = 4,50 \left[\frac{kg\ RDF}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.24}$$

$$\dot{m}_{RDF\ daf} = 2,68 \left[\frac{kg\ RDF\ daf}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.25}$$

$$\dot{m}_{Ash} = 1,23 \left[\frac{kg\ Ash}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.26}$$

$$\dot{m}_m = 7,70 \left[\frac{kg \text{ aire total}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.27}$$

$$\dot{n}_{RDF \text{ daf}} = 0,13 \left[\frac{kmol \text{ RDF daf}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.28}$$

$$\dot{m}_{gas \text{ ap}} = 10,97 \left[\frac{kg \text{ gas ap}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.29}$$

$$\dot{m}_{vit} = 1,23 \left[\frac{kg \text{ vit}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.30}$$

$$\dot{m}_{vit/LM} = 0,35 \left[\frac{kg \text{ vit}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.31}$$

Eficiencia de gas frío

$$\eta_{CGE} = 0,74 \quad \text{Ecuación 7.32}$$

Gasificador y antorchas de plasma

Para cubrir la necesidad energética del proceso de gasificación se requieren 4 antorchas de plasma Westinghouse modelo Marc 11H o equivalentes.

Luego, el flujo de aire utilizado por antorcha según la potencia de operación puede calcularse mediante la Ecuación 4.9, obteniéndose:

$$\dot{m}_{air \text{ torch un}} = 0,241 \left[\frac{kg \text{ air}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.33}$$

Luego, las 4 antorchas de plasma requieren:

$$\dot{m}_{air \text{ torch}} = 0,96 \left[\frac{kg \text{ air}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.34}$$

Finalmente el aire suplementario necesario para el proceso puede obtenerse mediante:

$$\dot{m}_{air \text{ sup}} = \dot{m}_m - \dot{m}_{air \text{ torch}} = 6,73 \left[\frac{kg \text{ air}}{s} \right] \quad \text{Ecuación 7.35}$$

Equipos accesorios

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.7, se obtiene:

$$\dot{E}_{DC} = 0,46 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.36}$$

$$\dot{E}_{comp} = 1,94 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.37}$$

Balance de calor y masa

En base a la información calculada en la Sección 7.1.2, se presenta en la Figura 7.2 el balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma.

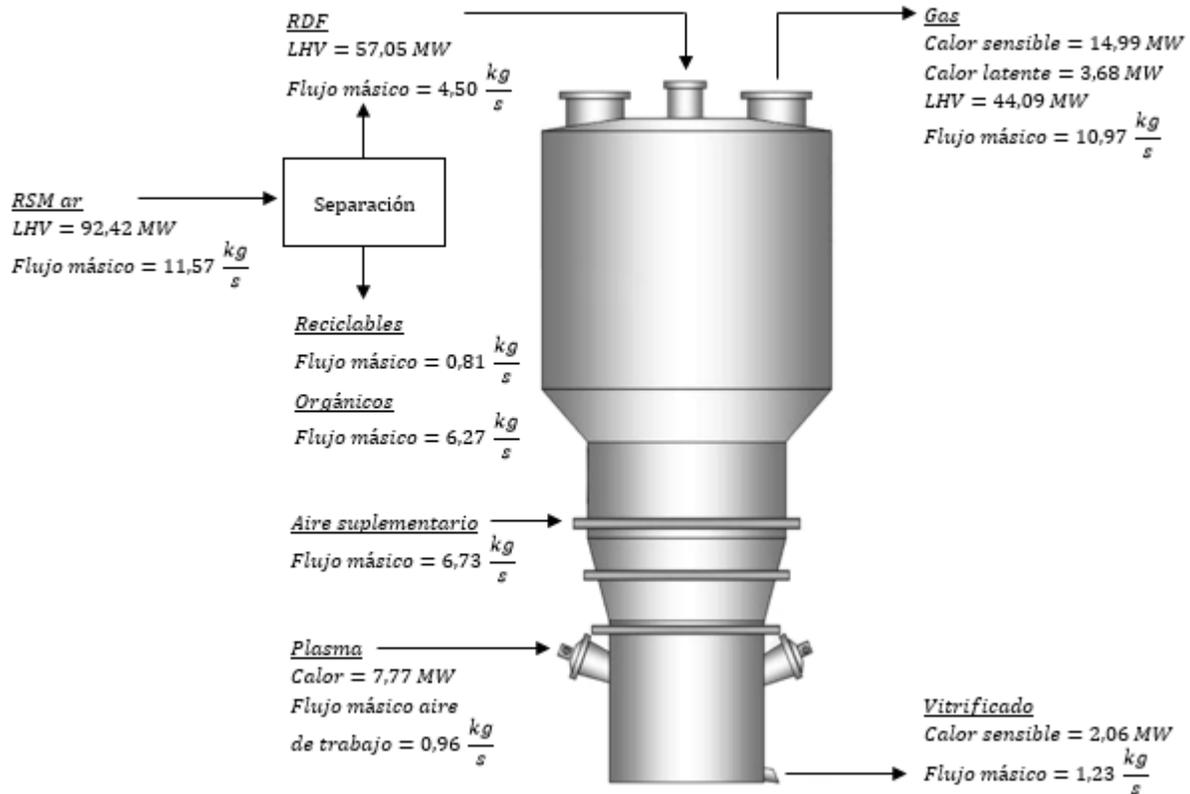


Figura 7.2: Balance de calor y masa del proceso de gasificación por plasma. Configuración utilizando RDF.

7.1.3 Fabricación de lana mineral

Utilizando la Ecuación 4.12, teniendo en cuenta el rendimiento en la fabricación y el límite de producción anual de 8.750 toneladas de lana mineral, se obtiene:

$$\dot{E}_{LM} = 0,41 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.38}$$

7.1.4 Recuperación de calor, limpieza y adecuación del gas combustible

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.9 se obtiene:

$$Q_{s \text{ rec gas ap}} = 731,51 \left[\frac{kJ}{kg \text{ gas ap}} \right] \quad \text{Ecuación 7.39}$$

$$\dot{E}_{LA} = 1,12 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.40}$$

7.1.5 Bloque de potencia

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.10, se obtiene:

$$\dot{E}_{bruta} = 28,06 [MWe] \quad \text{Ecuación 7.41}$$

$$\dot{Q}_{s_{gc}} = 5,29 [MW]$$

Ecuación 7.42

7.1.6 Potencia y rendimiento neto

Siguiendo el procedimiento de la Sección 4.1.11, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

$$\dot{E}_{neta} = 13,04 [MWe]$$

Ecuación 7.43

$$\eta_{neto} = 22,86\%$$

Ecuación 7.44

Con fabricación de lana mineral:

$$\dot{E}_{neta} = 12,63 [MWe]$$

Ecuación 7.45

$$\eta_{neto} = 22,13\%$$

Ecuación 7.46

7.2 Análisis económico

7.2.1 Costos de inversión

Utilizando los datos de la Sección 4.2.1, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

Tabla 7.3: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.

Ítem	Costo [USD]
Terreno	758.609
Clasificación	1.000.000
Correas transportadoras	2.821.012
Trituración	965.614
Bloque plasma	18.260.304
Recuperador de calor del gas	1.647.430
Limpieza del gas y adecuación del gas	29.774.185
Bloque CC	39.704.321
Total	94.931.474

Con fabricación de lana mineral:

Tabla 7.4: Costo de inversión de la central. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

Ítem	Costo [USD]
Terreno	758.609
Clasificación	1.000.000
Correas transportadoras	2.821.012
Trituración	965.614
Bloque plasma	18.260.304
Recuperador de calor del gas	1.647.430
Fabricación lana mineral	8.742.366
Limpieza del gas y adecuación del gas	29.774.185
Bloque CC	39.704.321
Total	103.673.840

7.2.2 Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Utilizando los datos de la Sección 4.2.2, se obtiene:

Sin fabricación de lana mineral:

- El costo general de O&M corresponde a 6.592.101 [USD/año].
- El costo de operación asociado a la planta de clasificación es de 703.714 [USD/año] (Tabla 7.5).

Tabla 7.5: Costo de operación anual asociado a la planta de clasificación.

Costos de operación	[USD/año]
Mano de obra fija	222.381
Mano de obra variable	433.859
Agua	6.594
Baños, aseo y desinfecciones	14.506
Mantenimiento	26.375
Total	703.714

Fuente: KDM [26].

Con fabricación de lana mineral:

- El costo general de O&M, incluida la mantención de los equipos de fabricación de lana mineral, corresponde a 7.204.066 [USD/año].
- El costo de operación asociado a la planta de clasificación es de 703.714 [USD/año] (Tabla 7.5).
- El costo de operación asociado a la fabricación de lana mineral corresponde a 1.156.609 [USD/año] (Tabla 7.6).

Tabla 7.6: Costos de operación de la fabricación de lana mineral. Configuración utilizando RDF.

Cantidad de resina	201 [ton/año]
Costo resina	3.000 [USD/ton]
Cantidad de aceite impregnante	101 [ton/año]
Costo aceite impregnante	5.500 [USD/ton]
Costo total anual	1.156.609 [USD/año]

7.2.3 Ingresos

Corresponden a los indicados en la Sección 4.2.3. Debe notarse que los ingresos asociados a tratamiento de residuos y emisión de CER's son válidos para las 388,6 toneladas diarias procesadas en el gasificador.

Para determinar la emisión de CER's para la central en esta configuración, se ha utilizado el procedimiento mostrado en el Anexo A, obteniéndose los resultados de la Tabla 7.8 y la Tabla 7.9.

Los ingresos correspondientes a la venta de material reciclaje se han obtenido utilizando los datos de la Tabla 3.5. Los ingresos diarios debido a venta de material reciclaje se pueden ver en la Tabla 7.7.

7.2.4 Flujo de caja, VAN y TIR

- El flujo de caja para la central sin fabricación de la lana mineral puede verse en la Tabla E.5 (Anexo E). Para este caso el VAN tiene un valor de -56 MM USD y la TIR un valor de 1,0%. La recuperación de la inversión ocurre al veintidosavo año de operación.
- El flujo de caja para la central con fabricación de la lana mineral puede verse en la Tabla E.6 (Anexo E). Para este caso el VAN tiene un valor de -18 MM USD y la TIR un valor de 7,7%. La recuperación de la inversión ocurre al doceavo año de operación.

Tabla 7.7: Ingresos diarios asociados a la venta de material reciclable.

Material	Contenido en RSM [%]	% Eficiencia de recuperación	% Recuperado	Recuperado [ton/día]	Precio de venta [USD/ton]	Ingresos diarios [USD]
PET	1,2	80	1,0	9,6	403	3.867
HDPE	0,5	90	0,5	4,5	134	604
LDPE	4,3	30	1,3	12,9	101	1.299
Metales	0,4	90	0,4	3,6	117	423
Papel	2,7	50	1,4	13,5	50	680
Cartón	2,7	50	1,4	13,5	77	1.042
Vidrio	3,3	20	0,7	6,6	47	310
Tetrapack	0,7	80	0,6	5,6	3	19
Total	15,80		6,98	69,80		8.244

Tabla 7.8: CER's emitidos. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.

Año	BE _y [tCO ₂ e]	PE _y [tCO ₂ e]	LE _y [tCO ₂ e]	ER _y [tCO ₂ e]
1	88.461	54.134	0	34.328
2	98.163	54.134	0	44.029
3	106.592	54.134	0	52.458
4	113.945	54.134	0	59.811
5	120.383	54.134	0	66.249
6	126.045	54.134	0	71.911
7	131.045	54.134	0	76.911
8	134.326	54.134	0	80.193
9	138.274	54.134	0	84.140
10	141.805	54.134	0	87.671
11	144.975	54.134	0	90.841
12	147.833	54.134	0	93.700
13	150.421	54.134	0	96.287
14	152.772	54.134	0	98.638
15	154.916	54.134	0	100.782
16	156.878	54.134	0	102.745
17	158.680	54.134	0	104.546
18	160.339	54.134	0	106.205
19	161.871	54.134	0	107.737
20	163.290	54.134	0	109.156
21	164.608	54.134	0	110.474

Tabla 7.9: CER's emitidos. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

Año	BE_y [tCO₂e]	PE_y [tCO₂e]	LE_y [tCO₂e]	ER_y [tCO₂e]
1	86.032	54.134	0	31.899
2	95.734	54.134	0	41.600
3	104.163	54.134	0	50.029
4	111.516	54.134	0	57.382
5	117.954	54.134	0	63.820
6	123.616	54.134	0	69.482
7	128.616	54.134	0	74.482
8	131.934	54.134	0	77.800
9	135.881	54.134	0	81.748
10	139.412	54.134	0	85.278
11	142.582	54.134	0	88.448
12	145.441	54.134	0	91.307
13	148.028	54.134	0	93.894
14	150.379	54.134	0	96.245
15	152.523	54.134	0	98.390
16	154.486	54.134	0	100.352
17	156.287	54.134	0	102.153
18	157.946	54.134	0	103.812
19	159.478	54.134	0	105.345
20	160.897	54.134	0	106.764
21	162.215	54.134	0	108.081
Total	2.865.121	1.136.811	0	1.728.309

7.2.5 Análisis de sensibilidad

Sin fabricación de lana mineral

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN y de la TIR para la variación del precio del procesado de residuos (Figura 7.3) y para la variación del precio del vitrificado sin tratar (Figura 7.4). No existe ningún costo del bloque de gasificación que permita rentabilidad, por lo que no se hará un análisis de sensibilidad de este parámetro.

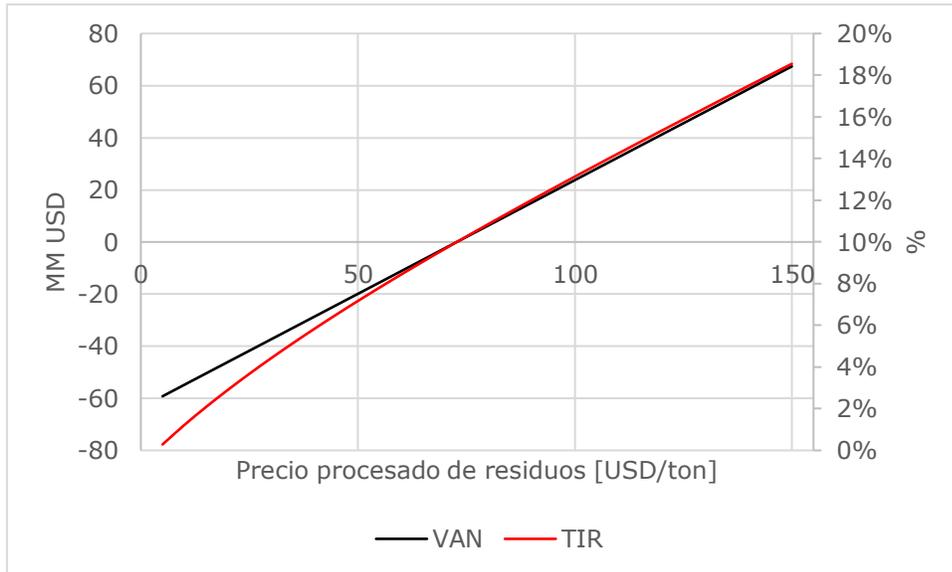


Figura 7.3: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.

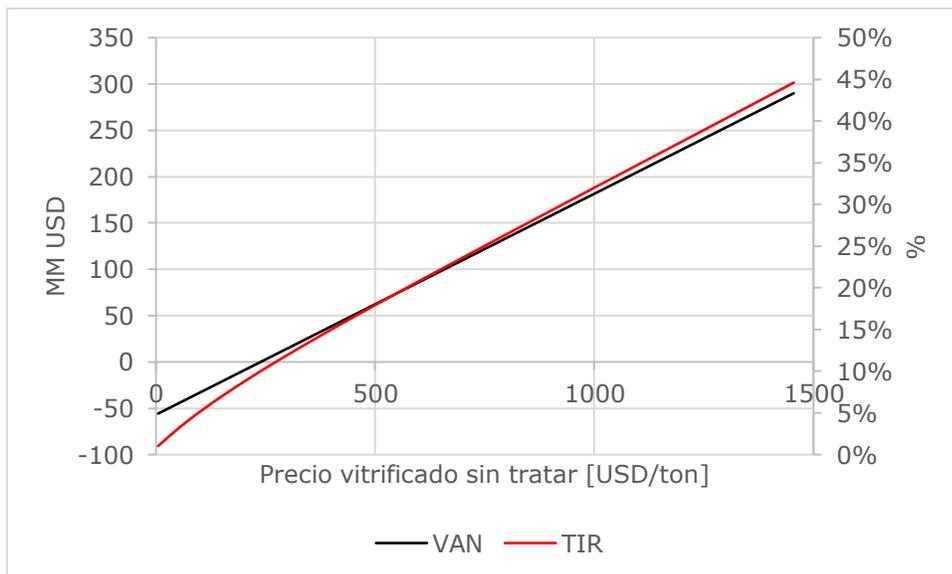


Figura 7.4: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del vitrificado sin tratar. Configuración utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.

Con fabricación de lana mineral

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN y de la TIR para la variación del precio del procesado de residuos (Figura 7.5), para la variación del precio de la lana mineral (Figura 7.6), para la variación de las toneladas de lana mineral producidas por año (Figura 7.7) y para la variación del costo del bloque de gasificación (Figura 7.8)

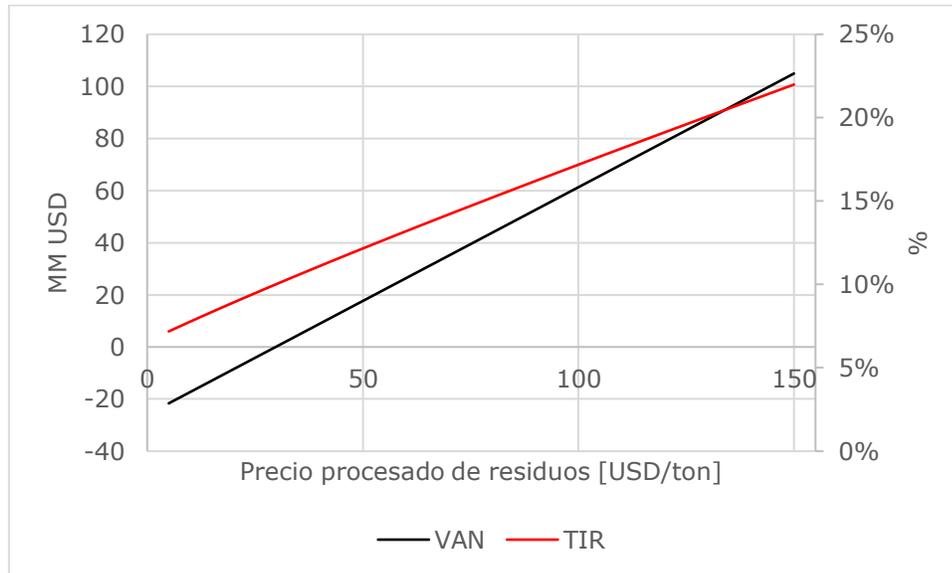


Figura 7.5: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio del procesado de residuos. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

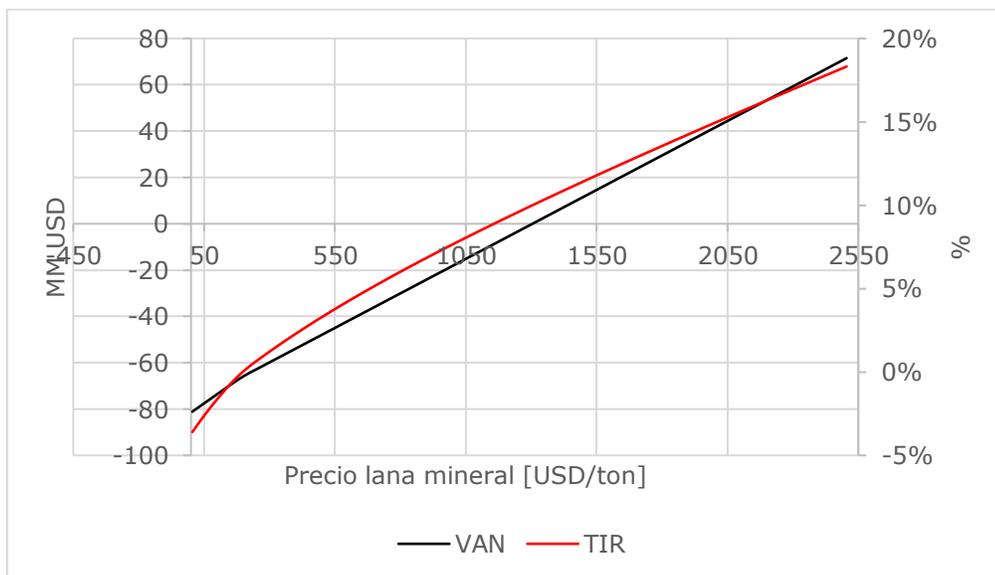


Figura 7.6: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el precio de la lana mineral. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

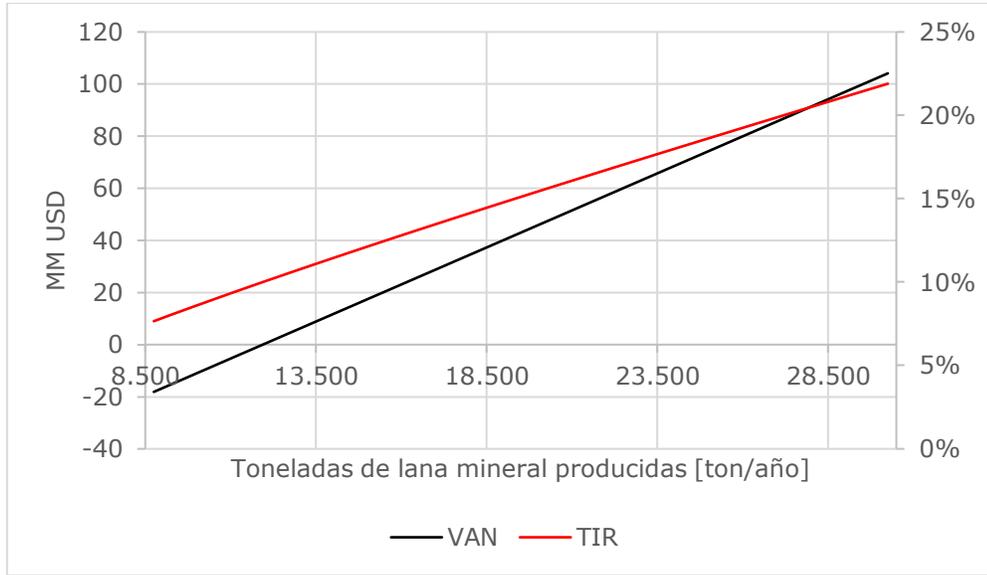


Figura 7.7: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con las toneladas de lana mineral producidas por año. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

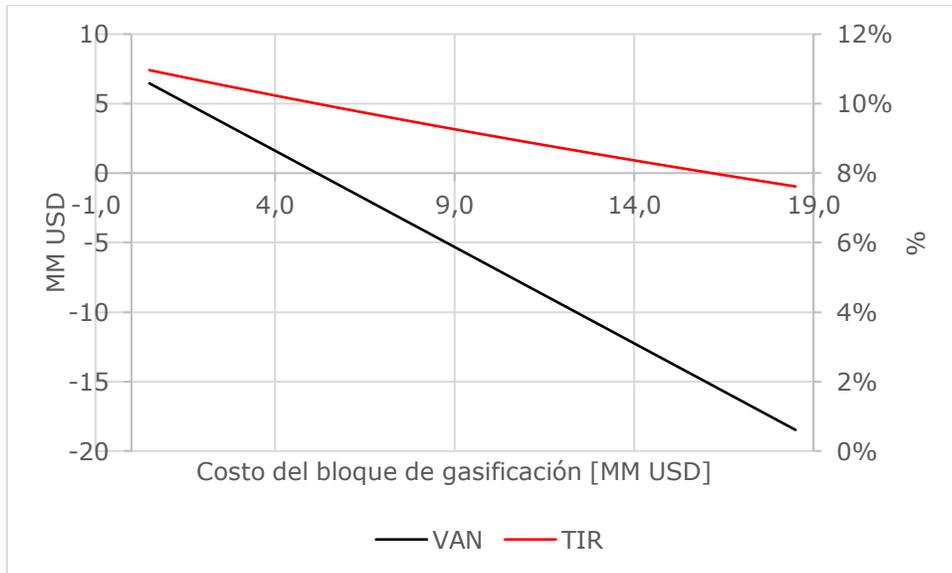


Figura 7.8: Análisis de sensibilidad, variación del VAN y de la TIR con el costo del bloque de gasificación. Configuración utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

8 Discusiones

8.1 Discusión de central utilizando residuos sólidos municipales "como son recibidos" (RSM ar)

La central utilizando RSM ar corresponde a la configuración estudiada que presenta peor rendimiento neto y desempeño económico. El alto contenido de humedad de los residuos sólidos municipales (RSM) producidos en la Región Metropolitana, -cercano al 50% del contenido en peso-, tiene un impacto significativo en el aumento del consumo eléctrico de las antorchas de plasma, alcanzando una potencia requerida de 45,24 MWe. De hecho, para esta configuración la central no es capaz de producir electricidad, teniendo incluso un déficit de energía que debe ser comprado al Sistema Interconectado Central (SIC). De esta forma, además de perder los ingresos asociados a una central de generación de energías renovables no convencionales (ERNC), se pierde también la oportunidad de recibir ingresos por venta de reducciones certificadas de emisiones (CER's) debido a que el proyecto en esta configuración no es adicional, es decir, no disminuye efectivamente las emisiones existentes en ausencia del proyecto.

Para la central utilizando RSM ar sin fabricación de lana mineral, se tiene que para el caso base se producen pérdidas en todos los años de operación. El análisis de sensibilidad muestra que se requeriría un precio de al menos 107 USD por tonelada de residuos tratados o bien un precio de venta del vitrificado sin tratar de al menos 764 USD por tonelada para hacer rentable el proyecto en dicha configuración. No existe ningún costo del bloque de gasificación que permita rentabilidad, por lo que no se evaluó el impacto del costo de éste.

El precio por tonelada de residuos tratados difícilmente podría superar los 100 USD en el corto plazo, teniendo en cuenta que actualmente el precio promedio es de 9 USD por tonelada y no se han desarrollado estímulos a nivel gubernamental para desincentivar el uso de rellenos sanitarios. De todas formas es importante recordar que en países desarrollados como USA y algunos de la Unión Europea, el valor por disposición en rellenos sanitarios fluctúa entre los 44 USD y 175 USD por tonelada, lo cual podría hacer viable un proyecto con las condiciones presentadas en esta configuración.

Respecto del precio del vitrificado sin tratamiento, difícilmente podría superar los 10 USD, dada las condiciones de actuales de mercado.

Para la central utilizando RSM ar con fabricación de lana mineral, se tiene que para el caso base también se producen pérdidas en todos los años de operación. El análisis de sensibilidad muestra que se requeriría un precio de al menos 91 USD por tonelada de residuos tratados, o bien un precio de venta de lana mineral de al menos 4.087 USD por tonelada para hacer rentable el proyecto en dicha configuración. No existe ningún costo del bloque de gasificación ni una cantidad de lana mineral producida que permita rentabilidad para el caso base, por lo que no se evaluó el impacto de estos parámetros.

Utilizando el mismo análisis que para el caso sin fabricación de lana mineral, si bien el precio por tonelada de residuos tratados que hace rentable el proyecto es menor, sigue siendo un valor elevado dadas las condiciones de mercado actuales.

El precio de venta de lana mineral de 4.087 USD por tonelada, es posible debido a que su valor de venta fluctúa entre los 2.000 USD y 5.000 USD, sin embargo, en este caso los ingresos debido a venta de lana mineral corresponderían a aproximadamente el 92% de los ingresos totales de la central, lo que la hace altamente dependiente del mercado de la lana mineral.

8.2 Discusión de central utilizando residuos sólidos municipales secados parcialmente (RSM %dry)

La central utilizando residuos sólidos municipales secados a un 17,81% mediante la utilización de los gases de combustión que salen de la caldera *heat recovery steam generator* (HRSG) es capaz de exportar electricidad, debido a que en esta configuración la potencia requerida por las antorchas de plasma se reduce a 19,66 MWe, valor inferior a la mitad de la potencia requerida para el caso de los RSM "como son recibidos". La potencia y rendimiento neto de la central sin fabricación de lana mineral es de 20,52 MWe y 20,31% respectivamente. Con fabricación de lana mineral la potencia y rendimiento neto es de 20,10 MWe y 19,90% respectivamente. De esta forma la central percibe ingresos asociados a una generadora ERNC y es capaz también de percibir ingresos por venta de CER's, debido a que el proyecto es adicional.

Para la central sin fabricación de lana mineral, se tiene que para el caso base se producen ganancias a partir del primer año de operación, pero no son suficientes para hacer el proyecto rentable, para una tasa de descuento del 10%. El análisis de sensibilidad muestra que se requeriría un precio de al menos 58 USD por tonelada de residuos tratados o bien un precio de venta de vitrificado sin tratar de al menos 382 USD por tonelada para hacer rentable la central en esta configuración. Para dicha configuración además, no existe un costo del bloque de gasificación que permita la rentabilidad del caso base.

Utilizando el mismo análisis que en la Sección 8.1 para el caso sin fabricación de lana mineral, se tiene que el precio por tonelada de residuo tratado y el precio de venta de vitrificado sin tratar que logran la rentabilidad de la central para esta configuración son difícilmente alcanzables dadas las condiciones de mercado actuales.

Para la central con fabricación de lana mineral, se tiene que para el caso base también se producen ganancias a partir del primer año de operación, pero no son suficientes para hacer el proyecto rentable, para una tasa de descuento del 10%. El análisis de sensibilidad muestra que se requeriría un precio de al menos 42 USD por tonelada de residuos tratados, o bien un precio de venta de lana mineral de al menos 2.230 USD por tonelada, o bien una producción anual de al menos 21.634 toneladas de lana mineral para hacer rentable el proyecto en dicha configuración. No existe ningún costo del bloque de gasificación que permita rentabilidad para el caso base, por lo que no se evaluó el impacto de este parámetro.

Utilizando el mismo análisis que en la Sección 8.1 para el caso con fabricación de lana mineral, si bien el precio por tonelada de residuos tratados que hace rentable el proyecto es menor, sigue siendo un valor elevado dadas las condiciones de mercado actuales.

El precio de venta de lana mineral de 2.230 USD por tonelada, es perfectamente posible debido a que su valor de venta fluctúa entre los 2.000 USD y 5.000 USD, sin embargo, en este caso los ingresos debido a venta de lana mineral corresponderían a aproximadamente el 57% de los ingresos totales de la central, por lo que esta sigue siendo altamente dependiente del mercado de la lana mineral. Respecto del aumento de producción de lana mineral a 21.634 toneladas anuales, parece difícil alcanzar dicho nivel de venta, pues correspondería a aproximadamente un 62% del total transado actualmente en el mercado nacional de lana aislante, cuyo valor es de 35.000 toneladas anuales aproximadamente. Los ingresos debidos a venta de lana mineral corresponderían en este caso a aproximadamente un 60% de los ingresos totales de la central.

8.3 Discusión de central utilizando residuos seleccionados (RDF)

La clasificación de las 1000 toneladas diarias de RSM recibidos, permite que los residuos seleccionados que entran al gasificador, correspondiente a 388 toneladas diarias aproximadamente, tengan una humedad de 13,17%. De esta forma, la potencia requerida por las antorchas de plasma es de 9,14 MWe. La potencia y rendimiento neto de la central sin fabricación de lana mineral es de 13,04 MWe y 22,86% respectivamente. Con fabricación de lana mineral la potencia y rendimiento neto es de 12,63 MWe y 22,13% respectivamente. Así la central percibe ingresos asociados a una generadora ERNC y es capaz también de percibir ingresos por venta de CER's debido a que el proyecto es adicional.

Para la central sin fabricación de lana mineral, se tiene que para el caso base se producen ganancias a partir del primer año de operación, pero no son suficientes para hacer el proyecto rentable, para una tasa de descuento del 10%. El análisis de sensibilidad muestra que se requeriría un precio de al menos 73 USD por tonelada de residuos tratados, o bien un precio de venta de vitrificado sin tratar de al menos 239 USD por tonelada para hacer rentable la central en esta configuración. Para dicha configuración además, no existe un costo del bloque de gasificación que permita la rentabilidad del caso base.

Utilizando el mismo análisis que en las secciones anteriores, se tiene que el precio por tonelada de residuo tratado y el precio de venta de vitrificado sin tratar que logran la rentabilidad de la central para esta configuración son difícilmente alcanzables dadas las condiciones de mercado actuales.

Para la central con fabricación de lana mineral, se tiene que para el caso base también se producen ganancias a partir del primer año de operación, pero no son suficientes para hacer el proyecto rentable, para una tasa de descuento del 10%.

Corresponde a la configuración estudiada con mejor desempeño económico, con un VAN aproximado de -18 MM USD y una TIR de 7,7%, para una inversión aproximada de 104 MM USD. El análisis de sensibilidad muestra que se requeriría un precio de al menos 30 USD por tonelada de residuos tratados, o bien un precio de venta de lana mineral de al menos 1.305 USD por tonelada, o bien una producción anual de al menos 11.942 toneladas de lana mineral, o bien un costo del bloque de gasificación de a lo más 5,1 MM USD para hacer rentable el proyecto en dicha configuración.

Utilizando el mismo análisis que en las secciones anteriores, se tiene que el precio por tonelada de residuos tratados que hace rentable el proyecto es el menor de todas las configuraciones, pero sigue siendo un valor elevado dadas las condiciones de mercado actuales.

El precio de venta de lana mineral de 1.305 USD por tonelada, es perfectamente posible debido a que su valor de venta fluctúa entre los 2.000 USD y 5.000 USD, sin embargo, en este caso los ingresos debido a venta de lana mineral corresponderían a aproximadamente el 50% de los ingresos totales de la central, por lo que esta sigue siendo altamente dependiente del mercado de la lana mineral. Respecto del aumento de producción de lana mineral a 11.942 toneladas anuales, si bien es sustancialmente menor que para la configuración utilizando RSM secados con fabricación de lana mineral, sigue siendo una cifra significativa, pues correspondería a aproximadamente un 34% del total transado actualmente en el mercado nacional de lana aislante, cuyo valor es de 35.000 toneladas anuales aproximadamente. Los ingresos debido a venta de lana mineral corresponderían en este caso a aproximadamente un 52% de los ingresos totales de la central.

Finalmente en referencia al costo del bloque de gasificación que permite rentabilidad respecto del caso base para esta configuración, parece improbable que el costo sea como máximo 5,1 MM USD, dada la información mostrada en la Sección 4.2.1.

9 Conclusiones

A partir de los análisis realizados y los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que:

- Respecto de la central utilizando residuos sólidos municipales como son recibidos, se concluye que para el caso base sin fabricación de lana mineral, las condiciones actuales de mercado no permiten ingresos suficientes para lograr la rentabilidad de central. Para el caso base con fabricación de lana mineral la central tampoco es rentable, sin embargo, lo es para un precio de venta de la lana mineral de al menos 4.087 USD por tonelada, valor posible dado el rango de precios de la lana mineral. De todas formas, en dicho caso, los ingresos debido a venta de lana mineral corresponden a aproximadamente un 92% de los ingresos totales de la central.
- Respecto de la central utilizando residuos sólidos municipales secados parcialmente, se concluye que para el caso sin fabricación de lana mineral, las condiciones actuales de mercado no permiten ingresos suficientes para lograr la rentabilidad de central. Para el caso base con fabricación de lana mineral la central tampoco es rentable, sin embargo, lo es para un precio de venta de lana mineral de al menos 2.230 USD por tonelada, valor posible dado el rango de precios de la lana mineral. La central también es rentable para una producción de lana mineral de al menos 21.634 toneladas anuales, valor equivalente a aproximadamente un 62% del mercado nacional de lana aislante. Para dichos casos los ingresos debido a venta de lana mineral corresponden a aproximadamente un 57% y 60% respectivamente, de los ingresos totales de la central.
- Respecto de la central utilizando residuos seleccionados, se concluye que para el caso sin fabricación de lana mineral, las condiciones actuales de mercado no permiten ingresos suficientes para lograr la rentabilidad de central. Para el caso base con fabricación de lana mineral la central tampoco es rentable, sin embargo, lo es para un precio de venta de lana mineral de al menos 1.305 USD por tonelada, valor posible dado el rango de precios de la lana mineral. La central también es rentable para una producción de lana mineral de al menos 11.942 toneladas anuales, valor equivalente a aproximadamente un 34% del mercado nacional de lana aislante. Para dichos casos los ingresos debido a venta de lana mineral corresponden a aproximadamente un 50% y 52% respectivamente, de los ingresos totales de la central.
- Se concluye que el impacto de la humedad de los residuos a tratar juega un rol fundamental en la generación eléctrica y rendimiento neto de la central, por lo que utilizar residuos sólidos sin tratar es inconveniente dada su alta humedad característica.
- Para las configuraciones sin fabricación de lana mineral se concluye que las condiciones actuales de mercado no permiten rentabilidad, dado que se requiere un precio de tratamiento de residuos, -análogo a precio por disposición en relleno sanitario-, más elevado, similar al que actualmente presentan países desarrollados como USA y algunos pertenecientes a la Unión Europea.
- Se concluye que dadas las condiciones actuales del mercado, es fundamental el tratamiento del vitrificado para aumentar su valor comercial. Dicha fuente de ingreso puede permitir rentabilidad, aunque generando una dependencia importante del mercado de la lana aislante, aumentando el riesgo de la central.

Finalmente es importante destacar que una central de este tipo tiene ventajas medioambientales importantes que no se ven reflejadas en una evaluación económica, como son una menor cantidad de emisiones contaminantes, valorización completa de los residuos sólidos municipales y un menor uso de rellenos sanitarios.

Glosario y subíndices

Glosario

AC	Del inglés <i>alternating current</i> o corriente alterna en español
CCP	Del inglés <i>capacitive coupled plasma</i> o plasma de acoplamiento capacitivo en español
CDEC	Centro de Despacho Económico de Carga
CER	Del inglés <i>certified emission reductions</i> o reducción certificada de emisiones es español
CGE	Del inglés <i>cold gas efficiency</i> o eficiencia de gas frío en español
CMP	Del inglés <i>Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol</i> o Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el Protocolo de Kyoto en español
CNE	Comisión Nacional de Energía
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
COP	Del inglés <i>Conference of the Parties</i> o Conferencia de las Partes en español
CSP	Del inglés <i>concentrated solar power</i> o poder solar concentrado es español
D.S.	Decreto Supremo
DBD	Del inglés <i>dielectric barrier discharge</i> o descarga de barrera dieléctrica en español
DC	Del inglés <i>direct current</i> o corriente directa en español
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
ERNC	Energía renovable no convencional
ET	Estación de transferencia
ETCLC	Estación de Transferencia Cerro Los Cóndores
ETPS	Estación de Transferencia Puerta Sur
ETQ	Estación de Transferencia Quilicura
GEI	Gases de efecto invernadero
HDPE	Del inglés <i>high density polyethylene</i> o polietileno de alta densidad en español
HHV	Del inglés <i>higher heating value</i> o poder calorífico superior en español

HRSG	Del inglés <i>heat recovery steam generator</i> o caldera recuperadora de calor en español
IC	Implementación Conjunta
ICP	Del inglés <i>inductively coupled plasma</i> o plasma de acoplamiento inductivo en español
IGCC	Del inglés <i>integrated gasification combined cycle</i> o ciclo combinado con gasificación integrada en español
LDPE	Del inglés <i>low density polyethylene</i> o polietileno de baja densidad en español
LER	Listado europeo de residuos
LGSE	Ley General de Servicios Eléctricos
LGUC	Ley General de Urbanismo y Construcciones
LHV	Del inglés <i>lower heating value</i> o poder calorífico inferior en español
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MIG	Del inglés <i>metal inert gas</i> o gas inerte metal en español
MSW	Del inglés <i>municipal solid waste</i> o residuos sólidos municipales en español
NCFM	Del inglés <i>normal cubic feet per minute</i> o pies cúbicos normales por minuto en español
O&M	Operación y mantenimiento
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OGUC	Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones
PDD	Del inglés <i>Project Design Document</i> o Documento de Diseño del Proyecto en español
PET	Del inglés <i>polyethylene terephthalate</i> o tereftalato de polietileno en español
PIB	Producto interno bruto
PK	Protocolo de Kyoto
PV	Del inglés <i>photovoltaic</i> o fotovoltaico es español
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
RDF	Del inglés <i>refuse derived fuel</i> o combustible derivado de residuos en español

RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
RF	Radio frecuencia
RM	Región Metropolitana
RSCLL	Relleno Sanitario Cerros La Leona
RSLLC	Relleno Sanitario Loma Los Colorados
RSM	Residuos sólidos municipales
RSSM	Relleno Sanitario Santa Marta
RSSP	Relleno Sanitario Santiago Poniente
Rx	Reacción o reacciones
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SIC	Sistema Interconectado Central
SIDREP	Sistema de Declaración y Seguimiento de Residuos Peligrosos
SINADER	Sistema Nacional de Declaración de Residuos
SING	Sistema Interconectado del Norte Grande
TIG	Del inglés <i>tungsten inert gas</i> o gas inerte tungsteno en español
TIR	Tasa interna de retorno
UNFCCC	Del inglés <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> o Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en español
VAN	Valor actual neto
VCP	Vertedero Controlado de Popeta

Subíndices

%dry	Seco a cierto porcentaje
ap	"Como es producido", del inglés <i>as produced</i>
ar	"Como son recibidos", del inglés <i>as received</i>
daf	Seco y libre de ceniza, del inglés <i>dry ash free</i>
dry	Seco en inglés
waf	Húmedo y libre de ceniza, del inglés <i>wet ash free</i>

Bibliografía

- [1] E. Sauma, «Regulación del mercado eléctrico en Chile,» 6 Julio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.claseejecutiva.cl/2013/07/regulacion-del-mercado-electrico-en-chile/>. [Último acceso: 6 noviembre 2015].
- [2] CDEC-SING, «Anuario y Estadísticas de Operación 2014,» 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.cdec-sing.cl/html_docs/anuario2014/esp/files/assets/common/downloads/CDEC%20SING%202014.pdf. [Último acceso: 17 noviembre 2015].
- [3] Ministerio de Energía, «Sistema Eléctrico Nacional,» 2009. [En línea]. Disponible en: http://antiguo.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/05_Public_Estudios/descargas/estudios/demoscopica_resumen.pdf. [Último acceso: 22 noviembre 2015].
- [4] CDEC-SIC, «Reporte Anual 2014,» 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdec-sic.cl/wp-content/uploads/2014/07/Reporte-anual-CDECSIC-2014.pdf>. [Último acceso: 17 noviembre 2015].
- [5] CDEC-SIC, «CIFRAS ANUALES CDEC - Año 2014,» 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdec-sic.cl/wp-content/uploads/2015/01/Cifras-Anuales-CDECSIC-2014-v2.pdf>. [Último acceso: 15 junio 2016].
- [6] Systep Ingeniería, «Reporte Mensual de Sector Eléctrico,» Octubre de 2015. [En línea]. Disponible en: http://systep.cl/documents/reportes/102015_Systep_Reporte_Sector_Electrico.pdf. [Último acceso: 17 noviembre 2015].
- [7] EDELAYSEN, «Reporte Anual 2014,» 2015. [En línea]. Disponible en: http://portal.saesa.cl:7778/pls/portal/docs/PAGE/PG_WEBSAESA_2012/PAG_WEB_V2_MEMORIAS/PAG_WEB_V2_MEMORIAS_SUB/MEMORIA%20EDELAYSEN%202014VF.PDF. [Último acceso: 18 noviembre 2015].
- [8] EDELMAG, «Memoria Anual 2014,» 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.edelmag.cl/wp-content/uploads/descargables/memorias/Memoria%20Edelmag%202014.pdf>. [Último acceso: 18 noviembre 2015].
- [9] Brian A. Nummer, «Historical Origins of Food Preservation,» Mayo 2001. [En línea]. Disponible en: http://nchfp.uga.edu/publications/nchfp/factsheets/food_pres_hist.html. [Último acceso: 22 noviembre 2015].
- [10] A. Lucas, Wind, Water, Work: Ancient and Medieval Milling Technology, Brill Publishers, 2006.
- [11] J. Roldán, Energías renovables. Lo que hay que saber, Madrid: Paraninfo, 2013.
- [12] SAAM Servicios a la Industria Hidrobiológica Limitada, «Sustentabilidad e innovación para enfrentar el cambio climático,» 2009. [En línea]. Disponible en: http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/3460/09MTEC-5204_ID.pdf?sequence=1. [Último acceso: 24 noviembre 2015].
- [13] CIFES, Ministerio de Energía, «Reporte ERNC Resumen 2014,» 2015. [En línea]. Disponible en: http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Reportes/CIFES%20-%20ERNC/2014/13_Resumen2014-ReporteERNC.pdf. [Último acceso: 17 noviembre 2015].
- [14] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, *Ley N° 20.920: ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE*, 2016.
- [15] Ministerio del Medio Ambiente, «Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER),» 2011. [En línea]. Disponible en: www.mma.gob.cl/retc/1279/articles-50956_recurso_4.ppt. [Último acceso: 20 enero 2016].

- [16] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE, «PRIMER REPORTE DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN CHILE,» 2010. [En línea]. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf. [Último acceso: 13 octubre 2015].
- [17] SEREMI RM, Ministerio del Medio Ambiente, «Gestión y Valorización de Residuos Sólidos en la Región Metropolitana,» 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.santiagorecicla.cl/wp-content/uploads/2015/03/Informe-gestion-RM-2012.pdf>. [Último acceso: 24 noviembre 2015].
- [18] SEREMI RM, Ministerio del Medio Ambiente, «REPORTE SOBRE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS 2014 EN LA REGIÓN METROPOLITANA,» 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.santiagorecicla.cl/wp-content/uploads/2015/03/Informe-gestion-RM-2014.pdf>. [Último acceso: 01 febrero 2016].
- [19] Secretaría Ejecutiva de Residuos Sólidos – Región de Valparaíso, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Domiciliarios: Estrategia Corto Plazo: 2011-2014,» 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.ramos.utfsm.cl/doc/1425/sc/Informe_RSD_SER_detallado.pdf. [Último acceso: 15 junio 2016].
- [20] Municipalidad de Vitacura, «Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos,» 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.vitacura.cl/resources/descargas/pdf/la_municipalidad/ordenanzas/PLAN_DE_GESTION_INTEGRAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_DE_LA_COMUNA_DE_VITACURA_.pdf. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [21] Municipalidad de Providencia, «Costo Tarifado 2015,» 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.providencia.cl/propuesta-tarifas-aseo-2015/item/download/103_a585512659a3108c56cd3966e25ac714. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [22] Municipalidad de Recoleta, «TARIFA DE ASEO 2015: Resumen determinación de tarifa,» 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.recoletatransparente.cl/archivos_2014/actos_y_resoluciones/RESUMEN%20TARIFA%20DE%20ASEO%202015.pdf. [Último acceso: 16 junio 2016].
- [23] Forfás, «Waste Management Benchmarking Study,» 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.envirocentre.ie/includes/documents/ForfasWMBenchmarkingstudy.pdf>. [Último acceso: 17 junio 2016].
- [24] Prensa presidencia, «Presidenta Bachelet promulga Ley de Fomento al Reciclaje y de Responsabilidad Extendida del Productor,» 17 mayo 2016. [En línea]. Disponible en: <https://prensa.presidencia.cl/comunicado.aspx?id=33193>.
- [25] KDM S.A, «KDM Tratamiento Servicios,» [En línea]. Disponible en: <http://www.kdm.cl/tratamiento/reciclaje-de-residuos.html>. [Último acceso: 22 mayo 2016].
- [26] Sergio García (KDM), «Planta reciclaje relleno sanitario "Lomas Los Colorados",» 2012. [En línea]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/emprendoverde/reciclaje-kdm-lomas-del-colorado-santiago-de-chile>. [Último acceso: 9 junio 2016].
- [27] CONAMA RM, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, «ESTUDIO CARACTERIZACION DE RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARIOS EN LA REGION METROPOLITANA,» 28 marzo 2006. [En línea]. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-39508_pdf_informeF.pdf. [Último acceso: 24 mayo 2016].
- [28] Mountouris, A; Voutsas, E; Tassios, D, «Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis,» *Energy Conversion and Management*, vol. 47, nº 13, pp. 1723--1737, 2006.
- [29] Johari, Anwar; Hashim, Haslenda; Mat, Ramli; Alias, H; Hassim, M; Rozzainee, M, «Generalization, formulation and heat contents of simulated MSW with high moisture

- content,» *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 7, nº 6, pp. 701--710, 2012.
- [30] D. LIMIRO, *Créditos de Carbono-Protocolo de Kyoto e Projetos de MDL*, Jurua Editora, 2009.
- [31] Carbon Market Watch, «Manual del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) "Un recurso para ciudadanos, activistas y ONGs",» 2010. [En línea]. Disponible en: http://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2012/03/CDM-Toolkit_Espanol.pdf. [Último acceso: 15 abril 2015].
- [32] N. P. Cheremisinoff, *Pollution Control Handbook for Oil and Gas Engineering*, John Wiley & Sons, 2016.
- [33] Higman, Christopher; Van der Burgt, Maarten, *Gasification*, 2 ed., Gulf professional publishing, 2008.
- [34] J. A. Bittencourt, *Fundamentals of Plasma Physics*, 3 ed., Springer Science & Business Media, 2004.
- [35] T. Matsumoto, D. Wang, T. Namihira y H. Akiyama, *Air Pollution - A Comprehensive Perspective*, B. Haryanto, Ed., InTech, 2012.
- [36] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, 3rd ed., Springer, 2015.
- [37] Y. Byun, J. Chung, M. Cho y S.-M. Hwang, *Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW)*, INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [38] Gomez, E; Rani, D Amutha; Cheeseman, CR; Deegan, D; Wise, M; Boccaccini, AR, «Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, nº 2, pp. 614--626, 2009.
- [39] Leal-Quirós, Edbertho, «Plasma processing of municipal solid waste,» *Brazilian Journal of Physics*, vol. 34, nº 48, pp. 1587--1593, 2004.
- [40] S. Achinas y E. Kapetanios, «Efficiency Evaluation of RDF Plasma Gasification Process,» *Energy and Environment Research*, vol. 3, nº 1, p. 150, 2013.
- [41] M. I. Boulos, P. Fauchais y E. Pfender, *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*, 1, Ed., Springer US, 1994.
- [42] Valmundsson, Arnar S; Janajreh, Isam, «Plasma gasification process modeling and energy recovery from solid waste,» *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, pp. 361--368, 2011.
- [43] Arena, Umberto, «Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,» *Waste management*, vol. 32, nº 4, pp. 625--639, 2012.
- [44] Environment Agency, «Permit EPR/XP3336NN,» 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/311022/Decision_Document.pdf. [Último acceso: 07 octubre 2015].
- [45] Westinghouse Plasma Corporation, «Westinghouse Plasma Gasification – Industrial Scale Syngas Production from Waste Products,» 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.gasification-syngas.org/uploads/eventLibrary/2013-2-3-Howard-Alter-NRG-Westinghouse.pdf>. [Último acceso: 27 abril 2016].
- [46] Westinghouse Plasma Corporation, «WESTINGHOUSE PLASMA TORCH SYSTEMS,» 07 octubre 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC-Plasma-Torches_Public.pdf.
- [47] Waste Management World, «Air Products to Ditch Plasma Gasification Waste to Energy Plants in Teesside,» 5 abril 2016. [En línea]. Disponible en: <https://waste-management-world.com/a/air-products-to-ditch-plasma-gasification-waste-to-energy-plants-in-teesside>. [Último acceso: 14 mayo 2016].
- [48] Basu, Prabir, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, Academic press, 2010.

- [49] Tassios, Dimitrios, *Applied chemical engineering thermodynamics*, Springer, 2013.
- [50] Yaws, Carl L, *Chemical Properties Handbook*, McGraw-Hill, 1999.
- [51] Mountouris, A; Voutsas, E; Tassios, D, «Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization,» *Energy Conversion and Management*, vol. 49, nº 8, pp. 2264--2271, 2008.
- [52] Li, Hanning; Chen, Qun; Zhang, Xiaohui; Finney, Karen N; Sharifi, Vida N; Swithenbank, Jim, «Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 35, pp. 71--80, 2012.
- [53] V. Poloczek y H. Hermsmeyer, «Modern Gas Turbines with High Fuel Flexibility,» 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/gas-turbines-power-plants/ModernGasTurbineswithHighFuelFlexibility.pdf>. [Último acceso: 28 junio 2016].
- [54] Westinghouse Plasma Corporation, «Plasma Torches by Westinghouse Plasma Corporation,» 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2012/11/WPC-Plasma-Torches-Eng-Email-Feb-2012.pdf>. [Último acceso: 28 abril 2016].
- [55] Willis, Ken P; Osada, Shinichi; Willerton, Kevin L, «Plasma gasification: lessons learned at Eco-Valley WTE facility,» *18th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, pp. 133--140, 2010.
- [56] Beumer Group, «Conveying vs Trucking Economics For Medium Sized Applications,» 2014. [En línea]. Disponible en: https://www.beumergroup.com/uploads/tx_bbbrochures/WP_Conveying_vs_Trucking_Economics_For_Medium_Sized_Applications.pdf. [Último acceso: 14 julio 2016].
- [57] Woodruff, KL; Bales, EP, «Preprocessing of Municipal Solid Waste for Resource Recovery with a Trommel—Update 1977,» de *Proceedings of the 1977 National Waste Processing Conference*, 1978, pp. 249--257.
- [58] Dr Hanning Li, Dr K Finney, «EPSRC Thermal Management of : A Review of Drying Technologies,» febrero 2010. [En línea]. Disponible en: http://research.ncl.ac.uk/protem/components/pdfs/EPSRC_Thermal_Management_Sheffield_Drying_tech_Feb_2010.pdf. [Último acceso: 05 julio 2016].
- [59] *Resolución Exenta Nº 706 Santiago, 1 de Septiembre de 2008*.
- [60] Financial Times, «Teesside investor drops £300m renewables project,» 5 abril 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ft.com/cms/s/226c0e34-fb47-11e5-8f41-df5bda8beb40.html>. [Último acceso: 14 mayo 2016].
- [61] *Comunicación privada con representante de Plazarium*, 2016.
- [62] Digital Journal, «Alter NRG announces USD\$1.0 million torch order sale of Westinghouse Plasma torches for industrial furnace applications in China,» 7 enero 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.digitaljournal.com/pr/1000094#ixzz2IFOFZ5Q8>. [Último acceso: 14 mayo 2016].
- [63] MacMurray D. Whale, «One Man's Trash Is Another's... Fuel,» 15 julio 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2014/07/July-15-2014-Alter-NRG-Initiation-Report_Cormark.pdf. [Último acceso: 14 mayo 2016].
- [64] Renewable energy technology, «Alter NRG provides tech for 15MW waste-to-energy plant in China,» 26 febrero 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.renewable-energy-technology.net/geothermal-bioenergy-news/alter-nrg-provides-tech-15mw-waste-energy-plant-china>. [Último acceso: 14 mayo 2016].
- [65] Clark, Bruce J; Rogoff, Marc J, «Economic feasibility of a plasma arc gasification plant, city of Marion, Iowa,» *18th Annual North American Waste-to-Energy Conference*, pp. 121--130, 2010.

Anexos

Anexo A: Estimación de la reducción de emisiones, configuración usando residuos seleccionados con fabricación de lana mineral

La estimación de la reducción de emisiones aceptada por la UNFCCC es obtenida mediante metodologías y herramientas aprobadas por ellos, las cuales pueden ser descargadas libremente desde su sitio web oficial <http://cdm.unfccc.int/>.

Para proyectos de valorización energética de residuos, la estimación en la reducción de emisiones se obtiene mediante la Ecuación A.1, presentada en la metodología aprobada ACM0022: *Alternative waste treatment processes --- Version 2.0*.

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y$$

Ecuación A.1

Donde:

ER_y	:	Reducción de emisiones en año y [tCO ₂ e]
BE_y	:	Emisiones de línea base en año y [tCO ₂ e]
PE_y	:	Emisiones del proyecto en año y [tCO ₂ e]
LE_y	:	Fuga de emisiones en año y [tCO ₂ e]

Para la configuración de la central utilizando RDF con fabricación de lana mineral, se han utilizado los datos de entrada de la Tabla A.1. La frontera de evaluación del proyecto para la determinación de la reducción de emisiones, está dada por los residuos que efectivamente son procesados en el gasificador.

Tabla A.1: Datos de entrada en configuración utilizando RDF y fabricación de lana mineral.

Toneladas por día [t/d]	388,6
Horas de operación anual [h/a]	7.920
Días operación anual [d/a]	330
Potencia eléctrica [MWe]	28,06
Potencia eléctrica inyectada a la red [MWe]	12,63
EF _{grid,OM,y} [tCO ₂ /MWh] (1)	0,7479
EF _{grid,BM,y} [tCO ₂ /MWh] (2)	0,7046
W _{OM} 1 período	0,5
W _{BM} 1 período	0,5
W _{OM} 2 y 3 período	0,25
W _{BM} 2 y 3 período	0,75
Factor emisión 1 período SIC EF _{EL,k,y} [tCO ₂ /MWh]	0,726
Factor emisión 2 y 3 período SIC EF _{EL,k,y} [tCO ₂ /MWh]	0,715
TDL _{grid,y}	0,03

Fuente (1): PDD Loma Los Colorados Landfill Gas Project V1.3 (2014)

Fuente (2): PDD Loma Los Colorados Landfill Gas Project V1.3 (2014). Promedio años 2010, 2011 y 2012

Emisiones de línea base

Las emisiones de línea base corresponden a las emisiones en ausencia del proyecto y son estimadas mediante la Ecuación A.2.

$$BE_y = \sum_t (BE_{CH_4,t,y} + BE_{WW,y} + BE_{EN,t,y} + BE_{NG,t,y}) \times DF_{RATE,t,y} \quad \text{Ecuación A.2}$$

Con:

$$DF_{RATE,t,y} = \begin{cases} 1 - RATE_{compliance,t,y} & \text{si } RATE_{compliance,t,y} < 0,5 \\ 0 & \text{si } RATE_{compliance,t,y} \geq 0,5 \end{cases} \quad \text{Ecuación A.3}$$

Donde:

BE_y	:	Emisiones de línea base en año y [tCO ₂ e]
$BE_{CH_4,t,y}$:	Emisiones de línea base de metano desde sitios para disposición de residuos sólidos en año y [tCO ₂ e]
$BE_{WW,y}$:	Emisiones de línea base de tratamiento anaeróbico de agua residual en lagunas o fosos de lodo en ausencia del proyecto en año y [tCO ₂ e]
$BE_{EN,t,y}$:	Emisiones de línea base asociadas con generación de energía en año y [tCO ₂ e]
$BE_{NG,t,y}$:	Emisiones de línea base asociadas al uso de gas natural en año y [tCO ₂ e]
$DF_{RATE,t,y}$:	Factor de descuento por $RATE_{compliance,t,y}$
$RATE_{compliance,t,y}$:	Razón de cumplimiento en la exigencia del uso del tratamiento alternativo de residuos t en año y
t	:	Tipo de tratamiento alternativo de residuos

Emisiones de línea base de metano desde sitios para disposición de residuos sólidos ($BE_{CH_4,t,y}$)

Actualmente no existen en Chile normativas ambientales que obliguen a la quema de biogás. El D.S. N°189/2008 que regula las condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios, sólo establece la existencia de sistemas de manejo de biogás destinados a garantizar condiciones de seguridad al interior de la instalación y sus alrededores. Es por esto que una de las contribuciones del proyecto tiene que ver con evitar la producción de metano al evitar la disposición de los residuos domiciliarios en un relleno sanitario.

Si bien existen rellenos sanitarios tales como el relleno de Santa Marta y Loma Los Colorados, que desde un comienzo de sus operaciones han quemado biogás en pequeñas cantidades y que luego han aumentado sus porcentajes de captura y quema de biogás mediante proyectos de generación eléctrica MDL, se tomará como escenario base la normativa actual la cual no exige quema de biogás.

Luego, para el cálculo de emisiones de línea base de metano desde sitios para disposición de residuos sólidos (*solid waste disposal site* en inglés, SWDS), se utiliza la herramienta *TOOL04: Methodological tool --- Emissions from solid waste disposal sites --- Version 07.0*, la cual utiliza una fórmula en base al modelo de decaimiento de primer orden (*first order decay* en inglés, FOD). El modelo diferencia entre diferentes tipos j de residuos con sus respectivas constantes de decaimiento (k_j) y fracciones de carbón orgánico degradable (*degradable organic carbon* en inglés, DOC).

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \varphi_y \times (1 - f_y) \times GWP_{CH_4} \times (1 - OX) \times \frac{16}{12} \times F \times DOC_{f,y} \times MCF_y \times \sum_{x=1}^y \sum_j (W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-k \times (y-x)} \times (1 - e^{-k_j}))$$

Ecuación A.4

Donde:

- $BE_{CH_4,SWDS,y}$: Emisiones de línea base de metano ocurridas en año y desde sitio para disposición de residuos sólidos durante un periodo de tiempo terminando en año y [tCO₂e]
- x : Año en el periodo de tiempo en que los residuos son dispuestos en el SWDS, desde el primero año del periodo (x=1) hasta el año y (x=y)
- y : Año del periodo de crédito para el cual las emisiones de metano son calculadas (y es un periodo consecutivo de 12 meses)
- $DOC_{f,y}$: Fracción de carbón orgánico degradable que descompone bajo condiciones específicas en el SWDS para el año y (fracción en peso)
- $W_{j,x}$: Cantidad de residuos sólido tipo j dispuesto o prevenido de disposición en el SWDS en el año x (t)
- φ_y : Factor de corrección del modelo debido a incertezas en año y
- f_y : Fracción de metano capturado en el SWDS y que es quemado o usado de otra manera que prevenga las emisiones de metano a la atmosfera en el año y
- GWP_{CH_4} : Potencial de calentamiento atmosférico del metano
- OX : Factor de oxidación que refleja la cantidad de metano oxidada en el suelo u otro material cubriendo los residuos
- F : Fracción de metano en el gas de SWDS
- MCF_y : Factor de corrección de metano para el año y
- DOC_j : Fracción de carbón orgánico degradable en el residuo tipo j (fracción en peso)
- k : Razón de decaimiento para el residuo tipo j [1/año]
- j : Tipos de residuos en residuos sólidos municipales (*municipal solid waste en inglés, MSW*)

Todos los valores de los parámetros son obtenidos de las respectivas herramientas a no ser que se indique lo contrario. En la Tabla A.2 se presentan los parámetros que permanecen constantes en el tiempo y el valor de parte de la Ecuación A.1 asociada a estos parámetros.

Tabla A.2: Obtención de parte invariable en el tiempo de Ecuación A.1.

Parámetro	Valor	Unidad
φ	0,85	-
f	0	-
GWP_{CH_4}	21	[tCO ₂ e/tCH ₄]
OX	0,1	-
F	0,5	-
$DOC_{f,defecto}$	0,5	-
$MCF_{defecto}$	1	-

$$\varphi * (1-f_y) * GWP_{CH_4} * (1-OX) * 16/12 * F * DOC_{f,defecto} * MCF_{defecto} = 5,355$$

En la Tabla A.3, se presenta la composición (referida a MSW) y fracción de carbón orgánico degradable según tipo de residuo y en la Tabla A.4 se presenta la razón de decaimiento según condiciones ambientales y tipo de residuo. Con estos parámetros se pueden obtener la parte dependiente del tiempo de la Ecuación A.1, la cual ha sido evaluada para 21 años, correspondientes a 3 periodos crediticios de 7 años cada uno (máximo permitido).

Tabla A.3: Composición y fracción de carbón orgánico degradable según tipo de residuo.

Composición de residuos y Fracción de carbón orgánico degradable en el residuo tipo j	j	Madera y productos de madera	Pulpa, papel y cartón (distinto de lodos)	Alimento, residuos de alimento, bebestibles y tabaco (distinto de lodos)	Textiles	Desechos de jardinería	Plástico, metal, vidrio, otros inertes
Composición de residuos (1)	W_j	4,7%	17,1%	44,9%	2,6%	0,0%	30,7%
Fracción de carbón orgánico degradable en el residuo tipo j (2)	DOC_j	43%	40%	15%	24%	20%	0%

Fuente (1) y (2): IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas, Volume 5, Chapter 2, Tables 2.3-2.5, MSW composition regional default values for South-America.

Tabla A.4: Razón de decaimiento según características ambientales y tipo de residuo.

Razón de decaimiento - k_j	j	Madera y productos de madera	Pulpa, papel y cartón (distinto de lodos)	Alimento, residuos de alimento, bebestibles y tabaco (distinto de lodos)	Textiles	Desechos de jardinería	Plástico, metal, vidrio, otros inertes
MAT \leq 20°C y MAP/PET < 1	k_j	0,02	0,04	0,06	0,04	0,05	0
MAT \leq 20°C y MAP/PET > 1	k_j	0,03	0,06	0,185	0,06	0,1	0
MAT > 20°C y MAP \leq 1,000 mm	k_j	0,025	0,045	0,085	0,045	0,065	0
MAT > 20°C y MAP > 1,000 mm	k_j	0,035	0,07	0,4	0,07	0,17	0

Temperatura Anual Promedio (MAT, por sus siglas en inglés) (°C) (1)	MAT	14,75
Precipitación Anual Promedio (MAP, por sus siglas en inglés) (mm) (2)	MAP	363
Índice de aridez (3)	MAP/PET	3

Razón de decaimiento para el residuo tipo j de acuerdo al MAT y MAP	k_j	0,03	0,06	0,185	0,06	0,1	0
---	-------	------	------	-------	------	-----	---

(1) Fuente: <http://www.bbc.com/weather/3871336>

(2) Fuente: <http://www.bbc.com/weather/3871336>

(3) Fuente MAP/PET:

www.fao.org/geonetwork/srv/fr/graphover.show?id=12739&fname=aridity_index.gif&access=public

Luego multiplicando el número de toneladas tratadas por año y el valor obtenido en la Tabla A.2 con el valor obtenido en cada año en la Tabla A.5, se obtiene el valor de emisiones de línea base de metano desde SWDS para cada año, los cuales se presentan en la Tabla A.6.

Tabla A.5: Obtención de parte dependiente del tiempo en Ecuación A.1.

Año	Madera y productos de madera		Pulpa, papel y cartón (distinto de lodos)		Alimento, residuos de alimento, bebestibles y tabaco (distinto de lodos)		Textiles		Desechos de jardinería		Plástico, metal, vidrio, otros inertes		$\sum \sum W_{j,x} * DOC_j * e^{-kj(y-x)} * (1-e^{-kj})$
	<i>W</i>	4,7%	<i>W</i>	17,1%	<i>W</i>	44,9%	<i>W</i>	2,6%	<i>W</i>	0,0%	<i>W</i>	30,7%	
	<i>DOC</i>	43,0%	<i>DOC</i>	40,0%	<i>DOC</i>	15,0%	<i>DOC</i>	24,0%	<i>DOC</i>	20,0%	<i>DOC</i>	0,0%	
	<i>k</i>	0,03	<i>k</i>	0,06	<i>k</i>	0,185	<i>k</i>	0,06	<i>k</i>	0,1	<i>k</i>	0	
1	0,000597296	0,003983306	0,011375126	0,000363389	0	0	0,016319117						
2	0,000579643	0,003751336	0,009453916	0,000342227	0	0	0,014127123						
3	0,000562512	0,003532875	0,00785719	0,000322297	0	0	0,012274875						
4	0,000545887	0,003327137	0,006530145	0,000303528	0	0	0,010706697						
5	0,000529754	0,003133379	0,005427231	0,000285852	0	0	0,009376217						
6	0,000514097	0,002950906	0,004510595	0,000269205	0	0	0,008244803						
7	0,000498903	0,002779058	0,003748775	0,000253528	0	0	0,007280265						
8	0,000484159	0,002617218	0,003115623	0,000238764	0	0	0,006455764						
9	0,000469849	0,002464804	0,002589407	0,000224859	0	0	0,00574892						
10	0,000455963	0,002321265	0,002152068	0,000211764	0	0	0,00514106						
11	0,000442488	0,002186085	0,001788593	0,000199432	0	0	0,004616597						
12	0,00042941	0,002058777	0,001486507	0,000187818	0	0	0,004162512						
13	0,000416719	0,001938883	0,001235442	0,000176881	0	0	0,003767925						
14	0,000404403	0,001825971	0,001026781	0,00016658	0	0	0,003423736						
15	0,000392451	0,001719635	0,000853362	0,000156879	0	0	0,003122328						
16	0,000380853	0,001619491	0,000709233	0,000147743	0	0	0,00285732						
17	0,000369597	0,001525179	0,000589447	0,000139139	0	0	0,002623362						
18	0,000358673	0,00143636	0,000489892	0,000131036	0	0	0,002415961						
19	0,000348073	0,001352713	0,000407151	0,000123405	0	0	0,002231342						
20	0,000337786	0,001273937	0,000338385	0,000116219	0	0	0,002066327						
21	0,000327803	0,001199749	0,000281233	0,000109451	0	0	0,001918236						

Tabla A.6: Emisiones de línea base de metano desde sitios para disposición de residuos sólidos.

Toneladas por día [t/d]	388,6																					
Días de operación anual [d/a]	330																					
Año	BE_{CH4,SWDS,y} [tCO₂e]																					
1	11.207	11.207																				
2	20.908	9.701	11.207																			
3	29.337	8.429	9.701	11.207																		
4	36.690	7.352	8.429	9.701	11.207																	
5	43.128	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207																
6	48.790	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207															
7	53.790	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207														
8	58.223	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207													
9	62.171	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207												
10	65.701	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207											
11	68.872	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207										
12	71.730	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207									
13	74.318	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207								
14	76.669	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207							
15	78.813	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207						
16	80.775	1.962	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207					
17	82.576	1.802	1.962	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207				
18	84.236	1.659	1.802	1.962	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207			
19	85.768	1.532	1.659	1.802	1.962	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207		
20	87.187	1.419	1.532	1.659	1.802	1.962	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207	
21	88.504	1.317	1.419	1.532	1.659	1.802	1.962	2.144	2.351	2.587	2.858	3.170	3.530	3.948	4.433	4.999	5.662	6.439	7.352	8.429	9.701	11.207

Emisiones de línea base de tratamiento anaeróbico de agua residual en lagunas o fosos de lodo en ausencia del proyecto ($BE_{ww,y}$)

No aplican en este proyecto, luego:

$$BE_{ww,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.5}$$

Emisiones de línea base asociadas con generación de energía ($BE_{EN,y}$)

Las emisiones de línea base asociadas con generación de energía se calculan mediante la Ecuación A.6.

$$BE_{EN,y} = BE_{EC,y} + BE_{HC,y} \quad \text{Ecuación A.6}$$

Donde:

- $BE_{EN,y}$: Emisiones de línea base asociadas con generación de energía en año y [tCO₂e]
- $BE_{EC,y}$: Emisiones de línea base asociadas con generación de electricidad en año y [tCO₂e]
- $BE_{HC,y}$: Emisiones de línea base asociadas con generación de calor en año y [tCO₂e]

La generación eléctrica del proyecto producirá una reducción de emisiones de CO₂, debido al desplazamiento en la producción de electricidad desde combustibles fósiles, -que aportan con nuevo carbón al ciclo del carbono-, a uno considerado renovable como lo son los MSW.

Luego, para calcular las emisiones de línea base asociadas con generación de electricidad se utiliza la Ecuación A.7 obtenida desde la herramienta *TOOL05: Methodological tool --- Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation --- Version 02.0*.

$$BE_{EC,y} = \sum_k EC_{BL,k,y} \times EF_{EF,k,y} \times (1 + TDL_{k,y}) \quad \text{Ecuación A.7}$$

Donde:

- $BE_{EC,y}$: Emisiones de línea base asociadas con generación de electricidad en año y [tCO₂e]
- $EC_{BL,k,y}$: Cantidad de electricidad que sería consumida desde el sistema k en año y [MWh]
- $EF_{EF,k,y}$: Factor de emisión de CO₂e para la electricidad generada en el sistema k en año y [tCO₂e/MWh]
- $TDL_{k,y}$: Pérdida promedio por transmisión y distribución en el sistema k en año y

De estos parámetros el que más impacto tiene sobre las emisiones debido a generación eléctrica es el factor de emisión de CO₂ del sistema implicado, que en éste caso por la ubicación geográfica del proyecto corresponde al SIC. Es importante notar que el factor de emisión utilizado no corresponde al promedio del SIC, ya que el proyecto desplazará las centrales térmicas de combustibles fósiles actuales o futuras del SIC. Es por esto que el factor de emisión a utilizar corresponde al margen combinado (combined margin en inglés, CM) el cual se calcula mediante la Ecuación A.8, obtenida desde la herramienta *TOOL07: Methodological tool --- Tool to calculate the emission factor for an electricity system --- Version 05.0*.

$$EF_{grid,CM,y} = EF_{grid,OM,y} \times w_{OM} + EF_{grid,BM,y} \times w_{BM}$$

Ecuación A.8

Donde:

$EF_{grid,CM,y}$:	Factor de emisión de CO ₂ de margen combinado para la electricidad generada en el sistema eléctrico correspondiente en año y [tCO ₂ /MWh]
$EF_{grid,OM,y}$:	Factor de emisión de CO ₂ de margen de operación en año y [tCO ₂ /MWh]
w_{OM}	:	Ponderación del factor de emisión de margen de operación
$EF_{grid,BM,y}$:	Factor de emisión de CO ₂ de margen de construcción en año y [tCO ₂ /MWh]
w_{BM}	:	Ponderación del factor de emisión de margen de construcción

En la Tabla A.7 se presentan los parámetros necesarios para calcular el factor de emisión de margen combinado para el SIC. Los factores de margen de operación (*operating margin* en inglés, OP) y de margen de construcción (*build margin* en inglés, BM) han sido obtenidos del PDD "Relleno Sanitario Loma Los Colorados V1.3" [1], además existen distintas ponderaciones de estos factores según el periodo crediticio por lo que existen dos factores de emisión de margen combinado a utilizar.

Los resultados de las emisiones de línea base asociadas con generación de electricidad según año y periodo crediticio se presentan en la Tabla A.8.

Tabla A.7: Parámetros para la obtención del factor de emisión de margen combinado.

$EF_{grid,OM,y}$ [tCO ₂ /MWh] (1)	0,7479
$EF_{grid,BM,y}$ [tCO ₂ /MWh] (2)	0,7046
w_{OM} 1 periodo	0,5
w_{BM} 1 periodo	0,5
w_{OM} 2 y 3 periodo	0,25
w_{BM} 2 y 3 periodo	0,75
Factor emisión 1 periodo SIC $EF_{EL,k,y}$ [tCO ₂ /MWh]	0,726
Factor emisión 2 y 3 periodo SIC $EF_{EL,k,y}$ [tCO ₂ /MWh]	0,715

Fuente (1): PDD Loma Los Colorados Landfill Gas Project V1.3 (2014)

Fuente (2): PDD Loma Los Colorados Landfill Gas Project V1.3 (2014). Promedio años 2010, 2011 y 2012

Tabla A.8: Obtención de emisiones de línea base asociadas con generación de electricidad.

	1 ^{er} Período	2 ^{do} y 3 ^{er} Período
Potencia inyectada [MWe]	12,63	12,63
Horas de operación anual [h/a]	7.920	7.920
Electricidad inyectada a la red $EC_{BL,k,y}$ [MWh]	100.030	100.030
Factor emisión SIC $EF_{EL,k,y}$ [tCO ₂ /MWh]	0,726	0,715
$TDL_{k,y}$	0,03	0,03
$BE_{EC,y}$ [tCO₂e]	74.826	73.711
$BE_{HC,y}$ [tCO₂e]	0	0
$BE_{EN,y}$ [tCO₂e]	74.826	73.711

Finalmente las emisiones de línea base asociadas con generación de calor en este proyecto no aplican por lo que son nulas y luego:

$$BE_{EN,y} = BE_{EC,y} \quad \text{Ecuación A.9}$$

Emisiones de línea base asociadas al uso de gas natural ($BE_{NG,y}$)

No aplican en éste proyecto, luego:

$$BE_{NG,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.10}$$

Factor de descuento por razón de conformidad ($DF_{RATE,t,y}$)

Actualmente no existen leyes o regulaciones que obliguen el uso parcial o total de la gasificación como opción al tratamiento de residuos sólidos municipales, por lo que la razón de cumplimiento, $RATE_{compliance,t,y}$, es cero. Luego:

$$DF_{RATE,t,y} = 1 \quad \text{Ecuación A.11}$$

Emisiones del proyecto

Corresponden a las emisiones producidas por la operación del proyecto y son estimadas mediante la Ecuación A.12.

$$PE_y = PE_{COMP,y} + PE_{AD,y} + PE_{GAS,y} + PE_{RDF_SB,y} + PE_{INC,y} \quad \text{Ecuación A.12}$$

Donde:

PE_y	:	Emisiones del proyecto en año y [tCO ₂ e]
$PE_{COMP,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de compostaje o co-compostaje en año y [tCO ₂ e]
$PE_{AD,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de digestión anaeróbica y combustión de biogás en año y [tCO ₂ e]
$PE_{GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de gasificación en año y [tCO ₂ e]
$PE_{RDF_SB,y}$:	Emisiones del proyecto asociadas a combustible derivado de residuos (<i>refuse derived fuel</i> en inglés, RDF) o biomasa estabilizada (<i>stabilized biomass</i> en inglés, SB) en año y [tCO ₂ e]
$PE_{INC,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de incineración en año y [tCO ₂ e]

Emisiones del proyecto provenientes de compostaje o co-compostaje ($PE_{COMP,y}$)

No aplican en este proyecto, luego:

$$PE_{COMP,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.13}$$

Emisiones del proyecto provenientes de digestión anaeróbica y combustión de biogás ($PE_{AD,y}$)

No aplican en este proyecto, luego:

$$PE_{AD,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.14}$$

Emisiones del proyecto provenientes de gasificación ($PE_{GAS,y}$)

Las emisiones debido al uso de gasificación son estimadas usando la Ecuación A.15.

$$PE_{GAS,y} = PE_{COM,GAS,y} + PE_{EC,GAS,y} + PE_{FC,GAS,y} + PE_{WW,GAS,y} \quad \text{Ecuación A.15}$$

Donde:

$PE_{GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de gasificación en año y [tCO ₂ e]
$PE_{COM,GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de combustión asociada con gasificación en año y [tCO ₂ e]
$PE_{EC,GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de consumo eléctrico asociado con gasificación en año y [tCO ₂ e]
$PE_{FC,GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de consumo de combustible fósil asociado con gasificación en año y [tCO ₂ e]
$PE_{WW,GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de tratamiento de agua residual asociado con gasificación en año y [tCO ₂ e]

Para estimar $PE_{COM,GAS,y}$ se utiliza la Ecuación A.16 indicada en el procedimiento *Project emissions from combustion within the project boundary* de la metodología ACM0022, donde $PE_{COM,GAS,y} = PE_{COM,c,y}$ y la cámara de combustión c corresponde a un gasificador o quemador de gas combustible (en este caso un gasificador).

$$PE_{COM,GAS,y} = PE_{COM,CO2,c,y} + PE_{COM,CH4,N2O,c,y} \quad \text{Ecuación A.16}$$

Donde:

$PE_{COM,GAS,y}$:	Emisiones del proyecto provenientes de la combustión dentro los límites del proyecto asociada con la cámara de combustión c en año y [tCO ₂ e]
$PE_{COM,CO2,c,y}$:	Emisiones de CO ₂ del proyecto provenientes de la combustión asociada con la cámara de combustión c en año y [tCO ₂ e]
$PE_{COM,CH4,N2O,c,y}$:	Emisiones de CH ₄ y N ₂ O del proyecto provenientes de la combustión asociada con la cámara de combustión c en año y [tCO ₂ e]
c	:	Cámara de combustión usada en el proyecto: gasificador o quemador de gas combustible, incinerador o quemador de RDF/SB

Para estimar $PE_{COM,CO2,c,y}$ se utiliza la Ecuación A.17.

$$PE_{COM,CO2,c,y} = EFF_{COM,c,y} \times \frac{44}{12} \times \sum_j Q_{j,c,y} \times FCC_{j,y} \times FFC_{j,y} \quad \text{Ecuación A.17}$$

Donde:

$PE_{COM,CO2,c,y}$:	Emisiones de CO ₂ del proyecto debido a combustión asociada con gasificación en año y [tCO ₂ e]
$EFF_{COM,c,y}$:	Eficiencia de la cámara de combustión c en año y
$Q_{j,c,y}$:	Cantidad de residuo fresco tipo j alimentando la cámara de combustión c en año y (t)
$FCC_{j,y}$:	Fracción total de carbón en el residuo tipo j en el año y [tC/t]
$FFC_{j,y}$:	Fracción de carbón fósil en el residuo tipo j en el año y (fracción en peso)
$\frac{44}{12}$:	Factor de conversión [tCO ₂ /tC]

- c : Cámara de combustión usada en el proyecto: gasificador o quemador de gas combustible, incinerador o quemador de RDF/SB
- j : Tipo de residuo

Para calcular $Q_{j,c,y}$ se utiliza la Ecuación A.18.

$$Q_{j,c,y} = Q_{waste,c,y} \times \frac{1}{z} \sum_{n=1}^z p_{n,j,y} \quad \text{Ecuación A.18}$$

Donde:

- $Q_{j,c,y}$: Cantidad de residuo tipo j alimentando la cámara de combustión c en año y (t)
- $Q_{waste,c,y}$: Cantidad de residuo fresco o RDF/SB alimentando la cámara de combustión c en año y (t)
- $p_{n,j,y}$: Fracción de residuo tipo j en la muestra n recolectado durante el año y (fracción en peso)
- z : Número de muestras recolectadas durante el año y
- n : Muestras recolectadas en año y
- j : Tipo de residuo

En la Tabla A.9, puede verse la estimación de la Ecuación A.17.

Tabla A.9: Estimación de $PE_{COM,CO_2,c,y}$.

Q_{waste,c,y} [t/a]	128.238				
	Composición (1)	Q_{j,c,y}	FCC_{j,y}	FFC_{j,y}	Q_{j,y,c} x FCC_{j,y} x FFC_{j,y}
Desechos de alimentos	44,9%	57.579	50%	0%	0
Papel/cartón	17,1%	21.929	50%	5%	548
Madera	4,7%	6.027	54%	0%	0
Textiles	2,6%	3.334	50%	50%	834
Caucho/cuero	0,7%	898	67%	20%	120
Plástico	10,8%	13.850	85%	100%	11.772
Metal	2,9%	3.719	0%	0%	0
Vidrio	3,3%	4.232	0%	0%	0
Otros inertes	13,0%	16.671	5%	100%	834
Total	100,0%	128.238			14.108
EFF_{COM,c,y}	1				
PE_{COM,CO2,c,y} [tCO₂e/a]	51.729				

Fuente (1): IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas, Volume 5, Chapter 2, Tables 2.3-2.5, MSW composition regional default values for South-America.

Para estimar $PE_{COM,CH_4,N_2O,c,y}$ se utiliza la Ecuación A.19.

$$PE_{COM,CH_4,N_2O,c,y} = Q_{waste,c,y} \times (EF_{N_2O,t} \times GWP_{N_2O} + EF_{CH_4,t} \times GWP_{CH_4}) \quad \text{Ecuación A.19}$$

Donde:

$PE_{COM,CH_4,N_2O,c,y}$:	Emisiones de CH ₄ y N ₂ O del proyecto provenientes de la combustión asociada con la cámara de combustión c en año y [tCO ₂ e]
$Q_{waste,c,y}$:	Cantidad de residuo fresco o RDF/SB alimentando la cámara de combustión c en año y (t)
$EF_{N_2O,t}$:	Factor de emisión por N ₂ O asociado con el tratamiento de residuos opción t [tN ₂ O/twaste]
GWP_{N_2O}	:	Potencial de calentamiento atmosférico del óxido nitroso [tCO ₂ e/tN ₂ O]
$EF_{CH_4,t}$:	Factor de emisión por CH ₄ asociado con el tratamiento opción t [tN ₂ O/twaste]
GWP_{CH_4}	:	Potencial de calentamiento atmosférico del metano válido para el periodo compromiso [tCO ₂ e/tCH ₄]
c	:	Cámara de combustión usada en el proyecto: gasificador, incinerador
t	:	Tipo de tratamiento alternativo de residuos: gasificación, incineración

En la Tabla A.10, puede verse la estimación de la Ecuación A.19.

Tabla A.10: Estimación de $PE_{COM,CH_4,N_2O,c,y}$.

$Q_{waste,c,y}$ [t/a]	128.238
$EF_{N_2O,t}$ [tN ₂ O/tMSW] (1)	6,05E-05
GWP_{N_2O}	310
$EF_{CH_4,t}$ [tCH ₄ /tMSW] (2)	0
GWP_{CH_4}	21
$PE_{COM,CH_4,N_2O,c,y}$ [tCO₂e/a]	2.405

Fuente (1): IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas, Volume 5, Chapter 5, Tables 5.6

Fuente (2): IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas, Volume 5, Chapter 5, Tables 5.3

Luego tenemos que la Ecuación A.16 tiene un valor estimado de:

$$PE_{COM,GAS,y} = PE_{COM,CO_2,c,y} + PE_{COM,CH_4,N_2O,c,y} = 54.134 \left[\frac{tCO_2e}{a} \right] \quad \text{Ecuación A.20}$$

El proyecto en operación normal no consume electricidad de la red SIC, luego:

$$PE_{EC,GAS,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.21}$$

El proyecto en operación normal no contempla el uso de combustibles fósiles, luego:

$$PE_{FC,GAS,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.22}$$

El proyecto en operación normal no contempla el manejo de aguas residuales, luego:

$$PE_{WW,GAS,y} = 0 \quad \text{Ecuación A.23}$$

Luego tenemos que la Ecuación A.15 tiene un valor estimado de:

$$\begin{aligned}
 PE_{GAS,y} &= PE_{COM,GAS,y} + PE_{EC,GAS,y} + PE_{FC,GAS,y} + PE_{WW,GAS,y} \\
 &= 54.134 + 0 + 0 + 0 = 54.134 \left[\frac{tCO_2e}{a} \right]
 \end{aligned}$$

Ecuación A.24

Emisiones del proyecto asociadas a combustible derivado de residuos o biomasa estabilizada (PE_{RDF_SB,y})

No aplican en este proyecto, luego:

$$PE_{RDF_SB,y} = 0$$

Ecuación A.25

Emisiones del proyecto provenientes de incineración (PE_{INC,y})

No aplican en este proyecto, luego:

$$PE_{INC,y} = 0$$

Ecuación A.26

Finalmente la Ecuación A.12 tiene un valor estimado de:

$$\begin{aligned}
 PE_y &= PE_{COMP,y} + PE_{AD,y} + PE_{GAS,y} + PE_{RDF_SB,y} + PE_{INC,y} \\
 &= 0 + 0 + 54.134 + 0 + 0 = 54.134 \left[\frac{tCO_2e}{a} \right]
 \end{aligned}$$

Ecuación A.27

Fuga de emisiones

La fuga de emisiones se refiere a emisiones producidas fuera de los límites del proyecto, debido a éste, y en general está asociado a compostaje/co-compostaje, digestión anaeróbica y el uso de RDF/SB que es exportado fuera de los límites del proyecto. Como la frontera de evaluación del proyecto para la determinación de la reducción de emisiones, está dada por los residuos que efectivamente son procesados en el gasificador, el contenido de orgánicos producto de la separación no forma parte de la evaluación, por lo que no son considerados como fuga de emisiones. El RDF producido es utilizado in situ por lo que tampoco aporta como fuga de emisiones, luego:

$$LE_y = 0$$

Ecuación A.28

Finalmente se presenta en la Tabla A.12 la reducción de emisiones para cada uno de los tres periodos crediticios de siete años. Estos valores permiten calcular los beneficios debido a CER's y además demuestran que el proyecto es adicional.

Tabla A.12: Reducción de emisiones del proyecto en sus tres periodos crediticios.

Año	BE_y [tCO₂e]	PE_y [tCO₂e]	LE_y [tCO₂e]	ER_y [tCO₂e]
1	86.032	54.134	0	31.899
2	95.734	54.134	0	41.600
3	104.163	54.134	0	50.029
4	111.516	54.134	0	57.382
5	117.954	54.134	0	63.820
6	123.616	54.134	0	69.482
7	128.616	54.134	0	74.482
8	131.934	54.134	0	77.800
9	135.881	54.134	0	81.748
10	139.412	54.134	0	85.278
11	142.582	54.134	0	88.448
12	145.441	54.134	0	91.307
13	148.028	54.134	0	93.894
14	150.379	54.134	0	96.245
15	152.523	54.134	0	98.390
16	154.486	54.134	0	100.352
17	156.287	54.134	0	102.153
18	157.946	54.134	0	103.812
19	159.478	54.134	0	105.345
20	160.897	54.134	0	106.764
21	162.215	54.134	0	108.081
Total	2.865.121	1.136.811	0	1.728.309

Bibliografía

- [1] KDM S.A, «Loma Los Colorados Landfill Gas Project V1.3,» 01 09 2014. [En línea]. Disponible en: http://cdm.unfccc.int/filestorage/5/H/Q/5HQL1XI0A876D4CJYBGR2KOMNUFPVE/PDD_rcp.pdf?t=ODN8bzV5dGJ4fDAHIvRqc5_0xe6SVaQxQEzT. [Último acceso: Abril 2016].

Anexo B: Proveedores de tecnología de plasma

Tabla B.1: Proveedores de tecnología de plasma.

Proveedor	Origen	Materiales
Alter NRG	Canadá	RSM, RDF, ASR, carbón, madera, peligrosos, petcoke
Advanced Plasma Power (APP)	Inglaterra	RDF
Bellwether Gasification Technologies	Alemania	RSM, RDF
Bio Arc	USA	Agronómicos, médicos
Blue Vista Technologies	Canadá	RSM, peligrosos
Environmental Energy Resources (EER)	Israel	RSM
Encore Environmental Solutions	USA	Peligrosos
Enersol Technologies	USA	Radioactivos, municiones
Enviroarc Technologies	Noruega	Ternería, peligrosos, ceniza
Europlasma	Francia	Peligrosos, ceniza, RSM, neumáticos
GS Platech	Corea del Sur	RSM, biomasa, ASR, industriales, peligrosos, barros de tratamiento de aguas, radioactivos
Hera Plasco	España	RSM
Hitachi Metals	Japón	RSM, barros de tratamiento de aguas
Hitachi Zosen	Japón	Ceniza
Hungaroplasma Services	Hungría	RSM
InEnTec	USA	Médicos, peligrosos
International Scientific Center of Thermophysics and Energetics (ISCTE)	Rusia	Aceites, pesticidas, médicos
Kawasaki Heavy Industries	Japón	PCB y asbestos
Kinectrics	Canadá	RSM, plásticos
Mitsubishi Heavy Industries	Japón	Ceniza
MPM Technologies	USA	ASR, barros de tratamiento de aguas, NFU, petcoke, biomasa
MSE Technology Applications	USA	Militar, peligrosos
Plasma Energy Applied Technology (PEAT) International	USA	Peligrosos, médicos, industriales, farmacéuticos
Phoenix Solutions	USA	Ceniza
Plasco Energy	Canadá	RSM
Plazarium	Rusia	RSM, peligrosos, militares
Pyrogenesis	Canadá	De a bordo de barcos y peligrosos
Radon	Rusia	Radioactivos, peligrosos
Retech Systems	USA	Radioactivos, peligrosos
SRL Plasma	Australia	Solventes
Startech Environmental	USA	RSM
Tetronics	Inglaterra	Ceniza, industriales, peligrosos

Fuente: Elaboración propia en base a [1].

Bibliografía

- [1] Y. Byun, J. Chung, M. Cho y S.-M. Hwang, Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW), INTECH Open Access Publisher, 2012.

Anexo C: Centrales valorización energética o tratamiento térmico de residuos mediante plasma

Tabla C.1: Centrales valorización energética o tratamiento térmico de residuos mediante plasma

Ubicación	Población	Residuo	Capacidad (TPD)	Fecha de inicio
Europa				
Landskrona, Suecia	27.889	Ceniza volante	200	1983
Bordeaux, Francia	1.01 millones	Ceniza de RSM	10	1998
Morcenx, Francia	4.993	Asbestos	22	2001
Bergen, Noruega	213.000	Residuos de ternería	15	2001
Tees Valley, Inglaterra	119.332	RSM	1000	2017?
Tees Valley, Inglaterra	119.332	RSM	1000	2017?
América				
Anniston, USA	24.276	Convertidores catalíticos	24	1985
Jonquiere, Canadá	54.872	Desechos de aluminio	50	1991
Honolulu, USA	374.676	Médicos y de baterías	1	2001
Richland, USA	46.155	Peligrosos	4	2002
Alpoca, USA	613	Munición	10	2003
Marina de USA	-	Residuos de a bordo de barcos	7	2004
Armada de USA	-	Agentes químicos	10	2004
Hawthorne, USA	3.311	Munición	10	2006
Ottawa, Canadá	1.1 millones	RSM	85	2007
Madison, USA	510	Biomasa	18	2009
Asia				
Kinura, Japón	40.806	RSM, ceniza	50	1995
Mihama-Mikata, Japón	28.817	RSM, lodos de aguas de tratamiento	28	2002
Utashinai, Japón	5.221	RSM/NFU	300	2002
Shimonoseki, Japón	1.5 millones	RSM, ceniza	41	2002
Imizu, Japón	94.313	RSM, ceniza	12	2002
Kakogawa, Japón	268.565	RSM, ceniza	31	2003
Maizuru, Japón	89.626	RSM, ceniza	6	2003
Lizuka, Japón	78.201	Industriales	10	2004
Taipei, Taiwán	22.2 millones	Médicos y de baterías	4	2005
Osaka, Japón	2.6 millones	Plástico PCB	4	2006
Cheongsong, Corea del Sur	150.000	RSM	10	2008

Fuente: Elaboración propia en base a [1].

Bibliografía

- [1] Y. Byun, J. Chung, M. Cho y S.-M. Hwang, Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW), INTECH Open Access Publisher, 2012.

Anexo D: Propiedades químicas

Tabla D.1: Propiedades químicas utilizadas.

	H2	O2	N2	CO	CO2	CH4	H2O (g)	H2O (l)	Hvapor	C
Rango Temp.	250-1500	50-1500	50-1500	60-1500	50-5000	50-1500	250-1500	250-1500		200-1100
A	2,5399E+01	2,9526E+01	2,9342E+01	2,9556E+01	2,7437E+01	3,4942E+01	3,3933E+01			-8,3200E-01
B	2,0178E-02	-8,8999E-03	-3,5395E-03	-6,5807E-03	4,2315E-02	-3,9957E-02	-8,4186E-03			3,4846E-02
C	-3,8549E-05	3,8083E-05	1,0076E-05	2,0130E-05	-1,9555E-05	1,9184E-04	2,9906E-05			-1,3233E-05
D	3,1880E-08	-3,2629E-08	-4,3116E-09	-1,2227E-08	3,9968E-09	-1,5303E-07	-1,7825E-08			
E	-8,7585E-12	8,8607E-12	2,5935E-13	2,2617E-12	-2,9872E-13	3,9321E-11	3,6934E-12			
ΔGf,298.15 (KJ/mol)	0	0	0	-137,28	-394,38	-50,84	-228,6			0
ΔHf,298.15 (KJ/mol)	0	0	0	-110,5	-393,5	-74,85	-241,800	-285,8304	44,0304	0

Fuente: Chemical Properties Handbook [1].

Bibliografía

- [1] Yaws, Carl L, Chemical Properties Handbook, McGraw-Hill, 1999.

Anexo E: Flujos de caja

Tabla E.1: Flujo de caja para central utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]		330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]		9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]		42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]		5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos									
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]		2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]		212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978
Ingreso total [USD]		3.182.978							
Costos									
Potencia neta requerida [MW]		2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Factor de planta		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme requerida [MW]		1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95
Energía eléctrica consumida [MWh/año]		17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083
Precio de la energía [USD/MWh]		65	65	65	65	65	65	65	65
Energía eléctrica comprada [USD]		-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390
Costo general O&M [USD]		-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589
- Depreciación		-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194
Costo total [USD]		-19.621.173							
Utilidades antes de impuestos		-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194
Impuesto a las utilidades [25%]		0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos		-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194
+ Depreciación		6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194
Inversión excluyendo terreno [USD]	-168.279.846								
Inversión terreno [USD]	-758.609								
Inversión total [USD]	-169.038.455								
Recuperación de la inversión [USD]	-169.038.455	-178.745.455	-188.452.456	-198.159.456	-207.866.456	-217.573.457	-227.280.457	-236.987.458	-246.694.458
Flujo de caja [USD]	-169.038.455	-9.707.000							
TIR									
Tasa de descuento VAN	10%								
VAN [USD]	-257.149.286								

Tabla E.1: Flujo de caja para central utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral (continuación).

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos									
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978
Ingreso total [USD]	3.182.978								
Costos									
Potencia neta requerida [MW]	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme requerida [MW]	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95
Energía eléctrica consumida [MWh/año]	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Energía eléctrica comprada [USD]	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390
Costo general O&M [USD]	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589
- Depreciación	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194
Costo total [USD]	-19.621.173								
Utilidades antes de impuestos	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194
Impuesto a las utilidades [25%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194
+ Depreciación	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194
Inversión excluyendo terreno [USD]									
Inversión terreno [USD]									
Inversión total [USD]									
Recuperación de la inversión [USD]	-256.401.459	-266.108.459	-275.815.460	-285.522.460	-295.229.461	-304.936.461	-314.643.462	-324.350.462	-334.057.463
Flujo de caja [USD]	-9.707.000								
TIR									
Tasa de descuento VAN									
VAN [USD]									

Tabla E.1: Flujo de caja para central utilizando RSM ar, sin fabricación de lana mineral (continuación).

Año	18	19	20	21	22	23	24	25
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos								
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978
Ingreso total [USD]	3.182.978							
Costos								
Potencia neta requerida [MW]	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme requerida [MW]	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95
Energía eléctrica consumida [MWh/año]	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083	17.083
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65
Energía eléctrica comprada [USD]	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390	-1.110.390
Costo general O&M [USD]	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589	-11.779.589
- Depreciación	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194	-6.731.194
Costo total [USD]	-19.621.173							
Utilidades antes de impuestos	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194
Impuesto a las utilidades [25%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194	-16.438.194
+ Depreciación	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194	6.731.194
Inversión excluyendo terreno [USD]								
Inversión terreno [USD]								
Inversión total [USD]								
Recuperación de la inversión [USD]	-343.764.463	-353.471.464	-363.178.464	-372.885.465	-382.592.465	-392.299.466	-402.006.466	-411.713.467
Flujo de caja [USD]	-9.707.000							
TIR								
Tasa de descuento VAN								
VAN [USD]								

Tabla E.2: Flujo de caja para central utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]		330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]		9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]		32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]		5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]		8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos									
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]		2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]		162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691
Ingreso por venta de lana mineral [USD]		8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso total [USD]		11.882.691							
Costos									
Potencia neta requerida [MW]		2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
Factor de planta		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme requerida [MW]		2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
Energía eléctrica consumida [MWh/año]		20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352
Precio de la energía [USD/MWh]		65	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Energía eléctrica comprada [USD]		-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854
Costo general O&M [USD]		-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321
Costo operación fabricación lana mineral [USD]		-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación		-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184
Costo total [USD]		-22.092.968							
Utilidades antes de impuestos		-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277
Impuesto a las utilidades [25%]		0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos		-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277
+ Depreciación		7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184
Inversión excluyendo terreno [USD]	-178.304.588								
Inversión terreno [USD]	-758.609								
Inversión total [USD]	-179.063.197								
Recuperación de la inversión [USD]	-179.063.197	-182.141.290	-185.219.383	-188.297.476	-191.375.569	-194.453.662	-197.531.756	-200.609.849	-203.687.942
Flujo de caja [USD]	-179.063.197	-3.078.093							
TIR									
Tasa de descuento VAN	10%								
VAN [USD]	-207.003.171								

Tabla E.2: Flujo de caja para central utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral (continuación).

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos									
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691
Ingreso por venta de lana mineral [USD]	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso total [USD]	11.882.691								
Costos									
Potencia neta requerida [MW]	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme requerida [MW]	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
Energía eléctrica consumida [MWh/año]	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352
Precio de la energía [USD/MWh]	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Energía eléctrica comprada [USD]	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854
Costo general O&M [USD]	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321
Costo operación fabricación lana mineral [USD]	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184
Costo total [USD]	-22.092.968								
Utilidades antes de impuestos	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277
Impuesto a las utilidades [25%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277
+ Depreciación	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184
Inversión excluyendo terreno [USD]									
Inversión terreno [USD]									
Inversión total [USD]									
Recuperación de la inversión [USD]	-206.766.035	-209.844.128	-212.922.221	-216.000.314	-219.078.407	-222.156.500	-225.234.593	-228.312.686	-231.390.779
Flujo de caja [USD]	-3.078.093								
TIR									
Tasa de descuento VAN									
VAN [USD]									

Tabla E.2: Flujo de caja para central utilizando RSM ar, con fabricación de lana mineral (continuación).

Año	18	19	20	21	22	23	24	25
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos								
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691
Ingreso por venta de lana mineral [USD]	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso total [USD]	11.882.691							
Costos								
Potencia neta requerida [MW]	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57	2,57
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme requerida [MW]	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
Energía eléctrica consumida [MWh/año]	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352	20.352
Precio de la energía [USD/MWh]	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Energía eléctrica comprada [USD]	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854	-1.322.854
Costo general O&M [USD]	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321	-12.481.321
Costo operación fabricación lana mineral [USD]	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184	-7.132.184
Costo total [USD]	-22.092.968							
Utilidades antes de impuestos	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277
Impuesto a las utilidades [25%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277	-10.210.277
+ Depreciación	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184	7.132.184
Inversión excluyendo terreno [USD]								
Inversión terreno [USD]								
Inversión total [USD]								
Recuperación de la inversión [USD]	-234.468.872	-237.546.966	-240.625.059	-243.703.152	-246.781.245	-249.859.338	-252.937.431	-256.015.524
Flujo de caja [USD]	-3.078.093							
TIR								
Tasa de descuento VAN								
VAN [USD]								

Tabla E.3: Flujo de caja para central utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Potencia neta [MW]		20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52
Factor de planta		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]		18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
Energía eléctrica vendida [MWh/año]		162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494
Precio de la energía [USD/MWh]		65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]		99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]		11.103	36.068	57.760	76.680	93.249	107.819	120.684	130.281
Precio CER [USD/ton CO2e]		5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]		6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]		330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]		9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]		42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]		5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]		10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125
Ingreso por potencia [USD]		1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848
Ingreso por venta de CER's [USD]		55.517	180.340	288.798	383.400	466.246	539.095	603.421	651.403
Ingreso por atributo verde [USD]		1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]		2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]		212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978
Ingreso total [USD]		14.891.179	15.016.002	15.124.460	15.219.062	15.301.908	15.374.757	15.439.083	15.487.065
Costos									
Costo general O&M [USD]		-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287
- Depreciación		-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593
Costo total [USD]		-16.894.880							
Utilidades antes de impuestos		-2.003.701	-1.878.877	-1.770.420	-1.675.818	-1.592.972	-1.520.123	-1.455.796	-1.407.815
Impuesto a las utilidades [25%]		0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos		-2.003.701	-1.878.877	-1.770.420	-1.675.818	-1.592.972	-1.520.123	-1.455.796	-1.407.815
+ Depreciación		6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593
Inversión excluyendo terreno [USD]	-153.589.817								
Inversión terreno [USD]	-758.609								
Inversión total [USD]	-154.348.426								
Recuperación de la inversión [USD]	-154.348.426	-150.208.534	-145.943.819	-141.570.646	-137.102.871	-132.552.251	-127.928.781	-123.240.985	-118.505.207
Flujo de caja [USD]	-154.348.426	4.139.892	4.264.715	4.373.173	4.467.775	4.550.621	4.623.470	4.687.796	4.735.778
TIR	-2,0%								
Tasa de descuento VAN	10%								
VAN [USD]	-112.530.821								

Tabla E.3: Flujo de caja para central utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral (continuación).

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Potencia neta [MW]	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	140.440	149.525	157.683	165.039	171.697	177.747	183.265	188.314	192.950
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125
Ingreso por potencia [USD]	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848
Ingreso por venta de CER's [USD]	702.199	747.624	788.415	825.194	858.486	888.737	916.326	941.572	964.751
Ingreso por atributo verde [USD]	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978
Ingreso total [USD]	15.537.861	15.583.286	15.624.077	15.660.856	15.694.148	15.724.400	15.751.988	15.777.234	15.800.414
Costos									
Costo general O&M [USD]	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287
- Depreciación	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593
Costo total [USD]	-16.894.880								
Utilidades antes de impuestos	-1.357.019	-1.311.594	-1.270.803	-1.234.024	-1.200.732	-1.170.480	-1.142.892	-1.117.646	-1.094.466
Impuesto a las utilidades [25%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos	-1.357.019	-1.311.594	-1.270.803	-1.234.024	-1.200.732	-1.170.480	-1.142.892	-1.117.646	-1.094.466
+ Depreciación	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593
Inversión excluyendo terreno [USD]									
Inversión terreno [USD]									
Inversión total [USD]									
Recuperación de la inversión [USD]	-113.718.634	-108.886.635	-104.013.845	-99.104.277	-94.161.416	-89.188.303	-84.187.603	-79.161.656	-74.112.529
Flujo de caja [USD]	4.786.574	4.831.999	4.872.790	4.909.569	4.942.861	4.973.112	5.000.701	5.025.947	5.049.126
TIR									
Tasa de descuento VAN									
VAN [USD]									

Tabla E.3: Flujo de caja para central utilizando RSM %dry, sin fabricación de lana mineral (continuación).

Año	18	19	20	21	22	23	24	25
Potencia neta [MW]	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52	20,52
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494	162.494
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	197.220	201.163	204.814	208.204				
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596	42.596
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos								
Ingreso por venta de energía [USD]	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125	10.562.125
Ingreso por potencia [USD]	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848	1.848
Ingreso por venta de CER's [USD]	986.098	1.005.814	1.024.071	1.041.020	0	0	0	0
Ingreso por atributo verde [USD]	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711	1.088.711
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978	212.978
Ingreso total [USD]	15.821.760	15.841.476	15.859.734	15.876.683	14.835.662	14.835.662	14.835.662	14.835.662
Costos								
Costo general O&M [USD]	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287	-10.751.287
- Depreciación	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593	-6.143.593
Costo total [USD]	-16.894.880							
Utilidades antes de impuestos	-1.073.119	-1.053.404	-1.035.146	-1.018.197	-2.059.218	-2.059.218	-2.059.218	-2.059.218
Impuesto a las utilidades [25%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidades después de impuestos	-1.073.119	-1.053.404	-1.035.146	-1.018.197	-2.059.218	-2.059.218	-2.059.218	-2.059.218
+ Depreciación	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593	6.143.593
Inversión excluyendo terreno [USD]								
Inversión terreno [USD]								
Inversión total [USD]								
Recuperación de la inversión [USD]	-69.042.056	-63.951.867	-58.843.420	-53.718.025	-49.633.650	-45.549.275	-41.464.900	-37.380.525
Flujo de caja [USD]	5.070.473	5.090.189	5.108.446	5.125.395	4.084.375	4.084.375	4.084.375	4.084.375
TIR								
Tasa de descuento VAN								
VAN [USD]								

Tabla E.4: Flujo de caja para central utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Potencia neta [MW]		20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10
Factor de planta		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]		18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18
Energía eléctrica vendida [MWh/año]		159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226
Precio de la energía [USD/MWh]		65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]		99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]		8.615	33.580	55.271	74.192	90.761	105.331	118.196	127.829
Precio CER [USD/ton CO2e]		5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]		6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]		330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]		9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]		32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]		5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]		8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]		10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661
Ingreso por potencia [USD]		1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810
Ingreso por venta de CER's [USD]		43.075	167.899	276.357	370.958	453.804	526.653	590.980	639.147
Ingreso por atributo verde [USD]		1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]		2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]		162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691
Ingreso por venta de lana mineral [USD]		8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso total [USD]		23.344.049	23.468.872	23.577.330	23.671.932	23.754.778	23.827.627	23.891.953	23.940.120
Costos									
Costo general O&M [USD]		-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019
Costo operación fabricación lana mineral [USD]		-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación		-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582
Costo total [USD]		-19.154.211							
Utilidades antes de impuestos		4.189.838	4.314.662	4.423.119	4.517.721	4.600.567	4.673.416	4.737.743	4.785.909
Impuesto a las utilidades [25%]		-1.047.459	-1.078.665	-1.105.780	-1.129.430	-1.150.142	-1.168.354	-1.184.436	-1.196.477
Utilidades después de impuestos		3.142.378	3.235.996	3.317.340	3.388.291	3.450.425	3.505.062	3.553.307	3.589.432
+ Depreciación		6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582
Inversión excluyendo terreno [USD]	-163.614.560								
Inversión terreno [USD]	-758.609								
Inversión total [USD]	-164.373.168								
Recuperación de la inversión [USD]	-164.373.168	-154.686.208	-144.905.629	-135.043.707	-125.110.834	-115.115.826	-105.066.182	-94.968.293	-84.834.278
Flujo de caja [USD]	-164.373.168	9.686.961	9.780.579	9.861.922	9.932.873	9.995.008	10.049.644	10.097.889	10.134.014
TIR	3,6%								
Tasa de descuento VAN	10%								
VAN [USD]	-73.259.982								

Tabla E.4: Flujo de caja para central utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral (continuación).

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Potencia neta [MW]	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	137.989	147.074	155.232	162.588	169.246	175.296	180.814	185.863	190.499
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661
Ingreso por potencia [USD]	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810
Ingreso por venta de CER's [USD]	689.943	735.368	776.159	812.938	846.230	876.481	904.070	929.316	952.496
Ingreso por atributo verde [USD]	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691
Ingreso por venta de lana mineral [USD]	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso total [USD]	23.990.916	24.036.341	24.077.132	24.113.911	24.147.204	24.177.455	24.205.043	24.230.290	24.253.469
Costos									
Costo general O&M [USD]	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019
Costo operación fabricación lana mineral [USD]	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582
Costo total [USD]	-19.154.211								
Utilidades antes de impuestos	4.836.705	4.882.130	4.922.922	4.959.700	4.992.993	5.023.244	5.050.832	5.076.079	5.099.258
Impuesto a las utilidades [25%]	-1.209.176	-1.220.533	-1.230.730	-1.239.925	-1.248.248	-1.255.811	-1.262.708	-1.269.020	-1.274.815
Utilidades después de impuestos	3.627.529	3.661.598	3.692.191	3.719.775	3.744.745	3.767.433	3.788.124	3.807.059	3.824.444
+ Depreciación	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582
Inversión excluyendo terreno [USD]									
Inversión terreno [USD]									
Inversión total [USD]									
Recuperación de la inversión [USD]	-74.662.167	-64.455.987	-54.219.213	-43.954.855	-33.665.528	-23.353.513	-13.020.806	-2.669.165	7.699.861
Flujo de caja [USD]	10.172.111	10.206.180	10.236.774	10.264.358	10.289.327	10.312.016	10.332.707	10.351.642	10.369.026
TIR									
Tasa de descuento VAN									
VAN [USD]									

Tabla E.4: Flujo de caja para central utilizando RSM %dry, con fabricación de lana mineral (continuación).

Año	18	19	20	21	22	23	24	25
Potencia neta [MW]	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226	159.226
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	194.768	198.712	202.363	205.753	0	0	0	0
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538	32.538
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos								
Ingreso por venta de energía [USD]	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661	10.349.661
Ingreso por potencia [USD]	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810	1.810
Ingreso por venta de CER's [USD]	973.842	993.558	1.011.815	1.028.765	0	0	0	0
Ingreso por atributo verde [USD]	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811	1.066.811
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000	2.970.000
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691	162.691
Ingreso por venta de lana mineral [USD]	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso total [USD]	24.274.816	24.294.531	24.312.789	24.329.738	23.300.973	23.300.973	23.300.973	23.300.973
Costos								
Costo general O&M [USD]	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019	-11.453.019
Costo operación fabricación lana mineral [USD]	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582	-6.544.582
Costo total [USD]	-19.154.211							
Utilidades antes de impuestos	5.120.605	5.140.321	5.158.578	5.175.527	4.146.763	4.146.763	4.146.763	4.146.763
Impuesto a las utilidades [25%]	-1.280.151	-1.285.080	-1.289.645	-1.293.882	-1.036.691	-1.036.691	-1.036.691	-1.036.691
Utilidades después de impuestos	3.840.454	3.855.240	3.868.934	3.881.645	3.110.072	3.110.072	3.110.072	3.110.072
+ Depreciación	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582	6.544.582
Inversión excluyendo terreno [USD]								
Inversión terreno [USD]								
Inversión total [USD]								
Recuperación de la inversión [USD]	18.084.898	28.484.720	38.898.237	49.324.464	58.979.119	68.633.773	78.288.428	87.943.082
Flujo de caja [USD]	10.385.036	10.399.823	10.413.516	10.426.228	9.654.654	9.654.654	9.654.654	9.654.654
TIR								
Tasa de descuento VAN								
VAN [USD]								

Tabla E.5: Flujo de caja para central utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Potencia neta [MW]		13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04
Factor de planta		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]		11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79
Energía eléctrica vendida [MWh/año]		103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278
Precio de la energía [USD/MWh]		65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]		99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]		34.328	44.029	52.458	59.811	66.249	71.911	76.911	80.193
Precio CER [USD/ton CO2e]		5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]		6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]		128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238
Precio procesado de residuos [USD/ton]		9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]		35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]		5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]		6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101
Ingreso por potencia [USD]		1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174
Ingreso por venta de CER's [USD]		171.638	220.145	262.291	299.053	331.247	359.557	384.554	400.963
Ingreso por atributo verde [USD]		691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]		1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]		175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152
Ingreso por venta de reciclables [USD]		2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520
Ingreso total [USD]		11.627.694	11.676.200	11.718.347	11.755.109	11.787.303	11.815.612	11.840.609	11.857.018
Costos									
Costo general O&M [USD]		-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101
Costo operación separación [USD]		-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714
- Depreciación		-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915
Costo total [USD]		-11.062.730							
Utilidades antes de impuestos		564.964	613.471	655.617	692.379	724.573	752.883	777.880	794.289
Impuesto a las utilidades [25%]		-141.241	-153.368	-163.904	-173.095	-181.143	-188.221	-194.470	-198.572
Utilidades después de impuestos		423.723	460.103	491.713	519.285	543.430	564.662	583.410	595.716
+ Depreciación		3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915
Inversión excluyendo terreno [USD]	-94.172.865								
Inversión terreno [USD]	-758.609								
Inversión total [USD]	-94.931.474								
Recuperación de la inversión [USD]	-94.931.474	-90.740.836	-86.513.818	-82.255.191	-77.968.992	-73.658.647	-69.327.071	-64.976.746	-60.614.115
Flujo de caja [USD]	-94.931.474	4.190.638	4.227.018	4.258.628	4.286.199	4.310.345	4.331.576	4.350.324	4.362.631
TIR	1,0%								
Tasa de descuento VAN	10%								
VAN [USD]	-55.711.795								

Tabla E.5: Flujo de caja para central utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral (continuación).

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Potencia neta [MW]	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	84.140	87.671	90.841	93.700	96.287	98.638	100.782	102.745	104.546
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101
Ingreso por potencia [USD]	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174
Ingreso por venta de CER's [USD]	420.702	438.354	454.206	468.498	481.435	493.191	503.912	513.723	522.730
Ingreso por atributo verde [USD]	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152
Ingreso por venta de reciclables [USD]	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520
Ingreso total [USD]	11.876.757	11.894.410	11.910.261	11.924.553	11.937.491	11.949.246	11.959.967	11.969.778	11.978.786
Costos									
Costo general O&M [USD]	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101
Costo operación separación [USD]	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714
- Depreciación	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915
Costo total [USD]	-11.062.730								
Utilidades antes de impuestos	814.028	831.680	847.532	861.824	874.761	886.517	897.238	907.048	916.056
Impuesto a las utilidades [25%]	-203.507	-207.920	-211.883	-215.456	-218.690	-221.629	-224.309	-226.762	-229.014
Utilidades después de impuestos	610.521	623.760	635.649	646.368	656.071	664.888	672.928	680.286	687.042
+ Depreciación	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915
Inversión excluyendo terreno [USD]									
Inversión terreno [USD]									
Inversión total [USD]									
Recuperación de la inversión [USD]	-56.236.680	-51.846.005	-47.443.442	-43.030.159	-38.607.174	-34.175.371	-29.735.528	-25.288.327	-20.834.371
Flujo de caja [USD]	4.377.436	4.390.675	4.402.563	4.413.282	4.422.986	4.431.802	4.439.843	4.447.201	4.453.957
TIR									
Tasa de descuento VAN									
VAN [USD]									

Tabla E.5: Flujo de caja para central utilizando RDF, sin fabricación de lana mineral (continuación).

Año	18	19	20	21	22	23	24	25
Potencia neta [MW]	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04	13,04
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278	103.278
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	106.205	107.737	109.156	110.474	0	0	0	0
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030	35.030
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5
Ingresos								
Ingreso por venta de energía [USD]	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101	6.713.101
Ingreso por potencia [USD]	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174	1.174
Ingreso por venta de CER's [USD]	531.025	538.687	545.782	552.368	0	0	0	0
Ingreso por atributo verde [USD]	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966	691.966
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152	175.152
Ingreso por venta de reciclables [USD]	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520
Ingreso total [USD]	11.987.081	11.994.742	12.001.837	12.008.424	11.456.056	11.456.056	11.456.056	11.456.056
Costos								
Costo general O&M [USD]	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101	-6.592.101
Costo operación separación [USD]	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714
- Depreciación	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915	-3.766.915
Costo total [USD]	-11.062.730							
Utilidades antes de impuestos	924.351	932.013	939.108	945.694	393.326	393.326	393.326	393.326
Impuesto a las utilidades [25%]	-231.088	-233.003	-234.777	-236.424	-98.331	-98.331	-98.331	-98.331
Utilidades después de impuestos	693.264	699.010	704.331	709.271	294.994	294.994	294.994	294.994
+ Depreciación	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915	3.766.915
Inversión excluyendo terreno [USD]								
Inversión terreno [USD]								
Inversión total [USD]								
Recuperación de la inversión [USD]	-16.374.193	-11.908.268	-7.437.023	-2.960.838	1.101.071	5.162.980	9.224.889	13.286.798
Flujo de caja [USD]	4.460.178	4.465.924	4.471.245	4.476.185	4.061.909	4.061.909	4.061.909	4.061.909
TIR								
Tasa de descuento VAN								
VAN [USD]								

Tabla E.6: Flujo de caja para central utilizando RDF, con fabricación de lana mineral.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Potencia neta [MW]		12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63
Factor de planta		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]		11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42
Energía eléctrica vendida [MWh/año]		100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010
Precio de la energía [USD/MWh]		65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]		99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]		31.899	41.600	50.029	57.382	63.820	69.482	74.482	77.800
Precio CER [USD/ton CO2e]		5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]		6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]		128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238
Precio procesado de residuos [USD/ton]		9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]		24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]		5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]		8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]		6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637
Ingreso por potencia [USD]		1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137
Ingreso por venta de CER's [USD]		159.493	207.999	250.146	286.908	319.102	347.411	372.409	388.999
Ingreso por atributo verde [USD]		670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]		1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]		124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865
Ingreso por venta de lana mineral [USD]		8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso por venta de reciclables [USD]		2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520
Ingreso total [USD]		20.080.860	20.129.366	20.171.513	20.208.275	20.240.469	20.268.778	20.293.776	20.310.365
Costos									
Costo general O&M [USD]		-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066
Costo operación separación [USD]		-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714
Costo operación fabricación lana mineral [USD]		-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación		-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609
Costo total [USD]		-13.180.999							
Utilidades antes de impuestos		6.899.861	6.948.367	6.990.514	7.027.276	7.059.470	7.087.779	7.112.776	7.129.366
Impuesto a las utilidades [25%]		-1.724.965	-1.737.092	-1.747.628	-1.756.819	-1.764.868	-1.771.945	-1.778.194	-1.782.342
Utilidades después de impuestos		5.174.896	5.211.275	5.242.885	5.270.457	5.294.603	5.315.834	5.334.582	5.347.025
+ Depreciación		4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609
Inversión excluyendo terreno [USD]	-102.915.231								
Inversión terreno [USD]	-758.609								
Inversión total [USD]	-103.673.840								
Recuperación de la inversión [USD]	-103.673.840	-94.382.335	-85.054.450	-75.694.956	-66.307.889	-56.896.677	-47.464.234	-38.013.042	-28.549.408
Flujo de caja [USD]	-103.673.840	9.291.505	9.327.885	9.359.495	9.387.066	9.411.212	9.432.444	9.451.192	9.463.634
TIR		7,7%							
Tasa de descuento VAN		10%							
VAN [USD]		-18.148.971							

Tabla E.6: Flujo de caja para central utilizando RDF, con fabricación de lana mineral (continuación).

Año	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Potencia neta [MW]	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	81.748	85.278	88.448	91.307	93.894	96.245	98.390	100.352	102.153
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos									
Ingreso por venta de energía [USD]	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637
Ingreso por potencia [USD]	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137
Ingreso por venta de CER's [USD]	408.738	426.390	442.241	456.534	469.471	481.227	491.948	501.758	510.766
Ingreso por atributo verde [USD]	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865
Ingreso por venta de lana mineral [USD]	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso por venta de reciclables [USD]	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520
Ingreso total [USD]	20.330.105	20.347.757	20.363.608	20.377.901	20.390.838	20.402.594	20.413.314	20.423.125	20.432.133
Costos									
Costo general O&M [USD]	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066
Costo operación separación [USD]	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714
Costo operación fabricación lana mineral [USD]	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609
Costo total [USD]	-13.180.999								
Utilidades antes de impuestos	7.149.106	7.166.758	7.182.609	7.196.902	7.209.839	7.221.595	7.232.315	7.242.126	7.251.134
Impuesto a las utilidades [25%]	-1.787.276	-1.791.689	-1.795.652	-1.799.225	-1.802.460	-1.805.399	-1.808.079	-1.810.532	-1.812.783
Utilidades después de impuestos	5.361.829	5.375.068	5.386.957	5.397.676	5.407.379	5.416.196	5.424.237	5.431.595	5.438.350
+ Depreciación	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609
Inversión excluyendo terreno [USD]									
Inversión terreno [USD]									
Inversión total [USD]									
Recuperación de la inversión [USD]	-19.070.970	-9.579.292	-75.726	9.438.559	18.962.548	28.495.353	38.036.199	47.584.403	57.139.362
Flujo de caja [USD]	9.478.438	9.491.678	9.503.566	9.514.285	9.523.988	9.532.805	9.540.846	9.548.204	9.554.959
TIR									
Tasa de descuento VAN									
VAN [USD]									

Tabla E.6: Flujo de caja para central utilizando RDF, con fabricación de lana mineral (continuación).

Año	18	19	20	21	22	23	24	25
Potencia neta [MW]	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63	12,63
Factor de planta	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme [MW]	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42
Energía eléctrica vendida [MWh/año]	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010	100.010
Precio de la energía [USD/MWh]	65	65	65	65	65	65	65	65
Precio nudo de potencia [USD/kW]	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6
CER's [ton CO2e/año]	103.812	105.345	106.764	108.081	0	0	0	0
Precio CER [USD/ton CO2e]	5	5	5	5	5	5	5	5
Precio atributo verde [USD/MWh]	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Toneladas de residuos procesadas [ton/año]	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238	128.238
Precio procesado de residuos [USD/ton]	9	9	9	9	9	9	9	9
Toneladas de vitrificado sin tratar [ton/año]	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973	24.973
Precio vitrificado sin tratar [USD/ton]	5	5	5	5	5	5	5	5
Toneladas de lana mineral producidas [ton/año]	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750	8.750
Precio lana mineral [USD/ton]	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ingresos								
Ingreso por venta de energía [USD]	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637	6.500.637
Ingreso por potencia [USD]	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137
Ingreso por venta de CER's [USD]	519.061	526.723	533.818	540.404	0	0	0	0
Ingreso por atributo verde [USD]	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066	670.066
Ingreso por tratamiento de residuos [USD]	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142	1.154.142
Ingreso por venta de vitrificado sin tratar [USD]	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865	124.865
Ingreso por venta de lana mineral [USD]	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000	8.750.000
Ingreso por venta de reciclables [USD]	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520	2.720.520
Ingreso total [USD]	20.440.428	20.448.090	20.455.184	20.461.771	19.921.367	19.921.367	19.921.367	19.921.367
Costos								
Costo general O&M [USD]	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066	-7.204.066
Costo operación separación [USD]	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714	-703.714
Costo operación fabricación lana mineral [USD]	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609	-1.156.609
- Depreciación	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609	-4.116.609
Costo total [USD]	-13.180.999							
Utilidades antes de impuestos	7.259.429	7.267.091	7.274.185	7.280.772	6.740.368	6.740.368	6.740.368	6.740.368
Impuesto a las utilidades [25%]	-1.814.857	-1.816.773	-1.818.546	-1.820.193	-1.685.092	-1.685.092	-1.685.092	-1.685.092
Utilidades después de impuestos	5.444.572	5.450.318	5.455.639	5.460.579	5.055.276	5.055.276	5.055.276	5.055.276
+ Depreciación	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609	4.116.609
Inversión excluyendo terreno [USD]								
Inversión terreno [USD]								
Inversión total [USD]								
Recuperación de la inversión [USD]	66.700.543	76.267.470	85.839.719	95.416.907	104.588.792	113.760.677	122.932.562	132.104.447
Flujo de caja [USD]	9.561.181	9.566.927	9.572.248	9.577.188	9.171.885	9.171.885	9.171.885	9.171.885
TIR								
Tasa de descuento VAN								
VAN [USD]								

