



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS DOMICILIARIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICO

CLAUDIA TAMARA FAÚNDEZ ARAVENA

PROFESOR GUÍA:

MARÍA ELENA LIENQUEO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ÁLVARO OLIVERA NAPPA

FRANCISCO GRACIA CAROCA

SANTIAGO DE CHILE

2018

EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS DOMICILIARIOS

La gestión de residuos y la crisis económica se han transformado en un desafío en la actualidad, debido al crecimiento económico, el incremento de la capacidad productiva y el aumento de la población. Chile está promoviendo una nueva gestión de residuos a través de la ley 20.920 que establece un marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Además, el país busca aumentar la matriz energética en Energías Renovables No Convencionales (ERNC) a un 70% para el 2050.

La memoria se enmarca en el aprovechamiento de residuos sólidos domiciliarios segregados en la Región Metropolitana, pues es ahí donde se concentra el 40% de la población, por lo tanto, los residuos domiciliarios se encuentran concentrados en esta zona. Actualmente, parte de los residuos orgánicos son aprovechados en los rellenos sanitarios mediante pozos de captación de biogás, sin embargo, el proceso no es eficiente. El proceso sería más eficiente si los residuos fueran segregados desde su origen, por lo que, el presente trabajo pretende abordar esta situación que se podría dar en el futuro, a pesar de que hoy en día la mayor dificultad para proyectos en materia residuos es la capacidad de segregación de ellos.

El caso base corresponde a las 19 comunas de la región que llevan sus residuos al relleno sanitario Santa Marta. Según proyecciones, en 10 años se alcanzaría un flujo de 101.544 [ton/mes] y con ello la planta de generación de energía tendría una potencia instalada de 107 MW.

El proceso consiste en una línea principal, de recepción, molienda, transporte y digestión de residuos orgánicos, almacenamiento, enfriamiento, adsorción y cogeneración a partir de biogás, junto a la filtración de los gases de combustión. Como líneas secundarias se encuentran la filtración de digestato y recuperación de agua en el proceso, además de la recuperación de calor en el cogenerador para usarlo en la digestión a través de intercambiadores de calor.

De la evaluación técnica y económica de la planta se obtiene que el proyecto es prefactible. Con un rendimiento de 211 [m³ biogás/ ton materia orgánica] junto a un VAN de 3.435.703 [USD], una TIR del 14% y un Payback de 5 años.

Si bien, el proyecto podría ser rentable, del análisis de sensibilidad se rescata la variación en su rentabilidad principalmente frente a la capacidad de segregación de los residuos, el precio de la energía eléctrica y el precio del carbón activado.

Además, para que el proyecto sea sostenible se debe considerar la normativa vigente, la comunidad afectada y el impacto ambiental del proyecto.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Contexto.....	1
1.1.1. Estudios previos	2
1.1.2. Justificación	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
2. Marco conceptual	5
2.1. Residuos.....	5
2.2. Contexto nacional de los residuos sólidos.....	5
1.2.1. Caracterización de residuos orgánicos.....	6
1.2.2. Ley 20.920.....	6
2.3. Tecnologías de reciclaje de residuos orgánicos.....	7
2.4. Tratamiento de biogás	10
2.5. Tecnologías de generación.....	11
3. Metodología	13
4. Contexto.....	14
4.1. Caracterización y disponibilidad de residuos orgánicos.....	14
4.2. Localización	16
5. Evaluación técnica	18
5.1. Caso Base	18
5.2. Diagramas del proceso	18
5.3. Balance de masa y energía	21
5.4. Dimensionamiento de los equipos	24
5.5. Distribución de los equipos en planta	25
6. Evaluación económica	27
6.1. Costos de inversión	27
6.2. Costos de operación	28
6.3 Ingresos	29
6.4. Flujo de caja	29
6.5. Análisis de sensibilidad.....	30

Segregación de residuos.....	30
Horizonte de evaluación.....	31
Precio energía eléctrica.....	32
Precio potencia eléctrica	33
Precio Carbón activado	34
7. Estudio de sostenibilidad.....	35
7.1. Estudio político	35
7.2. Estudio ecológico.....	35
6.3. Estudio cultural	36
8. Discusiones	37
9. Conclusiones y recomendaciones.....	40
Recomendaciones	40
10. Bibliografía	42
11. Anexos	50
Anexo A: Caracterización de residuos orgánicos	50
Anexo B: Descripción jerarquía en la gestión de residuos.....	51
Anexo C: Tecnologías aeróbicas	52
Anexo D: Disposición de RSD en la RM.....	54
Anexo E: Proyección generación de residuos	57
Anexo F: Ejemplo de cálculo balance de masa y energía	57
Anexo G: Dimensionamiento	59
Anexo G.1: Tanque almacenador	59
Anexo G.2: Tornillo sin fin	59
Anexo G.3: Molino.....	62
Anexo G.4: Mezclador.....	62
Anexo G.5: Estanque de almacenamiento	62
Anexo G.6: Digestor	63
Anexo G.7: Serpentin.....	65
Anexo G.8: Filtro	67
Anexo G.9: Gasómetro.....	68
Anexo G.10: Condensador.....	69
Anexo G.11: Adsorbedor	74
Anexo G.12: Cogenerador	76
Anexo H: Capex.....	77

Anexo I: Organización de la empresa	79
Anexo J: Opex	81
Anexo K: Flujo de caja	84

Índice de Figuras

Figura 1: Estrategia jerárquica en la gestión de residuos.....	7
Figura 2: Proceso de descomposición anaeróbica.....	7
Figura 3: RSD en depósitos sanitarios de la RM 2016.....	14
Figura 4: Localización RSSM y comunas.....	17
Figura 5: Diagrama de bloques del proceso productivo	19
Figura 6: Diagrama de flujo del proceso.....	20
Figura 7: Layout Planta de generación de energía.....	25
Figura 8: Organigrama de la empresa.....	28
Figura 9: Análisis del VAN según la segregación de residuos	30
Figura 10: Análisis del VAN según el horizonte de evaluación	31
Figura 11: Análisis del VAN según el precio de la energía eléctrica	32
Figura 12: Análisis del VAN según el precio de la potencia eléctrica	33
Figura 13: Análisis del VAN según el precio del carbón activado.....	34
Figura 14: Proceso de compostaje.....	52
Figura 15: Toneladas de RSD al año por habitante 2007-2016	56
Figura 16: Variación másica de la digestión.....	64
Figura 17: Geometría arreglo cuadrado de tubos.....	70
Figura 18: Balance de masa adsorción	75

Índice de Tablas

Tabla 1: Composición de los residuos domiciliarios al año 2009 (CONAMA, 2010)	5
Tabla 2: Factores de conversión de biogás.....	8
Tabla 3: Datos de desempeño energético (AChEE, 2010).....	12
Tabla 4: Caracterización de residuos orgánicos según Nivel socioeconómico	14
Tabla 5: Propiedades de residuos orgánicos de RSD (Tchobanoglous, Theissen y Eliassen, 1982).....	15
Tabla 6: Típicas distancias de separación	16
Tabla 7: Cuantificación Caso Base para relleno Santa Marta	18
Tabla 8: Composición de flujos	20
Tabla 9: Densidad de compuestos	21
Tabla 10: Resumen balance de masa.....	21
Tabla 11: Resumen Balance de energía	23
Tabla 12: Resumen dimensionamiento	24
Tabla 13: Costo de equipos primarios.....	27
Tabla 14: Costos de operación.....	28
Tabla 15: Caso base flujo de caja	29
Tabla 16: Análisis de sensibilidad de la segregación de residuos.....	30
Tabla 17: Análisis de sensibilidad del horizonte de evaluación	31
Tabla 18: Análisis de sensibilidad del precio de la energía eléctrica.....	32
Tabla 19: Análisis de sensibilidad del precio de la potencia eléctrica	33
Tabla 20: Análisis de sensibilidad del precio de carbón activado.....	34
Tabla 21: Residuos de biomasa seca por rubro	50
Tabla 22: Residuos de biomasa húmeda por rubro.....	51
Tabla 23: Tasa de ingreso de residuos por comunas en RSLLC 2016	54
Tabla 24: Tasa de ingreso de residuos por comunas en RSSM 2016	55
Tabla 25: Proyección generación de residuos.....	57
Tabla 26: Resumen Balance de masa	58
Tabla 27: Dimensionamiento tanque almacenador de residuos.....	59
Tabla 28: Cálculos de capacidad equivalente	60
Tabla 29: Cálculos de revoluciones por minuto.....	60
Tabla 30: Cálculos de potencia para superar la fricción.....	61
Tabla 31: Cálculos de potencia para mover el material.....	61
Tabla 32: Dimensionamiento tornillo sin fin	62
Tabla 33: Dimensionamiento del Molino	62
Tabla 34: Composición volumétrica del Biogás.....	63
Tabla 35: Datos para cinética termofílica (Fernández, 2008).....	63
Tabla 36: Datos de salida del reactor	64
Tabla 37: Datos chaqueta de calentamiento	65
Tabla 38: Datos filtro de hoja.....	68
Tabla 39: Coeficiente de calor específico biogás	69
Tabla 40: Resultados para el caso en el que el biogás pasa por los tubos.....	71

Tabla 41: Resultados para el caso en el que el glicol pasa por los tubos	72
Tabla 42: Propiedades del Glicol.....	72
Tabla 43: Propiedades del Biogás.....	73
Tabla 44: Características Biogás.....	76
Tabla 45: Conversión motor de combustión interna	76
Tabla 46: Costos de equipos primarios	77
Tabla 47: Capex	78
Tabla 48: Opex al 2018	82
Tabla 49: Flujo para el financiamiento del proyecto	84
Tabla 50: Depreciaciones a los 10 años	84
Tabla 51: Flujo de caja esperado	85

1.Introducción

1.1. Contexto

En los últimos años, a nivel mundial en el rubro energético se ha dado gran importancia a la generación de energía renovable no convencional (ERNC), tales como centrales hidroeléctricas, proyectos que aprovechen la energía de la biomasa, la hidráulica, la geotérmica la solar, la eólica, de los mares, entre otras. En Chile, este incremento de las ERNC; se debe a la variación de los precios del petróleo y su alta dependencia; al problema del cambio climático, principalmente afectado, por los gases efecto invernadero (GEI) de los combustibles fósiles; y a la necesidad del país de controlar la dependencia de su matriz energética ([Paneque, Román-Figueroa, Vásquez-Panizza, Arriaza, Morales y Zulantay, 2011](#)).

El 2015 Chile se comprometió en la Asamblea General de la ONU a tomar medidas para reducir un 30% sus emisiones de GEI al año 2030. Entre estas medidas, se encuentran el incentivo de usos de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), donde se busca aumentar a un 60% su uso para el año 2035 y a un 70% para el 2050 ([Ministerio de Energía, 2016](#); [MMA, 2015](#)).

Por otro lado, una de las posibles materias primas para la producción de energía actualmente genera un gran problema medioambiental, la biomasa residual (o materia orgánica residual), debido a la precaria gestión de los residuos. Solo en los últimos años se han emitido nuevas normativas que permiten que las industrias se hagan cargo de sus emisiones.

Desde el 2010 la ley N°20.257 obliga a las empresas generadoras de electricidad, con capacidad instalada superior a 200 MW, a comercializar un 10% de energía proveniente de fuentes renovables no convencionales o de centrales hidroeléctricas con potencia inferior a 40 mil KW ([Ley 20.257, 2013](#)).

Mientras a nivel municipal se ha promovido la separación de residuos por parte de la población, sin embargo, no se ha avanzado suficiente en materia orgánica, actualmente lo que más se recicla en este ámbito es el aceite usado para producir biodiesel ([CONAMA, 2010](#)).

El desarrollo económico y el crecimiento de la población en los últimos años, ha provocado un aumento sostenido en el consumo de bienes y con ello un incremento en la generación de residuos. Junto al manejo inadecuado de estos residuos se generan impactos negativos en la salud de las personas y el medio ambiente como ([CEPAL, 2016](#)):

- Deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas por escurrimiento de los lixiviados de los residuos.

- Alteración en la composición de la atmósfera, por emisiones gaseosas que contienen gases de efecto invernadero.
- Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos, generando erosión y acidez que alteran el uso de la tierra.
- A causa de la contaminación del agua, el aire y los suelos, se pueden generar cambios en la biodiversidad del planeta, afectando flora y fauna del ecosistema.

El aprovechamiento de los residuos orgánicos domiciliarios tiene diversas aplicaciones, no solo en el ámbito energético. Estas aplicaciones consisten principalmente en el reciclaje, las más conocidas son las tecnologías de descomposición aeróbica y anaeróbica para producir compostaje y biogás respectivamente, por otro lado, están las tecnologías de Incineración para producir calor y energía eléctrica esencialmente y la técnica de gasificación para generar gas de síntesis, una mezcla de gases combustible (Cueto, 2017).

Sin embargo, no todas las tecnologías de aprovechamiento de biomasa son compatibles con el medio ambiente. La descomposición aeróbica y anaeróbica son procesos que se pueden desarrollar de forma natural y se caracterizan por no generar grandes emisiones de contaminantes, más adelante se profundizará en este tema.

Los residuos sólidos domiciliarios están agrupados en las zonas urbanas de Chile, principalmente en la Región Metropolitana, según el censo del 2012, 40% de la población de Chile vive en la región Metropolitana (Labbé y Carrasco, 2012), por lo que en esta región es donde se concentra la mayor cantidad de residuos domiciliarios del país.

Además, según registros del sistema interconectado central, en la zona central de Chile la potencia instalada es de 17.334 MW, la cual corresponde a aproximadamente al 76% de la potencia total del país. Cerca del 84% del suministro de energía proviene de energía hidráulica, gas natural, carbón y diésel; mientras solo el 2,6% del suministro proviene de biomasa (CNE, 2017).

Debido a lo señalado, el estudio se centra en la producción de biogás a partir de residuos domiciliarios de la provincia de Santiago, para generar energía eléctrica que se inyectará al SIC.

1.1.1. Estudios previos

En el ámbito de producción de biogás en Chile, existen estudios a nivel global sobre el potencial de producción de biogás a partir de la variedad de biomasa disponible en el país (Chamy y Vivanco, 2007), además de los impactos económicos, sociales y ambientales (Paneque et al., 2011). Y con el fin de fomentar este rubro, existe un manual para la producción de biogás en Chile (Varnero, 2011).

En materia de residuos domiciliarios, la normativa chilena señala que todo proyecto de Relleno Sanitario, con depósitos de altura superior a 3 metros, deberá contemplar un sistema de manejo de biogás diseñado mediante una proyección de la cantidad de biogás que se genere, asegurando condiciones de seguridad adecuadas en el interior de la instalación y en sus alrededores (Decreto 189, 2008).

También, hay estudios a nivel local sobre el potencial de producción de biogás, enmarcado en distintas situaciones.

Se han evaluado distintas tecnologías de reciclaje de residuos orgánicos, específicamente de poda y jardinería, comparando tecnologías aeróbicas, anaeróbicas, gasificación, incineración y de disposición permanente; obteniendo por medio de una evaluación económica, social y ambiental que la tecnología aeróbica de compostaje en un reactor PFR es la opción más conveniente (Cueto, 2017).

También, se han realizado evaluaciones técnico económicas de plantas productivas de biogás para autoabastecimiento energético, cuyos indicadores económicos son favorables con un VAN de 807.668 [USD] y TIR de 21%. Sin embargo, el análisis de sensibilidad revela que existen factores de operación que afectan la rentabilidad, como el precio de la energía, del digestato, el ahorro energético real, las horas de operación, los costos de inversión y la logística de transporte (Carrasco, 2015).

1.1.2. Justificación

El uso de biocombustibles genera menos emisiones de GEI que los combustibles fósiles, por lo que su impacto al cambio climático es menor. Además, a nivel mundial el consumo de energía en los últimos años ha aumentado constantemente, debido principalmente al incremento de la capacidad productiva de los países, el mayor tamaño del sector transporte y un aumento de la población mundial. Por lo que, Chile propone aumentar el uso de combustibles de bajas emisiones de GEI en la matriz en un 70% para el 2050 (Ministerio de Energía, 2016).

Si bien, los estudios previos han contribuido a aumentar la matriz energética de ERNC, el presente trabajo pretende fomentar la generación de energía a partir de residuos domiciliarios segregados, apuntando a la sensibilización de la población sobre el medio ambiente y a promover las iniciativas de reciclaje por parte del municipio.

El estudio, solo se enfocará en procesos de reciclaje de residuos orgánicos, debido a que la valorización para materia orgánica residual es costosa y los impactos al medio ambiente son mayores que el reciclaje, según la jerarquía de residuos (Ley 20.920, 2016).

Además, es necesario destacar que las condiciones de temperatura en la Región Metropolitana son óptimas para el desarrollo de biogás (FAO, 2013; Varnero, 2014).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la prefactibilidad técnico económica de una planta de generación de energía eléctrica a partir del uso exclusivo de residuos domiciliarios orgánicos en la Región Metropolitana.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Localizar la disponibilidad de residuos orgánicos domiciliarios en la Región Metropolitana
2. Definir caso base de los residuos orgánicos generados y la localización de la planta para su tratamiento.
3. Evaluar técnicamente el proyecto, mediante su diseño y dimensionamiento.
4. Evaluar económicamente el proyecto y realizar análisis de sensibilidad.
5. Estudiar la sostenibilidad del proyecto, mediante un análisis política, ecológica y cultural.

2. Marco conceptual

2.1. Residuos

Según la Comisión Nacional del Medio Ambiente, los residuos se definen como: “sustancia u objeto que se elimina o valoriza” (CONAMA, 2010).

Los residuos se pueden clasificar de acuerdo a su composición química, en orgánicos e inorgánicos; de acuerdo a su peligrosidad en peligrosos y no peligrosos, y de acuerdo a su origen en domiciliarios e industriales (CONAMA, 2010; CEPAL, 1998).

Para el desarrollo de este trabajo, es importante identificar los residuos orgánicos, no peligrosos y de origen domiciliario. Los residuos orgánicos provienen de un ser vivo, animal o vegetal. Mientras los residuos domiciliarios son generados en los hogares y sus asimilables, como los residuos generados en vías públicas, el comercio, oficinas, edificios e instituciones tales como escuelas entre otros, los cuales son considerados residuos no peligrosos.

2.2. Contexto nacional de los residuos sólidos

A nivel nacional, se estima que la generación de residuos aumentó en un 30% entre los años 2000 y 2009, con un crecimiento anual cercano al 2,5%. El año 2009 se generaron 16,9 millones de toneladas de residuos sólidos en el país, de los cuales aproximadamente 60% proviene de residuos industriales y 40% de municipales (CONAMA, 2010).

La gestión de los residuos domiciliarios en Chile es responsabilidad de las respectivas municipalidades. La cual es regulada y fiscalizada por parte del Estado, sin embargo, se requieren normativas adicionales que permitan abordar la gestión de los residuos de manera integral.

Del total de residuos municipales generados en 2009, se estima que 60% fueron depositados en rellenos sanitarios, 20% en vertederos, y 20% restante en basurales o lugares de disposición final que no cumplen con ninguna reglamentación sanitaria (CONAMA, 2010).

La composición de los residuos sólidos municipales se muestra en la Tabla 1, donde se observa que aproximadamente 53% de los residuos municipales corresponden a residuos orgánicos.

Tabla 1: Composición de los residuos domiciliarios al año 2009 (CONAMA, 2010)

Tipo de residuo	Composición [%]
Papeles y Cartones	12,4
Textiles	2,0
Plásticos	9,4
Vidrios	6,6

Metales	2,3
Orgánicos	53,3
Otros	14,0

En cuanto a la valorización de los residuos en Chile, entre los años 2000 y 2009 la tasa de valorización aumentó en un 24%, pero estos corresponden principalmente compuestos metálicos. Al 2009, el aceite usado tiene una tasa de valorización del 55% con respecto a total de los residuos emitidos de aceite, mientras el resto de los residuos orgánicos presentan una tasa de valorización menor al 10% (CONAMA, 2010).

1.2.1. Caracterización de residuos orgánicos

Los residuos orgánicos se pueden caracterizar a partir de los rubros productivos, estos corresponden a: el rubro forestal, agrícola, agroindustrial, ganadero, residuos domiciliarios e industriales en general (Ver Anexo A: Caracterización de residuos orgánicos).

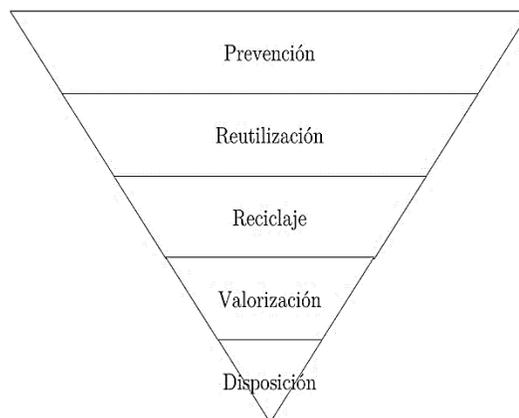
Los residuos de actividades forestales y agrícolas se encuentran dispersos dentro del país. Mientras la actividad ganadera se encuentra menos dispersa, la crianza avícola se centra en el norte de Chile y la crianza de vacuno y porcino en el sur (Chamy y Vivanco, 2007).

Los residuos industriales, se encuentran en general dispersos a excepción de la agroindustria que se encuentran agrupados, sin embargo, estos residuos pueden tener usos alternativos en los mismos rubros o en otros; además Chile cuenta con un reglamento sobre el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), al cual las industrias pueden someterse para ser evaluadas (SEA, 2013).

Mientras los residuos domiciliarios están agrupados en las zonas urbanas de Chile, principalmente en la Región Metropolitana, donde se encuentra su capital (Labbé et al., 2012).

1.2.2. Ley 20.920

El Ministerio del Medio Ambiente el 2016, promulgó la ley 20.920 que establece un marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje, donde se promueve la jerarquía en el manejo de residuos. La primera alternativa es la prevención en la generación de residuos y, si ello no es posible, fomentar en segundo lugar la reducción, luego la reutilización, el reciclaje, la valorización energética, finalmente el tratamiento y la disposición final de los mismos, como última alternativa (Ley 20.920, 2016).



En la Figura 1 se muestra la estrategia jerárquica en la gestión de residuos, ver Anexo B: Descripción jerarquía en la gestión de residuos.

2.3. Tecnologías de reciclaje de residuos orgánicos

El estudio se centrará en las tecnologías de reciclaje, debido a que la valorización energética para materia orgánica residual es costosa y los impactos al medio ambiente son mayores que el reciclaje.

Las tecnologías de reciclaje de residuos orgánicos, corresponde a las tecnologías aeróbicas para producir compost o hummus (Ver Anexo C: Tecnologías aeróbicas) y las anaeróbicas para producir Biogás. Como ya se mencionó en esta memoria, se abordará el proceso productivo del biogás. A continuación, se detalla el proceso de la digestión y las tecnologías utilizadas.

1. Proceso de descomposición anaeróbico

La fermentación, es el proceso de descomposición anaeróbica de residuos orgánicos de origen animal o vegetal, generando digestato (o bioabono) y biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), como se muestra en la Figura 2.

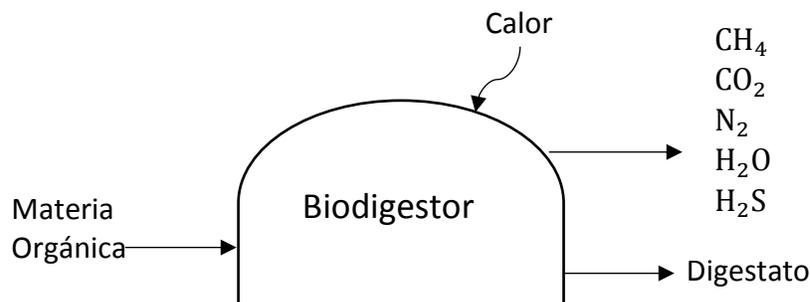


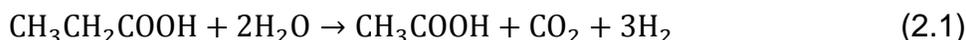
Figura 2: Proceso de descomposición anaeróbica

La producción de biogás se desarrolla de acuerdo a las siguientes etapas (Varnero, 2011):

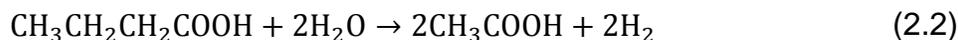
1. Hidrólisis: En esta etapa se degradan macromoléculas, como proteínas, lípidos y carbohidratos en monómeros y dímeros, gracias a la acción enzimática de celulasa, amilasa, proteasa o lipasa, además se solubilizan partículas insolubles.
2. Acidogénesis: En esta etapa los monómeros y dímeros obtenidos en la hidrólisis son transformados por microorganismos en ácido acético, hidrógeno, dióxido de carbono y otros ácidos orgánicos de bajo peso molecular, además de ácido pirúvico que se puede transformar en ácido acético, propiónico, butírico u otro, dependiendo de los microorganismos que actúen.

3. Acetogénesis: Los productos de la etapa anterior son transformados, principalmente, en dióxido de carbono, hidrógeno, ácido acético, además de los ácidos propiónico, butírico y valérico. Los microorganismos más importantes son *Syntrophobacter wolinii* y *Syrophomonas wolfei*, quienes descomponen ácidos a propionato y butirato, correspondientemente, como se observa en las siguientes reacciones.

Ácido propiónico:

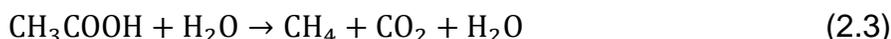


Ácido Butírico:



4. Metanogénesis: Etapa en la que termina el proceso de fermentación, donde actúan microorganismos específicos, del dominio Archaea. La mayor generación de metano proviene desde ácidos grasos volátiles, como los ácidos propiónico y butírico; el resto se obtiene la metanogénesis del dióxido de carbono e hidrógeno, como se observa en las siguientes reacciones.

Acetato



Dióxido de carbono/Hidrógeno



En la Tabla 2 se muestran las conversiones estimadas para cada tipo de residuos, de acuerdo a referencias bibliográficas ([Chamy y Vivanco, 2007](#)).

Tabla 2: Factores de conversión de biogás

Tipo de biomasa	Conversión	Unidades	% Metano en biogás
Riles	500	m ³ biogás/ton DQO degradado	0,60
Desmalezado Y poda	270	m ³ biogás/ton residuo	0,70
Cultivo de temporada			
Trigo	500	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,60
Maíz	700	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,60
Papa	700	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,60
Raps	200	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,60
Remolacha	500	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,60
Residuos sólidos domiciliarios	850	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,50
Grasas	430	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,70
Tratamiento anaeróbico aguas residuales urbanas	480	m ³ biogás/ton DQO degradado	0,63
Lodos planta de tratamiento de agua	550	m ³ biogás/ton materia orgánica	0,62
Estiércol vacuno	500	m ³ biogás/ton DQO degradado	0,60
Estiércol avícola	520	m ³ biogás/ton DQO degradado	0,58
Estiércol porcino	480	m ³ biogás/ton DQO degradado	0,62

2. Tipo de tecnologías de fermentación

Las tecnologías de digestión anaeróbica se pueden clasificar de acuerdo a su concentración de sólidos en las siguientes ([Environment Canada, 2013](#)).

Biodigestión húmeda: La humedad de la materia orgánica debe ser de al menos 80%, tales como lodos activados o Riles de diferentes rubros. Los cuales necesitan de un pretratamiento que consiste en triturar el material hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 5 cm de diámetro, remover sólidos flotantes y material precipitado. Además, para mantener la humedad del residuo se añade 0,5 m³ de agua por tonelada de residuo.

Se usan reactores continuos, generalmente CSTR, con un tiempo de residencia de 14 a 40 días.

El contenido de humedad del digestato es entre 70 y 90%, por lo que requiere ser deshidratado antes de compostar, hasta una humedad del 50% usando prensas filtro o tornillo, pudiendo recircular el agua al proceso. Mientras el biogás producido puede generar de 110 a 160 [kWh] por tonelada de biomasa húmeda.

En este proceso los costos de implementación resultan más caro, debido a la necesidad de usar equipos para separar sólidos flotantes y material precipitado, en el pretratamiento. Además, se requiere de equipos con mayor volumen por el exceso de agua contenido, pero por otro lado hay menor pérdida de carga en el transporte.

Biodigestión semiseca: La humedad de los residuos debe estar entre 60 y 80%, como residuos de alimentos procesados. Al igual que la biodigestión húmeda, el proceso requiere reducir el tamaño de partícula del material a menos de 5 cm de diámetro. Y para mantener la humedad se añade 0,1 m³ por tonelada de residuo.

Se usan reactores continuos o batch con un tiempo de residencia de 14 a 30 días.

El contenido de humedad del digestato es entre 70 y 90%, por lo que requiere ser deshidratado antes de compostar, hasta una humedad del 50%. El biogás producido puede generar de 145 a 220 [kWh] por tonelada de biomasa húmeda.

El costo de inversión es menor que en el proceso húmedo, porque el pretratamiento es más simple, pero la capacidad de los equipos es mayor que en el proceso seco, por la cantidad de agua. Por otro lado, al tener más fluidez el material se ahorra en pérdidas de carga.

Biodigestión seca: La humedad del material debe ser menor al 60%, como residuos domiciliarios o de poda y jardinería. En este caso no se requiere un tamaño de partícula muy pequeño, este solo debe ser inferior a 20 cm. Además, se le debe adicionar 0,05 m³ de agua por tonelada de residuo.

En general el modo de operación es batch, con un tiempo de retención de 14 a 30 días, también se ocupan reactores flujo pistón (PFR), pero los CSTR no se usan por la dificultad de agitación con material viscoso.

El contenido de humedad del digestato es entre un 50 y 60% en peso, por lo que no requiere deshidratación antes de compostar. El biogás generado puede producir entre 170 y 250 [kWh] por tonelada de residuo.

El costo de inversión es menor que para los casos anteriores, porque el pretratamiento es sencillo y la capacidad de los equipos es menor, además de ahorrar en consumo de agua. Pero, por otro lado, existen más pérdidas de carga en el transporte del material.

2.4. Tratamiento de biogás

El biogás generado a partir de residuos orgánicos no es puro, contiene partículas y otros gases. Por lo que debe purificarse de acuerdo a la utilización que se le va a dar.

En este caso, se usará para producir energía eléctrica, por lo tanto, es importante purificarlo para evitar problemas de corrosión en los motores de generación, y en menor medida para aumentar su poder calorífico.

Una purificación completa, contempla la eliminación de gran parte del CO_2 , vapor de agua y ácido sulfhídrico (H_2S) que con el vapor de agua puede formar ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual es muy corrosivo para los motores.

Remoción de vapor de agua:

La remoción de vapor de agua debe ser previo al resto de la purificación, para evitar la reacción con otras impurezas. El biogás puede ser secado por compresión y/o enfriamiento, adsorción o absorción (Varnero, 2011).

El enfriamiento, genera la condensación del agua, este es el método más usado para remover el vapor de agua debido a su simplicidad (Varnero, 2011).

Remoción de CO_2 :

Para sistemas de generación el CO_2 del biogás no es perjudicial para los motores, pues el CO_2 solamente pasa a través de ellos, sin embargo, el rendimiento del equipo sería menor. Para aplicaciones donde se requiere un combustible de mayor densidad el CO_2 debe ser removido. Mediante procesos de absorción o adsorción principalmente (Varnero, 2011).

Remoción de H_2S :

Según la normativa actual de seguridad para instalaciones de biogás, el control de ácido sulfhídrico en el biogás debe ser inferior a 300 ppm, sin embargo, sobre los 100 ppm es muy tóxico, por lo que su concentración debería estar por debajo de los 100 ppm (Gamma ingenieros, 2011).

Las tecnologías disponibles para remoción de H_2S son principalmente adsorción, absorción y desulfuración biológica (Varnero, 2011).

Desulfuración biológica:

Consiste en el uso de microorganismos aerobios azufre-oxidante, para oxidar compuestos reducidos de azufre, como azufre elemental o sulfatos (SO_4^{-2}), transformándolos en sustancias de fácil eliminación. Estos sistemas son muy eficientes, y tienen un menor costo de inversión y operación que el resto de las técnicas, sin embargo, se trata de un sistema lento, cuyo mantenimiento es caro y complejo (Ortega, Rodríguez, Fernández y Bárcenas, 2015).

Adsorción:

La técnica de adsorción se basa en la capacidad de ciertos sólidos para extraer determinadas sustancias en solución líquida o gaseosa. El proceso ocurre en la superficie del sólido (adsorbente), donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles, dependiendo de las condiciones de humedad, selectividad, temperatura, presión y concentración de partículas (Ortega et al., 2015).

La adsorción puede ser química o física. La adsorción química es irreversible, mientras en la física el material se puede regenerar. El carbón activado es un adsorbente físico que permite retirar H_2S y CO_2 que, con catalizadores impregnados en la superficie del carbón, puede incrementar la velocidad de reacción de oxidación del ácido sulfhídrico a azufre elemental.

Este método es muy efectivo, sin embargo, tiene altos costos de operación y del material (Ortega et al., 2015).

Absorción:

La absorción ocurre cuando se pone en contacto una mezcla gaseosa con un líquido “absorbedor” con capacidad de disolver y/o reaccionar con ciertas sustancias presentes en el gas, La absorción aumenta a medida que se incrementa la concentración de H_2S , la presión, la humedad y la temperatura (Ortega et al., 2015).

Esta técnica requiere de sustancias reactivas, de las cuales la mayoría son corrosivas, demandando el empleo de agentes inhibidores y antiespumantes. Estas sustancias tienen elevados costos. Además, este método genera grandes volúmenes de residuos líquidos contaminados (Ortega et al., 2015).

2.5. Tecnologías de generación

Dentro de los sistemas de generación hay sistemas que solo producen electricidad y otros sistemas combinados de calor y electricidad, o también llamados de cogeneración. Los sistemas combinados son más eficientes que solo la generación de electricidad, algunos producen principalmente calor y otros principalmente electricidad.

Las tecnologías de cogeneración más comunes son: turbinas de gas (TG), motores de combustión interna (MCI) y turbinas de vapor (TV), estas pueden ser a contrapresión (TVcp) o a condensación con extracción (TVce) (AChEE, 2010).

A continuación, en la Tabla 3 se presentan porcentajes de referencia del desempeño energético de las tecnologías de generación más usadas.

Tabla 3: Datos de desempeño energético (AChEE, 2010)

	Motores de combustión interna (MCI)	Turbinas de gas (TG)	Turbinas de vapor a contrapresión (TVcp)	Turbinas de vapor a condensación con extracción (TVce)
Potencia eléctrica (eficiencia)	30-40%	18-38%	5-10%	10-30%
Calor en gases de combustión	20-35%	55-75%	60-75%	0-70%
Temperatura gases de combustión	300-500°C	400-600 °C	-	-
Pérdidas por radiación y convección	5-7%	5-7%	20-30%	20-30%

Los motores de combustión interna son adecuados para potencias bajas, hasta 8 MW por equipo, donde la generación eléctrica es importante, además de producir vapor a baja presión. Mientras las turbinas de gas tienen un rendimiento eléctrico normalmente inferior, pero cuentan con un sistema de recuperación de calor eficiente, por lo que su aplicación es adecuada cuando las necesidades de vapor son considerables. Por otro lado, las turbinas a vapor fueron las primeras tecnologías en generación de electricidad, a partir de la energía mecánica que se produce por la expansión del vapor de alta presión, sin embargo, su eficiencia es mucho menor que el resto de las tecnologías por lo que su uso se ha reducido (Velasco, 2009).

En cuanto a los costos, las turbinas a gas y las turbinas a vapor presentan un mayor costo de inversión, mientras los motores presentan un mayor costo de mantención (Velasco, 2009).

3. Metodología

La metodología utilizada en esta memoria consideró cuatro etapas principales que consisten en a) Identificación del caso base, b) Evaluación técnica, c) Evaluación económica y d) Estudio de sostenibilidad. A continuación, se detallan cada una de ellas.

- a) Identificación del caso base: Caracterización de residuos orgánicos de la Región Metropolitana y disponibilidad, mediante los siguientes pasos:
 1. Identificar tipos de residuos orgánicos, su tasa de generación por comuna y su destino, para lo cual se recurre a los registros recaudados en el SEREMI sobre la cantidad de residuos almacenados en los rellenos sanitarios de la región.
 2. Localizar la planta de reciclaje de los residuos orgánicos generados, de acuerdo al plan regulador de la región Metropolitana, considerando restricciones de seguridad y disminuyendo los costos en transporte.
- b) Evaluación técnica: Se evaluará si el proyecto planteado, generación de energía a partir del biogás proveniente de residuos orgánicos domiciliarios, es técnicamente prefactible.
 1. Diseñar el proceso productivo, a partir de la literatura se seleccionará el tipo de proceso de digestión anaeróbica, identificando las etapas necesarias y los equipos correspondientes.
 2. Realizar los balances de masa y energía de cada equipo.
 3. Dimensionar los equipos del proceso a partir de los balances de masa y energía junto a las ecuaciones de diseño respectivas de cada etapa.
 4. Distribuir equipos y lugares de trabajo en la planta de acuerdo al reglamento de seguridad para las instalaciones de biogás con fines energéticos ([SEC, 2014](#)), construyendo un layout que especifique las dimensiones y la orientación.
- c) Evaluación económica: Consiste en realizar un flujo de caja mediante los costos de inversión y operación de la planta. Además, realizar un análisis de sensibilidad frente a las variables más significativas del proyecto, para evaluar su impacto en la rentabilidad del proyecto.
- d) Estudio de sostenibilidad: Para la integridad del proyecto, se incluyen los ciclos de sostenibilidad ([The Circles Project](#)) que además del área económica, involucran el área política, ecológica y cultural, para ello se procede de acuerdo al cuestionario elaborado por The Circles Project, como sigue:
 1. A nivel político, se corrobora el cumplimiento de leyes o iniciativas medioambientales.
 2. En el ámbito ecológico, se describirá el impacto del proyecto en el medio ambiente y se cuantificará la huella de carbono y la huella hídrica del proceso productivo.
 3. Y a nivel cultural, se estudiará la capacidad de segregación de los residuos orgánicos en la localidad.

4. Contexto

Actualmente, en la Región Metropolitana existen tres rellenos sanitarios y un vertedero que almacenan todos los residuos sólidos domiciliarios. El relleno sanitario Lomas Lo Colorado (RSLLC) ubicado en Til, presta servicios de disposición de residuos en el sector nororiente de la Región. El relleno sanitario Santa Marta (RSSM) que se ubica en la comuna de Talagante, presta servicios al sector sur de la RM. El relleno sanitario Santiago Poniente (RSSP) emplazado en la comuna de Maipú, trabaja con el sector sur-poniente. Y el vertedero de Popeta (VCP) es administrado por la Ilustre municipalidad de Melipilla (SEREMI, 2014). En el Anexo D: Disposición de RSD en la RM, se muestra la tasa de ingreso de residuos sólidos domiciliarios (RSD) a los depósitos por comuna.

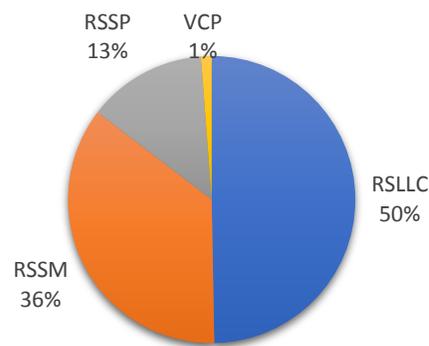


Figura 3: RSD en depósitos sanitarios de la RM 2016

Al 2016, la actividad de estos depósitos se centra principalmente en el relleno sanitario Lomas Lo Colorado y Santa Marta, como se observa en la Figura 3.

4.1. Caracterización y disponibilidad de residuos orgánicos

Según caracterizaciones de residuos domiciliarios realizados en la Región Metropolitana, los residuos orgánicos susceptibles de ser degradados corresponden a restos de comida, madera, poda y residuos de jardinería. Cuya tasa de producción varía principalmente por ubicación, estación del año y nivel socioeconómico (Grupo de residuos sólidos, 2006). En el 2010 se determinaron los residuos orgánicos por nivel socioeconómico (NSE) en la Región, los que se pueden ver en la Tabla 4 (Martínez, 2011).

Donde el nivel ABC1 es el grupo familiar con mayores ingresos, mientras los niveles D-E corresponden a los grupos con menores ingresos.

Tabla 4: Caracterización de residuos orgánicos según Nivel socioeconómico

NSE \ RSD	ABC1		C2		C3		D - E	
	Residuos orgánicos [%]	Fracción de RSD [%]	Residuos orgánicos [%]	Fracción de RSD [%]	Residuos orgánicos [%]	Fracción de RSD [%]	Residuos orgánicos [%]	Fracción de RSD [%]
Restos de comida	68,5	55,7	73,0	54,1	76,5	59,0	80,4	58,0
Poda y Jardinería	30,5		23,5		22,8		15,9	
Madera	1,0		3,5		0,7		3,7	

Además, se asumen las siguientes propiedades de los residuos orgánicos que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Propiedades de residuos orgánicos de RSD (Tchobanoglous, Theissen y Eliassen, 1982)

	Densidad comprimida [kg/m ³]	Humedad [%]	[%] en base seca					
			C	H	O	N	S	ceniza
Restos de comida	680	60	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Poda y Jardinería	302	50	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madera	577	20	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5

En cuanto a la disponibilidad de estos residuos, los restos de poda y jardinería, junto con los residuos provenientes de ferias libres, son residuos segregados desde su origen, por lo que podrían ser reciclados directamente. Mientras los restos de comida de origen domiciliarios se encuentran mezclados con material inorgánico, pero se podría sensibilizar a la población sobre el daño al medio ambiente que generan estos residuos, generando una cultura de reciclaje donde gran parte de la comunidad segregue sus residuos domiciliarios. Actualmente, solo se recicla el 10% de los residuos domiciliarios y se espera llegar al 25% con una nueva política nacional (MMA, 2016).

A continuación, se detallarán las condiciones de los rellenos sanitarios presentes en la región:

Relleno sanitario Lomas Lo Colorado:

Desde el 2006 KDM, empresa asociada al RSLLC, amplía su sistema de abatimiento de biogás, mediante pozos de extracción perforados sobre la masa de residuos, contando con un sistema de captación y generación de energía eléctrica conectada al sistema interconectado central. El biogás debe ser filtrado para extraer ácido sulfhídrico, material de baja granulometría y compuestos no deseados. Al 2014, se producen aproximadamente 9.000 [m³/h] de biogás. Además, el RSLLC cuenta con una planta de compostaje desde el 2008. El relleno tiene una vida útil hasta el 2064 (SEREMI, 2014).

Relleno sanitario Santa Marta:

El RSSM desde el 2013 también ha implementado un sistema de captación de biogás y generación de energía eléctrica inyectada al SIC, produciendo aproximadamente 7.500 [m³/h] de biogás. Su vida útil había sido aceptada hasta el 2034 (SEREMI, 2014), sin embargo, la empresa en el último tiempo ha tenido problemas judiciales por el mal funcionamiento y el daño medioambiental, por lo que su vida útil se redujo 10 años (Cooperativa, 2017).

Relleno sanitario Santiago Poniente:

Mientras el RSSP, cuenta con una planta de captura y quema de biogás desde el 2008 con una capacidad de 3.000 [m³/h] de biogás. Su vida útil es hasta el 2036 (SEREMI, 2014).

Si bien, el proceso de captación de biogás no es del todo eficiente, porque el material inorgánico interfiere en el proceso de degradación anaeróbica, es una opción viable para los rellenos sanitarios.

En el presente trabajo se espera evaluar la capacidad de producción de biogás a partir de la materia orgánica segregada y procesada en biodigestores.

Considerando un flujo representativo a tratar, se escoge el relleno sanitario Santa Marta con un flujo promedio para enmarcar el proyecto.

4.2. Localización

De acuerdo al plan regulador de la Región Metropolitana, la planta debe estar ubicada en “Zona exclusiva industrial” o “Zona Mixta”. Mientras, según el Ministerio del Medio Ambiente en primera instancia se debe considerar la posibilidad de construir una planta junto al relleno sanitario (Von, Santana, Könemund y Franzen, 2012).

Como se mencionó anteriormente, el relleno Santa Marta tiene una vida útil de 10 años, por lo que el proyecto puede ser evaluado dentro de un horizonte de evaluación de solo 10 años, hasta el 2027. Sin embargo, se espera analizar la influencia del horizonte de evaluación en el proyecto.

Por otra parte, es importante considerar algunas limitaciones geográficas para la localización. Estudios sobre la ubicación de plantas de tratamiento de residuos definen las distancias de separación típicas (Environment Canada, 2013), como se muestra en la Tabla 6, las cuales deben ser cumplidas por el relleno sanitario.

Tabla 6: Típicas distancias de separación

Ubicaciones	Distancia [m]
Límite de propiedad	15-50
Tubería de drenaje	30
Cuerpos naturales de aguas superficiales	100
Fuente de agua potable	150
Residencias o lugares públicos	300
Ocupaciones comerciales o industriales	300
Suministro de agua consumida	300
Aeropuerto	8.000

Se estima que la eficiencia de una planta de tratamiento de residuos se mantiene cuando las distancias de transporte de residuos son inferiores a 50 kilómetros. Sin embargo, los costos de transporte urbano son mayores que en zona rural, la razón de costos en zona urbana y rural es 9:5, por lo que 50 kilómetro en zona rural equivalen a 28 kilómetros en zona urbana (Pöschl, Ward, y Owende, 2010).

En la Figura 4, se observa la ubicación geográfica de la planta del RSSM y las 19 comunas de las que provienen los residuos. Mostrando un radio de 50 kilómetros en torno al relleno sanitario, el semicírculo celeste.

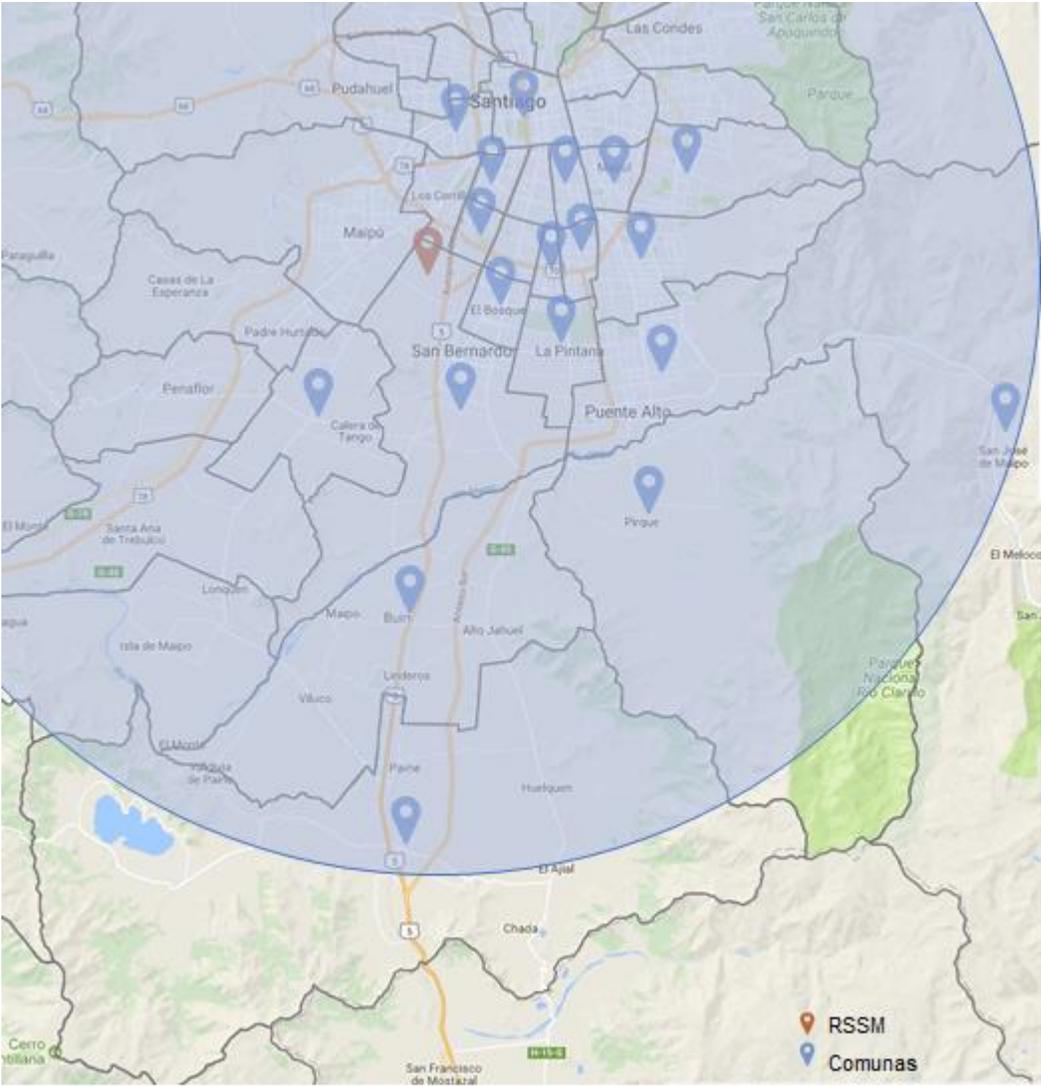


Figura 4: Localización RSSM y comunas

5. Evaluación técnica

5.1. Caso Base

Para estimar los residuos orgánicos disponibles se considera el grupo socioeconómico representativo por comuna, y basándose en esto se determina la cantidad de restos de alimentos, madera, residuos de poda y jardinería que ingresan a cada relleno sanitario, como se vio en la Tabla 4. Además, se proyecta la tasa de producción de residuos por habitante al 2027 para cada comuna, considerando el modelo MEPLAN en base al crecimiento de la población (CIS,1999). Suponiendo que la planta operará las 24 horas del día todos los días del año, se logra cuantificar el caso base en la Tabla 7.

Tabla 7: Cuantificación Caso Base para relleno Santa Marta

Dato	RSSM	Unidad
Caso Base	101.544,0	[ton/mes]
Restos de comida	81,5	[%] en peso
Poda y Jardinería	15,5	[%] en peso
Madera	3,0	[%] en peso
Densidad comprimida	618,1	[kg/m ³]
Relación C:N	30,3	[kg C/kg N]
Humedad	57,3	[%] peso
Cenizas	4,7	[%] peso en base seca

5.2. Diagramas del proceso

De acuerdo con un análisis de la literatura (Environment Canada, 2013; Varnero, 2011; AChEE, 2010) se llegó al diseño del proceso de producción de biogás que contempla las etapas de recolección, transporte, almacenamiento, pre-tratamiento, digestión, post-tratamiento y uso energético.

El proceso comienza con el almacenamiento de los residuos orgánicos segregados, dándole una autonomía de 2 días a la planta, luego los residuos son transportados por 3 tornillos sin fin hasta tres molinos diferentes, debido a los grandes flujos a tratar. La materia orgánica tiene una concentración de sólidos totales mayor al 10%, por lo que es triturada para alcanzar un tamaño menor a 20 cm (Environment Canada, 2013).

Posteriormente, la materia triturada es transportada por 3 tornillos sin fin a los respectivos 3 digestores continuos en condiciones termofílicas, considerando una distancia de 22 metros, de acuerdo con el reglamento de seguridad de instalación de biogás (SEC, 2014). En los digestores se añade el agua necesaria para el tratamiento de biomasa seca, correspondiente a 0,05 [m³ agua/ton residuo] (Environment Canada, 2013).

Una vez que los residuos orgánicos son digeridos se obtiene biogás como producto principal y digestato como subproducto, ambos deben ser tratados para su posterior comercialización. El digestato es filtrado con filtros de hojas para extraer el 80% del agua contenida (Nodar, 2012). Parte del agua es recirculada en el proceso para ser utilizada una vez. Mientras al biogás se le extrae la humedad mediante un condensador, usando glicol como refrigerante que enfría el gas hasta 4°C (Varnero, 2011) para extraer la totalidad del vapor de agua. Luego es necesario comprimir el biogás a una presión de 7

bar para adsorber con carbón activado (Álvarez, 2016) y extraer el 90% de H₂S (Niño y Ortíz, 2008).

Luego de ser purificado el biogás, mediante cogeneración se genera energía eléctrica y térmica con motores de combustión interna de 4 [MW] (AChEE, 2010). La energía eléctrica se inyecta directamente al SIC y la energía térmica de los gases de combustión se utiliza para alcanzar la temperatura termofílica del digester de 60°C (Environment Canada, 2013). Pero antes, los gases deben ser filtrados, generalmente se usa filtro reductor catalítico selectivo (SCR) para abatimiento de NO_x o filtro de oxidación catalítica para abatimiento de CO; en cogeneración se considera combustión completa de metano por el exceso de aire inyectado, así solo se usará un filtro reductor catalítico selectivo para abatimiento de NO_x (Fernández y Araya, 2012).

En la Figura 5 se presenta el diagrama de bloques del proceso:

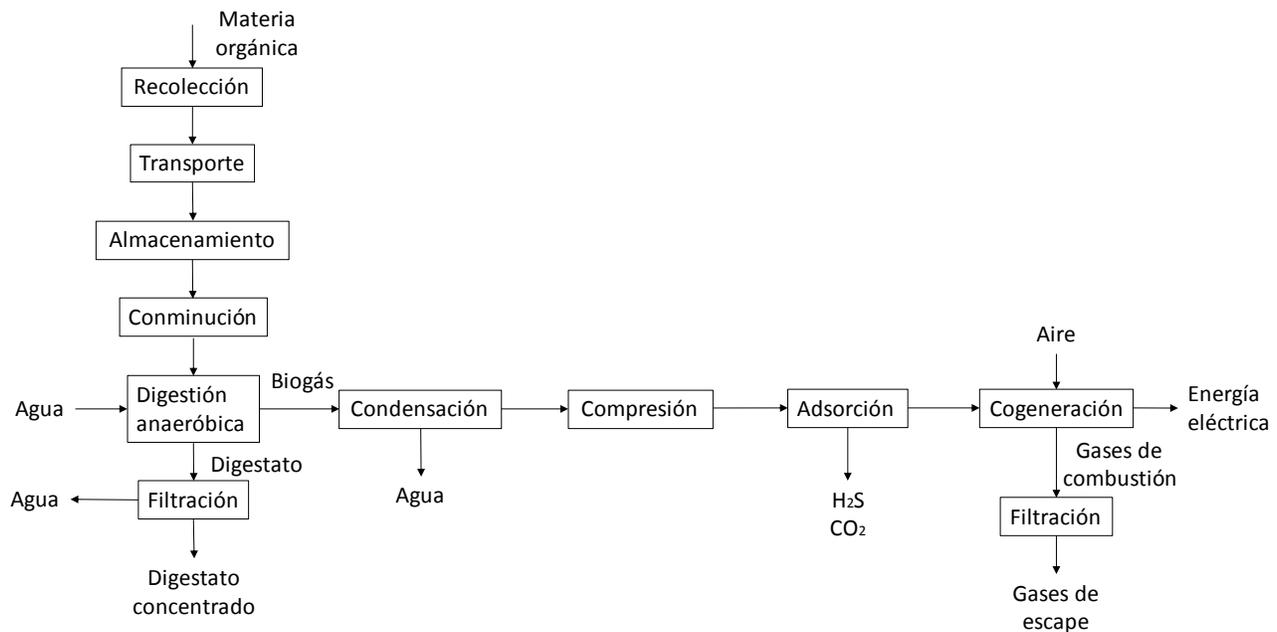


Figura 5: Diagrama de bloques del proceso productivo

Luego, se definen los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de acuerdo a las etapas señaladas, como se observa en la Figura 6 y Tabla 8.

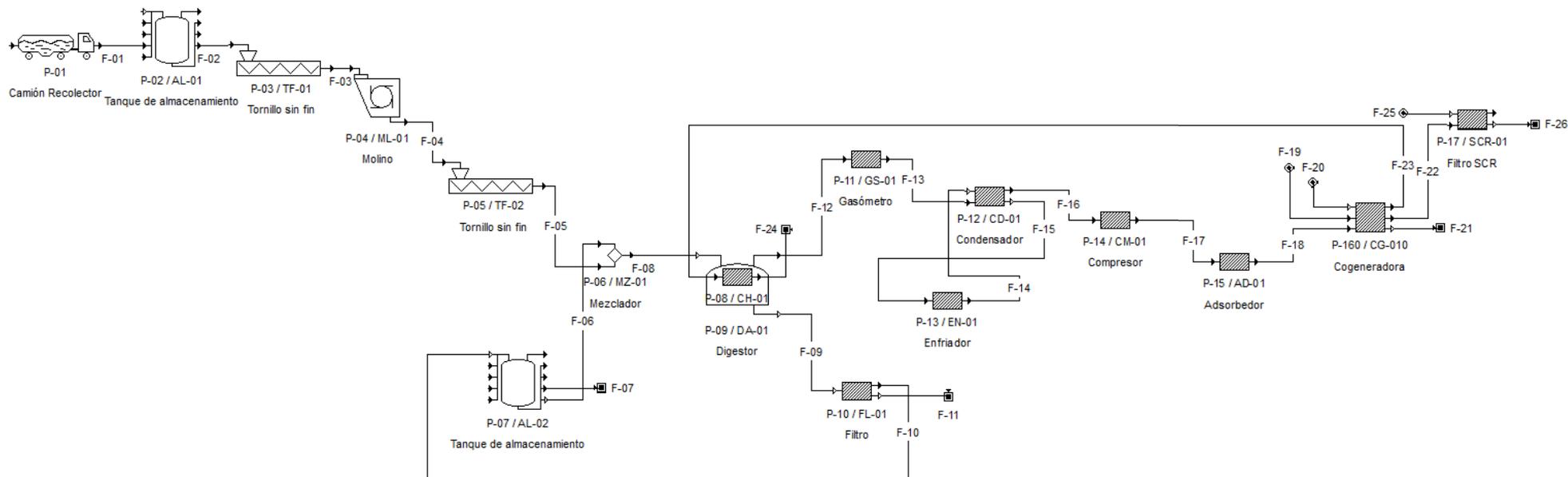


Figura 6: Diagrama de flujo del proceso

Tabla 8: Composición de flujos

Flujo	Composición	Flujo	Composición	Flujo	Composición
F-01	Residuos orgánicos	F-10	Agua	F-19	Aire
F-02	Residuos orgánicos	F-11	Digestato concentrado	F-20	Agua
F-03	Residuos orgánicos	F-12	Biogás (CH_4 , CO_2 , H_2O , N_2 y H_2S)	F-21	Energía eléctrica
F-04	Residuos orgánicos	F-13	Biogás (CH_4 , CO_2 , H_2O , N_2 y H_2S)	F-22	Gases de combustión
F-05	Residuos orgánicos	F-14	Glicol	F-23	Vapor de agua
F-06	Agua	F-15	Glicol	F-24	Vapor de agua
F-07	Agua	F-16	Biogás (CH_4 , CO_2 , N_2 y H_2S)	F-25	NH_3 y aire
F-08	Residuos orgánicos y agua	F-17	Biogás (CH_4 , CO_2 , N_2 y H_2S)	F-26	Gases de combustión filtrados
F-09	Digestato	F-18	Biogás (CH_4 , CO_2 , N_2 y poco H_2S)		

En la Tabla 9, se muestran las densidades de los principales compuestos, para realizar los balances de masa y energía.

Tabla 9: Densidad de compuestos

Compuestos	Densidad [kg/m ³]
Residuos orgánicos comprimidos	605,00
Residuos orgánicos molidos/ Digestato	1.020,00
Agua	1.000,00
Biogás	1,35

5.3. Balance de masa y energía

De acuerdo al caso base definido se realizan los balances de masa para cada operación. En la Tabla 10 se muestran las corrientes y su composición. Ver Anexo F: Ejemplo de cálculo balance de masa y energía.

Tabla 10: Resumen balance de masa

Equipo/proceso asociado	Flujo de entrada	Flujo de salida	Composición	Fracción porcentual	Flujo másico [kg/h]	Temperatura [°C]	
Camiones recolectores		F-01	Residuos orgánicos	100%	141.033	25	
Almacenador de residuos		F-02	Residuos orgánicos	100%	141.033	25	
Tornillo sin fin		F-03	Residuos orgánicos	100%	141.033	25	
Molino		F-04	Residuos orgánicos	100%	141.033	25	
Tornillo sin fin		F-05	Residuos orgánicos	100%	141.033	25	
Almacenador de agua		F-06	Agua	100%	7.052	25	
Mezclador		F-08	Residuos orgánicos	95%	148.085	25	
			Agua	5%			
Serpentín	F-23		Vapor de agua	100%	3.115	100	
		F-24	Vapor de agua	100%	3.115	100	
Biodigestor		F-11	Biogás (1)	CH ₄	74%	40.170	25
				CO ₂	18%		
				H ₂ O	200ppm		
				N ₂	8%		
				H ₂ S	200ppm		

		F-08	Digestato	Digestato base seca	81 %	107.915	25	
				Agua	19%			
Filtro		F-09	Agua		22%	83.790	25	
		F-10	Digestato concentrado		78%	24.125	25	
Gasómetro		F-12	Biogás ⁽¹⁾		100%	40.170	25	
Condensador	F-13		Glicol		100%	139.188	-3	
		F-14	Glicol		100%	139.188	1	
		F-15	Biogás ⁽²⁾	CH ₄	74%	40.162	4	
				CO ₂	18%			
				N ₂	8%			
	H ₂ S			200ppm				
Compresor		F-16	Biogás ⁽²⁾		100%	40.162	25	
Adsorbedor		F-18	Biogás	CH ₄	74%	40.154	25	
				CO ₂	18%			
				N ₂	8%			
				H ₂ S	20ppm			
Cogenerador	F-19		Aire ⁽³⁾	N ₂	78%	613.804	25	
				O ₂	21%			
				Otros	1%			
		F-20		Gases de combustión	CO ₂	14%	653.958	500
					H ₂ O	10%		
					NO	7%		
					N ₂	69%		
					H ₂ S	1ppm		
Filtro SCR	F-21		NH ₃		100%	25.261	300	
			Aire ⁽³⁾		100%	50.856	300	
		F-22	Gases de combustión filtrados	CO ₂	12%	730.071	280	
				H ₂ O	15%			
N ₂				73%				
				H ₂ S	1ppm			

(¹), (²) o (³) señala los flujos con composición similar.

Además, se realizaron balances de energía para los equipos donde hay transferencia de energía, como el biodigestor con serpentín, el condensador y el cogenerador. El resto de los equipos se asumió que son adiabáticos e isotérmicos. En la Tabla 11 se muestra el resumen del balance de energía total para cada operación.

Tabla 11: Resumen Balance de energía

Equipo/proceso asociado	Composición	Flujo de energía	Unidad
Biodigestor con serpentín	Materia orgánica	1.952.752	[W]
	Gases de combustión	-1.952.752	[W]
Condensador	Refrigerante	439.215	[W]
	Biogás	-439.215	[W]
Cogenerador	Energía disponible	306	[MW]
	Energía eléctrica (35%)	107	[MW]
	Calor de gases y refrigeración (59%)	181	[MW]
	Energía perdida (6%)	18	[MW]

Tanto el biodigestor con serpentín como el condensador se dimensionan de tal forma que el flujo vapor agua sea capaz de ceder calor al biodigestor y el glicol sea capaz de retirar el calor necesario del biogás para que este condense. Mientras, en el cogenerador solo el 35% de toda la energía disponible del biogás se transforma en energía eléctrica (Ver Anexo G.12: Cogenerador).

5.4. Dimensionamiento de los equipos

En la Tabla 12 se muestran los resultados de dimensionamiento de los equipos. El detalle del cálculo de las dimensiones se encuentra en el Anexo G: Dimensionamiento.

Tabla 12: Resumen dimensionamiento

Equipos	Dimensiones totales	Unidad	Equipos	Dimensión por equipo	Unidad
Tanque almacenador	13.159	[m ³]	1	13.159	[m ³]
Tornillo sin fin	12	[kW]	3	4	[kW]
Molino	224	[kW]	3	75	[kW]
Tornillo sin fin	46	[kW]	3	15	[kW]
Tanque almacenador	99	[m ³]	1	99	[m ³]
Serpentín	12.333	[m ²]	3	4.111	[m ²]
Biodigestor	82.063	[m ³]	3	27.354	[m ³]
Filtro de hoja	1.473	[m ²]	16	92	[m ²]
Gasómetro	105.119	[m ³]	2	52.560	[m ³]
Condensador	1.325	[m ²]	10	132	[m ²]
Enfriador	225	[kW]	10	23	[kW]
Compresor	5.760	[kW]	10	576	[kW]
Adsorbedor	5.438	[m ³]	5	1.088	[m ³]
Cogenerador	1.458	[kW]	27	54	[kW]
Filtro SCR	40.500	[kW]	27	1.500	[kW]

El flujo a tratar es bastante grande comparado con los proyectos que operan actualmente, por lo tanto, la escala de la planta es mucho mayor, es así como las dimensiones de algunas operaciones sobrepasan las dimensiones máximas establecidas o encontradas para cada uno, como es el caso de los biodigestores, filtros de hoja, compresores y cogeneradores, donde se aumenta la cantidad de equipos y la línea se acomodó a ellos. Para el caso de los gasómetros se intenta minimizar la cantidad de equipos debido al costo de estos.

5.5. Distribución de los equipos en planta

En la Figura 7, se muestra la distribución de los equipos y las oficinas en una planta de tratamiento de residuos para generación de energía eléctrica a partir de biogás.

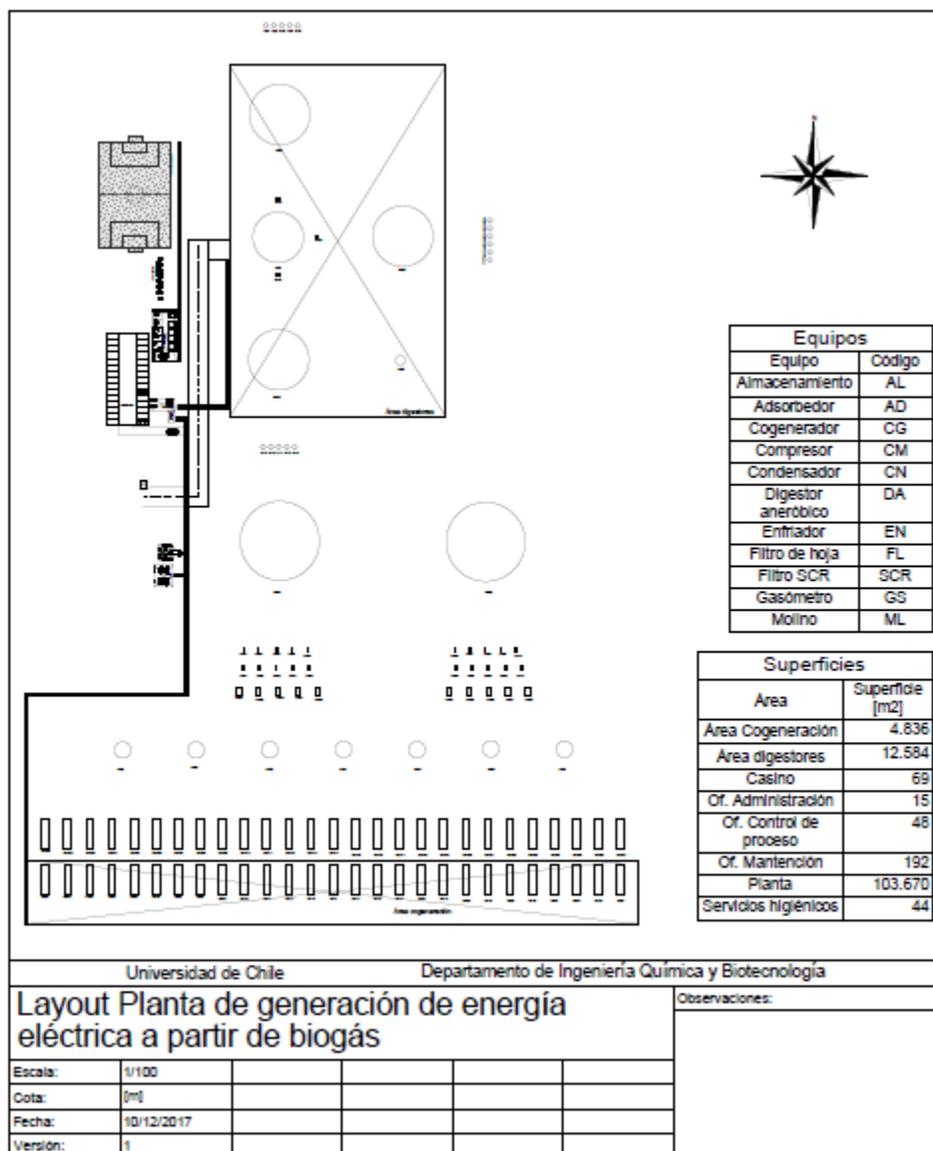


Figura 7: Layout Planta de generación de energía

En este rubro se debe tener especial cuidado con el manejo de biogás, debido a su alta inflamabilidad. Filtraciones de biogás en los equipos o en las tuberías que los transportan pueden generar explosiones. Para la distribución de la planta se considera que el viento va de dirección oeste a este, por lo que los equipos que trabajan con biogás están ubicados en la zona derecha (Windfinder, 2017).

Chile cuenta con un reglamento que establece los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las instalaciones de biogás con fines energéticos. Donde se señala que la distancia entre almacenamientos de biogás y equipos o edificaciones adyacentes con una altura inferior a 7,5 metros debe ser de al menos 6 metros (SEC, 2014).

Si alguna de las edificaciones (H_1) tiene una altura mayor a 7,5 metros, entonces la distancia mínima corresponde a la siguiente ecuación:

$$d_{\text{mín}} = 0,4 \cdot H_1 + 3 \text{ [m]} \quad (5.1)$$

Si ambas edificaciones (H_1 y H_2) tienen alturas mayores a 7,5 metros, entonces la distancia mínima corresponde a:

$$d_{\text{mín}} = 0,4 \cdot H_1 + 0,4 \cdot H_2 \quad (5.2)$$

El 2015 entró en vigencia el Decreto 594, donde según el artículo 8 la distancia entre equipo y edificio sin presencia de biogás debe ser de al menos 1,5 metros ([Decreto 594, 2015](#)).

Las Instalaciones grandes de biogás, cuya potencia es mayor a 300 kW, deberán considerar el cumplimiento de normas sísmicas (NCh2369.Of2003), de obras civiles por Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones de riesgo explosivo (OGUC, NCh), de instalación de tuberías e instalaciones eléctricas por regulación de la superintendencia de electricidad y combustible (SEC), clasificación de zonas por la directiva ATEX. Además, de incluir señaléticas de seguridad, sistemas de detección de gases, tratamiento de biogás y protección contra incendios.

De acuerdo a la cantidad de personas que trabajan por turno se determina el número mínimo de artefactos sanitarios de acuerdo al Decreto 594, como corresponde a 30 personas (Ver Anexo I: Organización de la empresa), se debe tener al menos 2 baños y 3 duchas, y estos no deben estar instalados a más de 75 metros del área de trabajo. También, se debe contar con un comedor para al menos 30 personas con mesas y sillas suficientes junto con los requisitos necesarios para cumplir con la autorización sanitaria ([Decreto 594, 2015](#)).

6. Evaluación económica

A continuación, se evalúa la prefactibilidad económica de una planta de tratamiento de residuos orgánicos para generar energía eléctrica mediante su flujo de caja que contempla los costos de inversión en bienes de capital (CAPEX), los costos de operación (OPEX) y los ingresos por venta de energía eléctrica y digestato.

El horizonte de evaluación para este tipo de proyectos es cercano a los 20 años, sin embargo, la vida útil del relleno sanitario Santa Marta se vio reducida por su mal funcionamiento a 10 años, por lo que a priori el proyecto se evaluará durante este periodo, más adelante se verá la influencia de esta variable en el proyecto.

La variable más significativa en este tipo de proyecto es la capacidad de segregación de los residuos domiciliarios, actualmente cerca del 10% de estos residuos se reutiliza, pero con la ley 20.920 se pretende aumentar este porcentaje al 25% (MMA, 2016), por lo que se considera este como escenario base para evaluar el proyecto.

6.1. Costos de inversión

Las inversiones en bienes de capitales (CAPEX) para el proyecto de generación de biogás son estimados según la metodología planteada en el libro Plant design and economics for chemical engineers (Peters, 1991), donde a partir del costo primario de los equipos se estiman los costos de inversión directos e indirectos suponiendo algunos porcentajes. Los costos primarios de los equipos se obtienen mediante cotizaciones o se estiman en base al costo de acero necesario para construir los equipos el detalle se muestra en el Anexo H: Capex. En la Tabla 13 se muestra el resumen.

Tabla 13: Costo de equipos primarios

Equipos	Costo total [USD]	Referencia
Tanque almacenador residuo	6.587	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Tornillo sin fin	49.680	(Xinxiang Jinrui Machinery Factory, 2017; Botou Xin Jia Machinery Co., Ltd, 2017)
Molino	89.700	(Jiangxi Shicheng Mine Machinery Factory, 2017)
Digestor con serpentín	332.141	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Tanque almacenador agua	283	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Filtro	460.000	(Chang, 2017)
Gasómetro	548.375	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Compresor	2.587.638	(Gutierrez, 2017)
Condensador	115.000	(Wenzhou Wuhuan Refrigeration Accessories Factory, 2017)
Enfriador	83.950	(Dongguan Naser Machinery Co., Ltd., 2017)
Adsorbedor	245.668	(Vatavuk, 1999)
Cogenerador	14.715.679	(Chamy y Vivanco, 2007)

Conexión a la red	345.000	(Chamy y Vivanco, 2007)
Filtro SCR	18.165	(Araya, 2017)
Total	19.597.867	

El costo total de inversión es del orden de 58,9 millones de dólares, del cual aproximadamente 25% corresponde a costos de cogeneración.

6.2. Costos de operación

Los costos de operación (OPEX) comprenden los costos directos de producción y los gastos de administración y ventas. Para ello, se consideraron 4 turnos de trabajo de 30 personas en la Figura 8 se muestra la organización de la empresa, en el Anexo I: Organización de la empresa, se detallan los cargos y los profesionales necesarios para el funcionamiento de la planta.

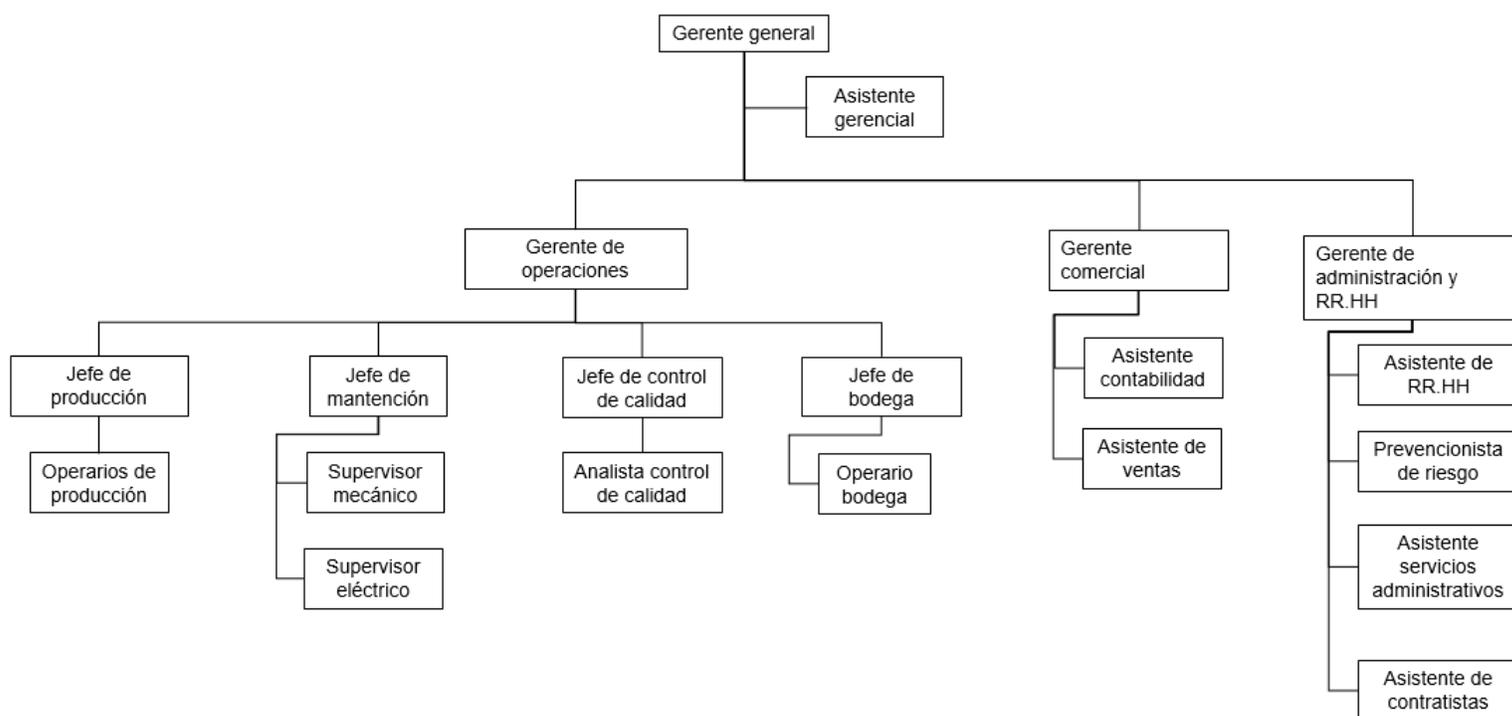


Figura 8: Organigrama de la empresa

Tabla 14: Costos de operación

Costos directos de producción	Costo [USD]
Insumos del proceso	8.992.895
Servicios	2.268
Mano de obra de operación	555.454
Supervisión directa	112.458
Mantención	4.122.071
Subtotal	13.785.146
Gastos de administración y ventas	Costo [USD]

Honorarios	5.635
Administración	220.738
Comunicaciones y publicidad	2.407
Peaje	418.065
Seguros	588.867
Subtotal	1.235.712
Total	15.020.857

Se alcanzó un valor de 15.020.857 [USD] al 2018 como se observa en la Tabla 14, del cual cerca del 60% corresponde a costos por insumo de carbón activado (Ver Anexo J: Opex).

6.3 Ingresos

Los ingresos del proyecto corresponden a los ingresos por venta de electricidad, por venta de digestato y por tratamiento de basura. El ingreso principal es por venta de electricidad, considerando que este aumenta por la segregación de basura y varía de acuerdo a la tarifa de precio nudo por energía y potencia (CNE, 2018), como se mostrará en el análisis de sensibilidad. La venta de digestato es un ingreso secundario no muy seguro en el proyecto, por lo que se considera la venta del 50% con un precio rebajado de 40 [USD/ton] comparado con la industria de fertilizantes (Riveros, 2016). Mientras el ingreso por recepción de residuos corresponde al ingreso que reciben los rellenos sanitarios por tonelada de residuo ingresada, para el relleno Santa Marta se encuentran registros de 7.500 [CLP/ton] (Municipalidad de Maipú, 2016), a pesar de que el ingreso no es significativo, se reconoce como parte del proyecto (Ver Anexo K: Flujo de caja).

6.4. Flujo de caja

Para realizar el flujo de caja se considera una tasa de descuento del 12% y una tasa de impuesto del 25% (SII, 2015). El capital de trabajo cubre el funcionamiento para los 6 primeros meses, además se supone un préstamo del 85% de la inversión junto con el capital de trabajo del proyecto a 10 años con una tasa de interés del 8% y una cuota fija.

Se utilizan tres indicadores económicos para analizar la rentabilidad del proyecto: la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) y el tiempo de recuperación de la inversión (Payback).

El caso base considera los valores que aparecen en la Tabla 15, obteniendo una VAN de 3.435.703 [USD], una TIR del 14% y el Payback es a los 5 años (Ver Anexo K: Flujo de caja). Además, los principales costos corresponden a la inversión del proyecto, especialmente a los cogeneradores.

Tabla 15: Caso base flujo de caja

Variables del proyecto	Valor	Unidad
Precio energía eléctrica	90	[USD/MWh]

Precio Potencia eléctrica	9	[USD/MWh]
Precio Carbón activado	80	[USD/ton]
Segregación de residuos	25	[%]
Horizonte de evaluación	10	[años]

6.5. Análisis de sensibilidad

A continuación, se estudia la influencia de cinco variables importantes a sensibilizar para la rentabilidad del proyecto: el porcentaje de segregación de los residuos, el horizonte de evaluación del proyecto, el precio de la energía eléctrica, el precio de la potencia eléctrica y el precio del carbón activado. Cada estudio considera la variación de una sola variable, manteniendo el resto de las variables de acuerdo al caso base.

Además, se consideran los tres indicadores económicos: la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) y el tiempo de recuperación de la inversión (Payback).

Segregación de residuos

Como se mencionó anteriormente, el estado actual en la segregación de residuos es solo del 10%, por lo que este se considera el caso pesimista, mientras el conservador corresponde a aumentar en un 15% llegando al 25% de segregación, y el caso optimista equivale a aumentar un 15% más llegando al 40% de los residuos orgánicos domiciliarios. El cálculo considera estos porcentajes al primer año, el cual aumenta linealmente dentro de los 10 años de evaluación, de acuerdo a la estimación de residuos generados.

En la Figura 9 y la Tabla 16 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad.

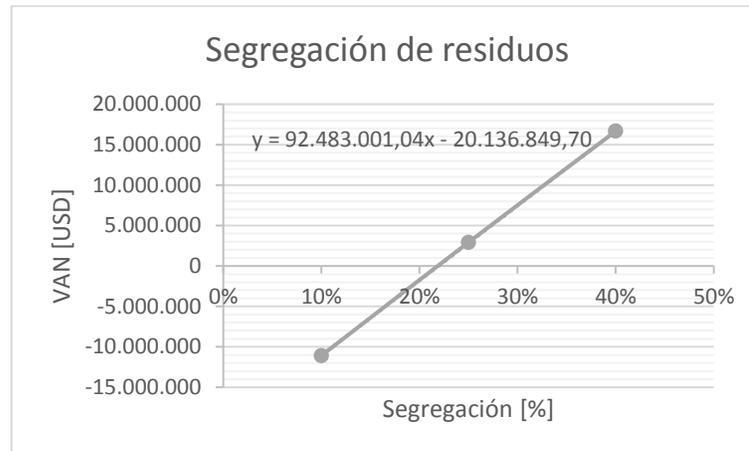


Figura 9: Análisis del VAN según la segregación de residuos

Tabla 16: Análisis de sensibilidad de la segregación de residuos

	Pesimista	Conservador	Optimista	Unidad
Segregación de residuos	10%	25%	40%	[%]
VAN	-11.083.458	2.929.059	16.666.517	[USD]
TIR	6%	14%	25%	[%]
Payback	6	5	5	[años]

Los resultados obtenidos indican que el punto límite para el proyecto, cuando el VAN se hace nulo, corresponde a la segregación de casi el 22% de los residuos orgánicos.

El caso pesimista no es rentable, debido a que el VAN se hace negativo, la TIR es menor a la tasa de descuento y el Payback es superior a los 5 años.

Horizonte de evaluación

Considerando que el proyecto se ubica en el relleno sanitario Santa Marta, se sabe que su vida útil es de 10 años, por lo que este sería el caso mínimo. Dependiendo del funcionamiento del relleno se cree que su vida útil podría variar a lo más 5 años, por lo que el caso conservador es a los 12 años y el optimista es a los 15 años de evaluación.

En la Figura 10 y la Tabla 17 se observan los resultados obtenidos.

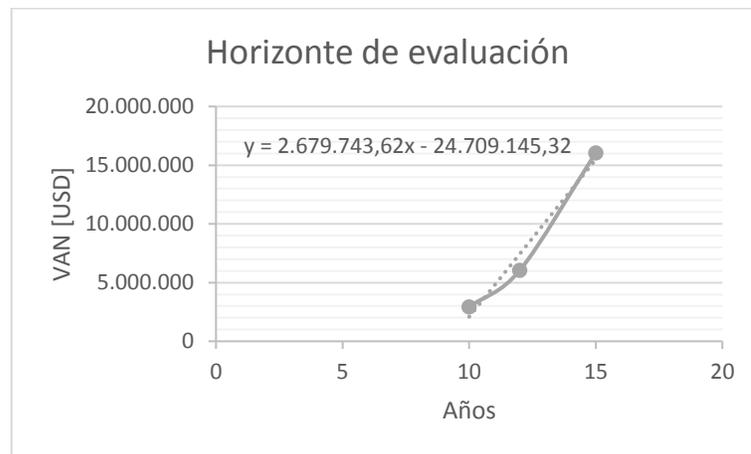


Figura 10: Análisis del VAN según el horizonte de evaluación

Tabla 17: Análisis de sensibilidad del horizonte de evaluación

	Pesimista	Conservador	Optimista	Unidad
Horizonte de evaluación	10	12	15	[años]
VAN	2.929.059	6.046.497	16.047.521	[USD]
TIR	14%	16%	20%	[%]
Payback	5	4	4	[años]

El proyecto sería rentable con un horizonte de 10 años, con un VAN cercano a los 3 millones de dólares, TIR mayor a la tasa de descuento y Payback menor o igual a 5 años, esto quiere decir que desde el sexto año el proyecto va a generar ganancias, por lo tanto, el proyecto debe implementarse al menos 6 años. Además, como se puede ver la relación entre el horizonte y el VAN no es lineal, principalmente porque el VAN es afectado por la vida útil de los equipos al cambiar el horizonte de evaluación.

Precio energía eléctrica

Estudios sobre el precio de la energía en Chile muestran que la tendencia en los últimos años ha ido a la baja y se espera que esto continúe por los próximos años (Utreras, Goharriz y Mora, 2016; Diario financiero, 2017). Sin embargo, hay varios factores que generan cierta incertidumbre en el precio futuro de la energía, por un lado, el aumento de la matriz energética en energías renovables que conlleva a una mayor competencia, la variación en los precios de los combustibles, proyectos del sistema eléctrico, cambios legales y variaciones en la demanda (APEMEC, 2016).

Se considera un escenario base de acuerdo a la fijación de precios nudo promedio del sistema eléctrico nacional al 2018, de 90 [USD/MWh] (CNE, 2018). Para el resto de los escenarios se asume una tendencia; en el caso pesimista se supone un precio de 80 [USD/MWh] con un crecimiento negativo del 2% por año con respecto al año anterior, y en el caso optimista un valor de 100 [USD/MWh] con un crecimiento del 2% por año.

A continuación, en la Figura 11 y la Tabla 18 se presentan los resultados de análisis.

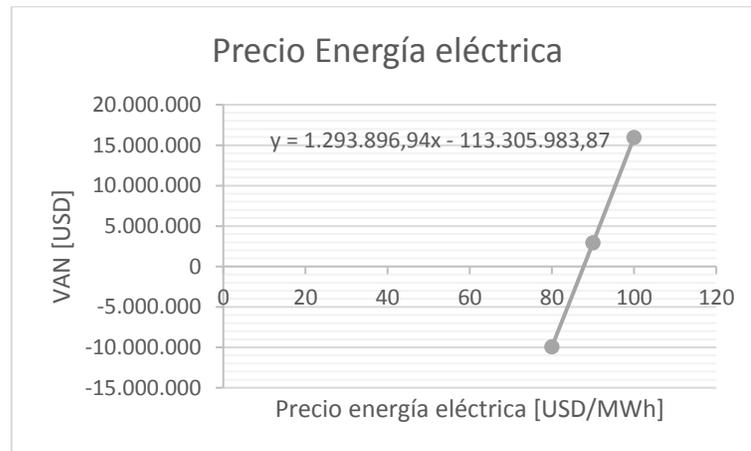


Figura 11: Análisis del VAN según el precio de la energía eléctrica

Tabla 18: Análisis de sensibilidad del precio de la energía eléctrica

	Pesimista	Conservador	Optimista	
Precio Energía eléctrica	80	90	100	[USD/MWh]
Crecimiento	-2%	0%	2%	[%]
VAN	-9.908.717	2.929.059	15.974.297	[USD]
TIR	6%	14%	22%	[%]
Payback	5	4	4	[años]

Los resultados indican que el proyecto no es rentable si la tendencia del precio va a la baja, en este escenario el precio varía desde 80 [USD/MWh] hasta 64 [USD/MWh] al décimo año, arrojando un VAN negativo de gran magnitud, una TIR inferior a la tasa de descuento y un Payback de 5 años.

Mientras el caso optimista entrega buenos indicadores económicos, un VAN cercano a los 16 millones de dólares, una TIR muy superior a la tasa de descuento y la inversión se

recuperaría a los 4 años, este escenario asume una variación del precio de 100 a 120 [USD/MWh].

Precio potencia eléctrica

Al igual que el precio de la energía, se espera que en los próximos años el precio de la potencia baje (Utreras et al., 2016; Diario financiero, 2017). Pero existe gran incertidumbre en el precio futuro (APEMEC, 2016).

El escenario base considerado de acuerdo a la fijación de precios nudo promedio del sistema eléctrico nacional al 2018, es de 9 [USD/MWh] (CNE, 2018). Para el caso pesimista se supone un precio de 8 [USD/MWh] con un crecimiento negativo del 2% por año con respecto al año anterior, y en el caso optimista un valor de 10 [USD/MWh] con un crecimiento del 2% por año.

En la Figura 12 y la Tabla 19 se muestran los resultados.

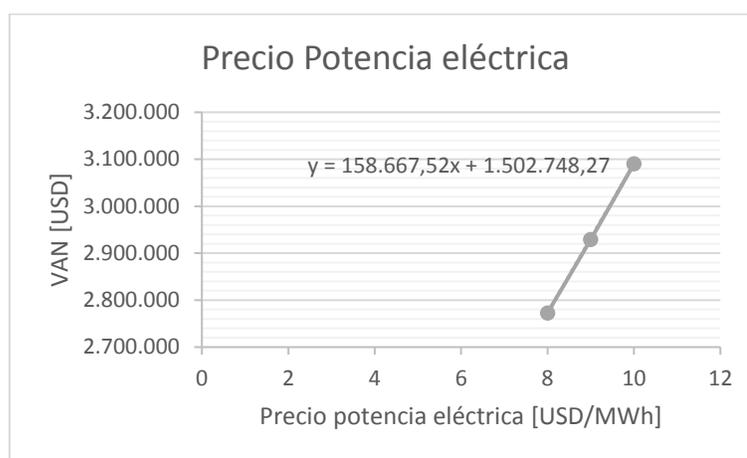


Figura 12: Análisis del VAN según el precio de la potencia eléctrica

Tabla 19: Análisis de sensibilidad del precio de la potencia eléctrica

	Pesimista	Conservador	Optimista	Unidad
Precio potencia eléctrica	8	9	10	[USD/MWh]
Crecimiento	-2%	0%	2%	[%]
VAN	2.772.937	2.929.059	3.090.272	[USD]
TIR	14%	14%	14%	[%]
Payback	5	5	5	[años]

En este análisis, se observa que el valor de la potencia no es tan significativo en la rentabilidad del proyecto, pues el rango de variación en el precio no es mucho y la variación de los índices económicos es pequeña, el VAN varía poco, la TIR y el Payback se mantienen constantes. Con ello, se puede apreciar que a mayor precio de potencia el proyecto se hace más rentable según el VAN.

Precio Carbón activado

Dado que el carbón activado es el insumo que más impacta en los costos del proceso, pues el proceso no incluye la purificación de este, se sensibiliza su precio. De acuerdo a cotizaciones de carbón activado granular para purificación de gases, se encuentran precios entre 500 y 1.500 [USD/ton]. Debido a que el proyecto consume bastantes toneladas de carbón activado se considerará un carbón de calidad media de entre 600 y 1.000 [USD/ton]. El escenario conservador es de 800 [USD/ton], el pesimista de 1.000 [USD/ton] y el optimista de 600 [USD/ton] (Yinchuan Meikelin Activated Carbon Co., Ltd., 2017; Zhengzhou Jianxing Water Industry Co., Ltd., 2017; Tianjin TYWH Import & Export Co., Ltd., 2017).

El análisis se encuentra en la Figura 13 y la Tabla 20.

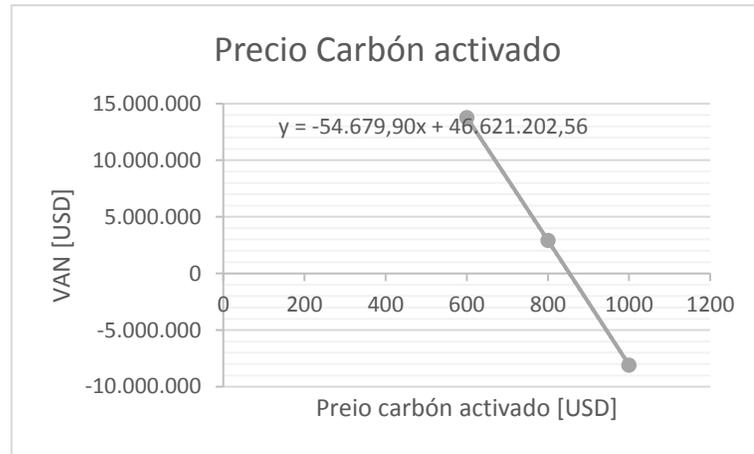


Figura 13: Análisis del VAN según el precio del carbón activado

Tabla 20: Análisis de sensibilidad del precio de carbón activado

	Optimista	Conservador	Pesimista	Unidad
Precio Carbón activado	600	800	1.000	[USD/ton]
VAN	13.787.379	2.929.059	-8.084.580	[USD]
TIR	21%	14%	7%	[%]
Payback	4	5	5	[años]

El análisis indica que el proyecto es bastante sensible a la variación del precio del carbón activado. Para un precio de 600 [USD/ton] el proyecto es altamente rentable, con un VAN superior a los 13 millones de dólares, una TIR mayor a la tasa de descuento y la inversión se recupera al cuarto año. Por otro lado, al considerar un precio de 1.000 [USD/ton] el VAN se hace negativo sobre los 8 millones de dólares, la TIR es menor a la tasa de descuento y el Payback se mantiene en 5 años con respecto al caso conservador.

El análisis de sensibilidad permite identificar las variables más significativas en la rentabilidad del proyecto. Se observa que las variables más relevantes son capacidad de segregación de los residuos, el precio de la energía eléctrica y el precio del carbón activado.

7. Estudio de sostenibilidad

Los ciclos de sostenibilidad permiten un estudio más íntegro del proyecto, esto incluye la aplicación de 4 ciclos, el económico que ya se evaluó, el político, el ecológico y el cultural ([The Circles Project](#)). En este capítulo se profundiza el análisis de estas tres últimas áreas.

7.1. Estudio político

Este estudio se enfoca en la ley y justicia para la sociedad afectada, para ellos se debe garantizar la protección de los derechos humanos y el orden civil en el área urbana, lo cual se ratifica cumpliendo con las normativas de seguridad laboral y medioambiental, establecidas en el reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo ([Decreto 594, 2015](#)) y el reglamento que establece los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las instalaciones de biogás con fines energéticos ([SEC, 2014](#)). Además, se debe conocer la recepción de los residentes locales, como iguales antes la ley, frente a este proyecto y el sistema legal dominante.

El caso ocurrido en el relleno sanitario Santa Marta durante el 2016, tras el deslizamiento de lodo e incendio de los residuos que afectaron a varias comunas de Santiago, fue debido al incumplimiento de las medidas establecidas en sus Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) según la Superintendencia del Medio Ambiente.

También, es importante considerar la posible adecuación de los juicios legales, en caso de nuevas situaciones conflictivas, como podría llegar a ocurrir en una planta de gran escala, con el fin de mejorar la calidad de la administración legal.

7.2. Estudio ecológico

El proyecto de cogeneración afecta el agua, el aire y la tierra del medio ambiente, debido al consumo de agua requerido en el proceso, los gases contaminantes emitidos a la atmósfera y el digestato producido como subproducto respectivamente.

El agua consumida, corresponde a 0,05 [m³] por tonelada de residuo en el biodigestor, lo que equivale a 9.346 [m³] al mes de agua para producir intercambio de calor entre los cogeneradores y los digestores. De esta forma se alcanza un consumo anual de 117.280 [m³/año].

Los gases emitidos corresponden principalmente a CO₂, gas de efecto invernadero, la digestión anaeróbica lo produce y el metano al ser combustionado genera CO₂ y vapor de agua. Así, se pueden llegar a producir 768.386 [ton/año] de CO₂. Mientras el metano consumido corresponde a 256.958 [ton/año].

El digestato concentrado obtenido se puede comercializar directamente para usar como fertilizante en suelos, debido a que su porcentaje de agua es bajo y luego del proceso termofílico debería encontrarse estabilizado, aunque es necesario verificar esto en la realidad. El digestato, se caracteriza por su gran aporte de minerales, especialmente

nitrógeno, los cuales reducen problemas de compactación, erosión e incrementan la capacidad de retención de agua, favoreciendo el desarrollo de cultivos. Sin embargo, la composición del digestato varía bastante de acuerdo a las características bioquímicas del material descompuesto, si este es rico en nutrientes entonces se obtendrá un fertilizante orgánico (Varnero, 2011). Según la evaluación técnica, el proyecto podría generar 104.221 [ton/año] de fertilizante.

6.3. Estudio cultural

Este estudio, se enfocará en las temáticas de consulta y aprendizaje junto a Salud y bienestar.

Si bien, el fin de la planta no es educativo, esta debe estar adaptada para recibir vistas de estudiantes universitarios o de institutos profesionales, u organizaciones que deseen visitar la planta, por lo que el espacio debe contar con todas las indicaciones de seguridad que establece el Decreto 594, como señalizaciones y espacios seguros para transitar.

También, es importante involucrar a los vecinos del sector y a los que trabajan en la planta, dando a conocer el proceso que desarrolla la planta y sus posibles impactos, mediante talleres, charlas, visitas u otras actividades.

Entregar herramientas de seguridad frente a situaciones problemáticas, permite asegurar su salud y bienestar, además de generar confiabilidad.

8. Discusiones

En Chile, actualmente la gestión de residuos es incipiente todavía, el manejo de residuos consiste principalmente en la recolección y disposición final de éstos, dejando de lado el aprovechamiento o tratamiento de ellos ([Sáez y Urdaneta, 2014](#)). Si bien, el 2016 en Chile se promulgó la ley 20.920 que establece un esquema sobre la gestión de residuos, los procesos de cambio son lentos y se requiere un fuerte apoyo tanto del gobierno como la comunidad, a través de colaboración, altas inversiones y educación continua de la comunidad sobre el aprovechamiento de los residuos, por parte del gobierno.

Además de la problemática en la gestión de residuos, Chile y el mundo actualmente se encuentra en una crisis energética ([Ministerio de Energía, 2016](#)). El consumo y la producción energética van en aumento, debido al crecimiento económico, el incremento de la capacidad productiva, el desarrollo del transporte y el aumento de la población. Sin embargo, en el último tiempo ha habido una revolución tecnológica en energías renovables, las cuales poco a poco se han ido posicionando dentro de la matriz energética. Al 2014, 7% de la generación eléctrica en Chile proviene de fuente solar, de biomasa o eólica.

Chile se encuentra en un periodo de transición hacia un aumento en la generación de energías renovables no convencionales que puede verse facilitado por el crecimiento económico del país, según el banco mundial la tasa de crecimiento porcentual anual del PIB para el 2018 será de 2% ([Grupo Banco Mundial, 2017](#)).

El proyecto de tratamiento de residuos orgánicos se localizó en la Región Metropolitana, debido a que se concentra el 40% de la población chilena, aquí se eligió un flujo promedio de residuos domiciliarios que corresponde al relleno sanitario Santa Marta, donde 19 comunas de la región llevan sus residuos. Considerando la segregación completa de los residuos y el flujo máximo a tratar en 10 años se obtiene un caso base de 101.544 [ton/mes], para lo cual se requiere una planta que abarca cerca de 10 hectáreas, lo cual se encuentra disponible en el relleno Santa Marta, pues de las 296 hectáreas disponibles 87,6 hectáreas estaban destinadas a tratamiento de residuos ([Consortio Santa Marta](#)). Además, el relleno ha presentado problemas de funcionamiento en el último tiempo, por lo que, la ubicación del proyecto es solo referencial.

A la fecha, se estima el rendimiento de la captación de biogás de los rellenos sanitarios, con el proyecto Santa Marta se obtiene una conversión del 0,18 [MWh/ton] y en Lomas Lo Colorado 0,22 [MWh/ton]. Y según, este proyecto la producción actual de Biogás en Santa Marta sería de 0,76 [MWh/ton], considerando la segregación completa de los residuos orgánicos de acuerdo con los criterios mencionados.

A pesar de que la segregación de los residuos es una de las principales limitaciones hoy en día, dado que la materia prima es un residuo, el presente trabajo pretende incentivar a la comunidad en el aprovechamiento de la materia orgánica para la generación de energía eléctrica, pues todavía Chile se encuentra en un periodo de transición hacia el uso de nuevas tecnologías de reciclaje.

La evaluación técnica y económica de una planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos domiciliarios orgánicos, implica una serie de supuestos y decisiones que afectan significativamente el desarrollo y la viabilidad del proyecto. Como la estimación de la materia orgánica de los residuos domiciliarios diferenciados en función del nivel socioeconómico de la comunidad; la proyección de estos en 10 años, tomando como supuesto que su composición se mantenga en el tiempo; además se caracterizan los residuos en general cómo biomasa seca, sin embargo, esto varía con la humedad de los residuos.

Por otro lado, las decisiones tomadas sobre el diseño de la planta son importantes para el proyecto. Existen una variedad de tecnologías que se pueden analizar cuidadosamente, en el marco conceptual se mencionan algunos criterios de elección para las tecnologías de fermentación, tratamiento de biogás y de generación, etapas más relevantes del proceso para el caso de biomasa seca ([Environment Canada, 2013](#)). La tecnología de fermentación depende principalmente de la materia orgánica a tratar, además, su rendimiento varía de acuerdo con las condiciones de operación; el tratamiento de biogás depende especialmente del uso que se le va a dar al biogás, en general se evitan problemas de contaminación, de corrosión en los equipos y se aumenta su poder calorífico. Además, para este trabajo solo se consideró abatimiento de NO_x , pues se asume combustión completa de biogás, sin embargo, en la realidad se puede generar monóxido de carbono que debe ser tratado por su toxicidad.

La evaluación técnica de la planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos domiciliarios orgánicos proyecta que el proceso es factible técnicamente, principalmente debido al conocimiento que se tienen sobre las tecnologías usadas y sus aplicaciones en este rubro ([Environment Canada, 2013](#); [Varnero, 2011](#)). Alcanzando un rendimiento de 211 [m^3 biogás/ ton materia orgánica], aunque esta conversión es menor a la esperada, según los factores de conversión de la Tabla 2, el proyecto es rentable económicamente; esta diferencia se puede deber a la cinética considerada según el caso de estudio.

Las etapas del proceso se separan en: la línea principal que corresponde a la recepción, molienda, transporte y digestión de residuos orgánicos, almacenamiento, enfriamiento, adsorción y cogeneración de biogás, junto a la filtración de los gases de combustión. Como líneas secundarias se encuentran, la concentración de digesto mediante filtración y recuperación de agua en el proceso con un estanque de almacenamiento, además de la recuperación de calor en el cogenerador para usarlo en la digestión a través de intercambiadores de calor.

Las dimensiones de los equipos son superiores a los proyectos existentes en Chile, en la planta diseñada se podría producir 21,4 millones [m^3/mes] de biogás, mientras en el relleno sanitario Lomas Lo Colorado se producen 4,3 millones [m^3/mes] con una capacidad instalada de 28 MW de energía eléctrica y Santa Marta produce 3,6 millones [m^3/mes] con una capacidad instalada de 20 MW ([SEREMI,2014](#)). Otro de los grandes proyectos en biomasa corresponden a los implementados por aguas andinas en tratamiento de aguas servidas, la planta de la Farfana produce 2,7 millones [m^3/mes] de biogás para inyección a la red de gas natural y Trebal 2,1 [m^3/mes] para cogeneración con capacidad de 8,1 MW ([Aguas andinas, 2017](#)); en la Farfana se poseen ocho

digestores de 15.000 [m³] ([Chaple, 2008](#)), equivalente a 120.000 [m³] lo que es superior al proyecto estudiado, sin embargo se trata de un tipo de residuo con bastante flujo de agua, mientras los gasómetros poseen un volumen total de 10.000 [m³] (Nelson, 2009) inferior al caso estudiado, debido a su baja producción de biogás.

Uno de los equipos que se recomienda reevaluar en el proceso, es el adsorbedor, pues para el dimensionamiento se asume que solo se adsorberá H₂S, pero también podría extraer CO₂ e incluso CH₄ ([Álvarez, 2016](#)). Además, podría considerarse la purificación del carbón activado u otro tipo de tecnología con alto rendimiento y menores costos para la extracción de H₂S como los biofiltros, tratamiento biológico sin oxígeno o lecho de hidróxido de hierro ([Gabriel y Sierra, 2017](#)).

En base al diseño del proceso y su evaluación técnica se hace posible evaluar económicamente el proyecto, cuantificar los costos de inversión operación y los ingresos principalmente por energía eléctrica y digestato, obteniendo la prefactibilidad económica del proyecto según el caso base considerado.

El costo de inversión alcanza casi los 59 millones de dólares lo que se encuentra entre los rangos de inversión de los rellenos sanitarios con sistema de captación de biogás, como Santa Marta con una inversión de 36 millones de dólares ([Chile energía, 2017](#)) y Lomas Lo Colorado con 85 millones de dólares ([Hidalgo, 2017](#)), mientras el proyecto de la Farfana tiene una inversión de 315 Millones de dólares ([Chaple, 2008](#)), dado que el proyecto contempla el saneamiento de agua y el tratamiento de lodos activados convencionales con digestión anaeróbica, operaciones más costosas que para biomasa seca. Además, está dentro de los rangos de estimación de inversión con 550 [USD/kWe] y de operación con 140 [USD/kWe] ([Chamy y Vivanco, 2007](#)).

Si bien, el proyecto es rentable, obteniendo un VAN de 3.435.703 [USD], una TIR del 14% y un Payback de 5 años, el proyecto es sensible principalmente al precio de la energía eléctrica, la capacidad de segregación de los residuos y el precio del carbón activado. El precio de la energía afecta directamente en los ingresos del proyecto por venta de energía eléctrica, entonces el proyecto presentaría un riesgo si el precio baja en el futuro según pronósticos ([Utreras et al., 2016](#); [Diario financiero, 2017](#)). La capacidad de segregación es sin duda la variable más significativa y a la vez difícil de predecir, pues todavía no hay un plan de educación continua para la comunidad sobre gestión de los residuos. Mientras el consumo de carbón activado en el proceso es relevante, debido a flujo que se requiere tratar y no se considera su reutilización mediante procesos de purificación, además, no se considera la variación del carbón activado necesario frente a la capacidad de segregación, y se trata de un insumo costoso, por lo que el uso de esta tecnología afecta la rentabilidad del proyecto, así es que es aconsejable evaluar otro tipo de técnica para purificar el biogás.

Del estudio de sostenibilidad, se rescata la responsabilidad que debería tomar la organización de este proyecto a la hora de implementarlo, pues para que el proyecto sea integro no solo basta cumplir con la normativa vigente, también se debe considerar a la comunidad que se encuentra alrededor y el medio en el que habita. Dado que el impacto del proyecto depende del contexto en el que se desarrolle.

9. Conclusiones y recomendaciones

El proyecto planteado surge en Chile, por la falta de una gestión de residuos compatible con el medio ambiente y por la crisis económica, la cual ha generado la necesidad de aumentar la matriz energética en energías renovables no convencionales.

El proyecto se enmarca en la Región Metropolitana, debido a que aquí se concentra el 40% de la población chilena. Se elige un flujo promedio de residuos domiciliarios que corresponde al relleno sanitario Santa Marta, donde 19 comunas de la región llevan sus residuos. Considerando la segregación completa de los residuos y el flujo máximo posiblemente a generar de acuerdo con una proyección a 10 años, se alcanza un flujo a tratar de 101.544 [ton/mes] de forma continua.

Este estudio, pretende incentivar a la comunidad en el aprovechamiento de la materia orgánica para la generación de energía eléctrica, ya que Chile todavía se encuentra en un periodo de transición hacia el uso de tecnologías de reciclaje.

De la evaluación técnica y económica de la planta se obtiene que el proyecto es prefactible. Alcanzando un rendimiento de 211 [m³ de biogás/ ton materia orgánica] junto a un VAN de 3.435.703 [USD], una TIR del 14% y un Payback de 5 años.

Según estudios previos, proyectos de este rubro, de baja escala, ya eran rentables, por lo que este proyecto debería ser rentable, como resultó, sin embargo, se pudo constatar la sensibilidad del proyecto frente a la capacidad de segregación de los residuos, el precio de la energía eléctrica y el precio del carbón activado.

Finalmente, se rescata la importancia de un estudio de prefactibilidad integral que incluya un análisis político, ecológico y cultural detallado del contexto en el que se va a desarrollar, con el fin de considerar la normativa vigente, la comunidad afectada y el impacto ambiental del proyecto.

Recomendaciones

A la hora de implementar un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos domiciliarios, lo más importante a considerar es la capacidad de segregación de los residuos, para definir el caso base a estudiar.

También es importante la localización del proyecto, para ahorrar en transporte, si bien en este caso son los municipios que se hacen cargo de trasladar sus residuos a los rellenos sanitarios, en caso contrario el transporte de la materia sería significativo para la rentabilidad del proyecto, esto podría cambiar si una empresa se hiciera cargo de un proyecto de este tipo, de todas formas, se recomienda que la materia prima este localizada a lo más a 50 kilómetros en zona rural o 28 kilómetros en zona urbana ([Pöschl, Ward, y Owende, 2010](#)).

Una vez que el caso base y la localización están definidos, luego es relevante caracterizar los residuos para conocer sus propiedades y realizar adecuadamente los balances de masa, energía y el dimensionamiento de la planta. Por otro lado, en el diseño de la planta

se debe estudiar las tecnologías disponibles para las operaciones principales del proyecto, como la digestión, la purificación del biogás y la cogeneración, debido a su importancia en el funcionamiento de la planta.

Además, a la hora de implementar el proyecto en un determinado contexto se debe considerar, en el ámbito político, la normativa vigente de seguridad para instalaciones de biogás, en el ámbito ecológico, el impacto ambiental del proyecto, y en el cultural, la comunidad afectada.

10. Bibliografía

Agencia Chilena de Eficiencia Energética [AChEE]. 2010. «Guía para la calificación de consultores en eficiencia energética, Ejemplos Prácticos,» [en línea]. <http://old.acee.cl/577/articles-62222_recurso_2.pdf> [consulta: 08 septiembre 2017]

Aguas andinas. Septiembre 2017. De plantas de tratamiento de aguas servidas a biofactorias. [en línea] <<https://www.fitga.cl/wp-content/uploads/2017/10/De-plantas-de-tratamiento-de-aguas-servidas-a-biofactori%CC%81as.-Yves-Lesty.pdf>> [consulta: 18 enero 2018]

Alacero. 2016. América Latina: Importaciones de acero y precio promedio desde China disminuyen 20% en ene-sep 2016 [en línea] <<https://www.alacero.org/es/page/prensa/noticias/america-latina-importaciones-de-acero-y-precio-promedio-desde-china-disminuyen>> [consulta: 08 enero 2018]

Álvarez Gutiérrez, Noelia. 2016. Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás. Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor con Mención Internacional. Oviedo. Universidad de Oviedo 270p.

Alcolea, Miriam y González, Cristina. 2000. Manual de compostaje doméstico. Barcelona [en línea] <<http://www.resol.com.br/cartilhas/manual-compostaje-en-casa-barcelona.pdf>> [consulta: 08 septiembre 2017]

Araya, Jorge. Información filtro SCR [en línea] <biblio@cobre.reuna.cl> martes 5 diciembre 2017 <mcastro@uchile.cl> [consulta: 10 de noviembre 2017]

Asociación de pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas [APEMEC]. 2016. Proyección del costo marginal y comercialización de la energía: desafíos para la minihidro. Systep [en línea] <http://www.systep.cl/documents/Rudnick_APEMEC_290616.pdf> [consulta: 08 enero 2018]

Bio Business Group [BBG]. Listado de servicios y precios referenciales [en línea] <<http://www.biobusinessgroup.com/wp-content/uploads/Listado-servicios-y-precios-backoffice.pdf>> [consulta: 12 diciembre 2017]

Botou Xin Jia Machinery Co., Ltd. 2017. Silo de alimentación auto espiral sin fin cerrado tornillo transportador. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/feed-silo-auto-endless-spiral-enclosed-screw-conveyor-60690371202.html?spm=a2700.8698675.29.2.669d638916Uowj&s=p>> [consulta: 08 diciembre 2017]

Carrasco, Juan. 2015. Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Biotecnología. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 197p.

Cengel, Y. 2011. Termodinámica. Inc. New York, N.Y., U.S.A. The McGraw-Hill Companies.

Chamy, Rolando y Vivanco, Elba. 2007. Potencial de Biogás. Comisión Nacional de Energía, Santiago, 82p.

Chang, Penny. Cotización filtro de hoja. [en línea] <nc@kingmanplant.com> jueves 30 noviembre 2017 <tamara.faundez.a@gmail.com> [consulta: 10 noviembre 2017]

Chaple, Paula. Septiembre 2008. Planta de tratamiento de aguas la Farfana, huele a nuevo. Revista BIT [en línea] <<http://biblioteca.cchc.cl/datafiles/21155.pdf>> [consulta: 18 enero 2018]

Chile energía. 2017. Consorcio Santa Marta S.A. [en línea] <<http://chile-energia.cl/consorcio-santa-marta-s-a/>> [consulta: 18 enero 2018]

CIS Asociados Consultores en Transporte. 1999. Análisis Vial Sitios Potenciales Localización R.S.D., 26p.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. Análisis y propuestas para las tarifas de los residuos sólidos domésticos en América Latina. 1998, 42p.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. 2016, 211p.

Comisión Nacional de Energía [CNE]. Abril 2017. Energía abierta. Capacidad instalada [en línea] <<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>> [consulta: 03 junio 2017]

Comisión nacional de energía [CNE]. 2018. Fijación de precios de nudo promedio del sistema eléctrico nacional y de ajustes y recargos por aplicación del mecanismo de equidad tarifaria residencial. Ministerio de energía [en línea] <<https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2017/10/20171122-ITD-PNP-ENE18.pdf>> [consulta: 08 enero 2018]

Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA]. Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. 2010, 64p.

Consorcio Santa Marta. Relleno Sanitario Santa Marta [en línea] <<https://www.csmarta.cl/csm-residuos/relleno-sanitario/>> [consulta: 08 enero 2018]

Cooperativa. 26 de abril del 2017, Fiscalía pedirá formalizar a ejecutivos de Consorcio Santa Marta por daño medioambiental. Cooperativa [en línea] <<http://www.cooperativa.cl/noticias/pais/medioambiente/contaminacion/fiscalia-pedira-formalizar-a-ejecutivos-de-consorcio-santa-marta-por/2017-04-26/074255.html>> [consulta: 08 enero 2018]

Cueto, Andres. 2017. Evaluación de tecnologías para la reutilización, valorización y disposición de residuos orgánicos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 117p.

Decreto 189. Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios. Chile. Ministerio de salud. Enero 2008.

Decreto 594: aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo Chile. Ministerio de salud. Julio 2015.

Diario financiero. 22 de mayo del 2017. Precio de la energía bajará 33% en período 2017-2021 pese a alza de gas. Revista Electricidad. Negocio e industria. 1p.

Dongguan Naser Machinery Co., Ltd. 2017. Factory industrial chiller for outdoor use air cooled compressor. Alibaba [en línea] <https://wholesaler.alibaba.com/product-detail/Factory-industrial-chiller-for-outdoor-use_60456741373.html?spm=a2700.7782932.1998701000.2.7c947f45TjObZF> [consulta: 08 diciembre 2017]

Equipo de la Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF). Noviembre 2016. Estrategia nacional de cambio climático y recursos vegetacionales 2017-2025. 242p.

Entel. 2017. Planes NGN para empresas [en línea] <<http://www.entel.cl/empresas/planes-ngn/>> [consulta: 13 diciembre 2017]

Environment Canada. Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing. 2013, 220p.

Fernández Güelfo, Luis Alberto. 2008. Caracterización Cinética de la Degradación Anaerobia Termofílica Seca de la FROSU. Efecto de Diferentes Pretratamientos Sobre la Biodegradabilidad del Residuo. Tesis para optar al grado de doctor en ingeniería química, Universidad de Cádiz, 442p.

Fernández Ríos, Patricio y Araya, Jorge. 2012. Tecnologías de reducción de Emisiones de NOx. Caso: Uso sistema de Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Better Technologies. [en línea] <<http://www.better.cl/assets/files/publicaciones/Newsbetter-SCR-y-caso.pdf>> [consulta: 12 diciembre 2017]

Gabriel, D., y Sierra, H. 2017. Purificación y usos del biogás. Universidad autónoma de Barcelona.

Gamma Ingenieros. 2011. Revisión normativa actual y norma técnica y de seguridad para instalaciones de biogás en la producción y en el uso. Ministerio de energía Subsecretaría de energía [en línea] <http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/3_Revisi%C3%B3n%20normativa%20para%20instalaciones%20de%20biogas_Gamma%20Ing_584105-34-LE11.pdf> [consulta: 20 noviembre 2017]

González Aguilera, Paloma. 2016. Estudio de la adsorción de sulfuro de hidrógeno usando lodos secos de depuradora con aplicación al biogás de vertedero. Evaluación experimental, modelado y simulación. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Grupo Banco Mundial. 2017. Chile [en línea] <<https://datos.bancomundial.org/pais/chile>> [consulta: 18 enero 2018]

Grupo de residuos sólidos. 28 marzo 2006. Estudio caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la región metropolitana. Comisión nacional de medio ambiente [CONAMA]. 121p.

Gutierrez Alzamora, Joaquin. Cotización compresores de biogás. [en línea] <jgutierrez@aerzen.cl> jueves 14 diciembre 2017 < tamara.faundez.a@gmail.com> [consulta: 10 noviembre 2017]

Guzmán Acosta, Miguel Alejandro. 2012. Manual de diseño para sistemas de tuberías y tanques atmosféricos de techo fijo. Informe de pasantía. Venezuela. Universidad Simón Bolívar. 112p.

Hidalgo, B. Julio 2017. Comité de ministros aprobó planta de residuos en Tiltil [en línea] <<http://impresa.lasegunda.com/2017/07/25/A/V5370FV2/IG370RG0>> [consulta: 18 enero 2018]

Instituto Nacional de estadísticas [INE] [en línea] <<http://www.ine.cl/estadisticas/demograficas-y-vitales>> [consulta: 04 noviembre 2017]

Jiangxi Shicheng Mine Machinery Factory. 2017. Trituradora de martillo. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/venta-caliente-trituradora-de-martillo-molino-de-martillos-precio-bajo-para-la-competencia-60652219306.html>> [consulta: 08 diciembre 2017]

Labbé Opazo, Francisco y Carrasco Arriagada, Eduardo. 2012. Resultados XVIII censo de población 2012 [en línea] <https://www.cooperativa.cl/noticias/site/artic/20130425/asocfile/20130425190105/resultados_censo_2012_poblacion_vivienda_tomosiyii.pdf> [consulta: 08 septiembre 2017]

Lau LC, MohamadNor NM, Lee KT y Mohamed AR. 2016. Adsorption Isotherm, Kinetic, Thermodynamic and Breakthrough Curve Models of H₂S Removal Using CeO₂/NaOH/PSAC.

Ley 20.257. Introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. Chile. Ministerio de economía. Octubre 2013.

Ley 20.920. establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. Julio 2016.

Martínez, Mauricio. 2011. Estudio de factibilidad técnico ambiental, social y económica para la implementación del plan de acción “Santiago Recicla”, 35p.

Mescia, D., Hernández, S. P., Conoci, A., & Russo, N. 2011. MSW landfill biogas desulfurization. *international journal of hydrogen energy*, 36(13), 7884-7890.

Mifuturo. Estadísticas por carrera [en línea] <<http://www.mifuturo.cl/index.php/futuro-laboral/buscador-por-carrera>> [consulta: 12 diciembre 2017]

Ministerio de Energía. 2016. Energía 2050. Política energética de Chile. 157p.

Ministerio del medio ambiente [MMA]. 29 de febrero 2016. Nueva política nacional busca reducir en cerca de 30% la generación de basura en Chile [en línea] <<http://portal.mma.gob.cl/nueva-politica-nacional-busca-reducir-en-cerca-de-30-la-generacion-de-basura-en-chile/>> [consulta: 12 diciembre 2017]

Ministerio del medio ambiente [MMA]. 28 de septiembre 2015. Asamblea General de la ONU: Chile compromete reducción de un 30% de emisión de gases de efecto invernadero al año 2030 [en línea] <<http://portal.mma.gob.cl/asamblea-general-de-la-onu-chile-compromete-reduccion-de-un-30-de-emision-de-gases-de-efecto-invernadero-al-ano-2030-2/>> [consulta: 03 junio 2017]

Municipalidad de Maipú. Julio 2016. Gestión de residuos domiciliarios Maipú <<http://ciperchile.cl/wp-content/uploads/Presentacion-Basura-Maipu.pdf>> [consulta: 18 diciembre 2017]

NIC. 2017. Tarifas Vigentes. Inscripción y Renovación de dominios [en línea] <<http://www.nic.cl/dominios/tarifas.html>> [consulta: 13 diciembre 2017]

Niño Arias, Irma Viviana y Ortíz Ramírez, David. 2008. Evaluación de dos clases de carbón activado granular para su aplicación efectiva en la remoción de fenoles en los vertimientos de una empresa de jabones. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario. Bogotá. Universidad de la Salle 129p.

Nodar Balseiro, Lorena. 2012. Planta de biogás: Finca Mouriscade. Máster en producción animal. Universidad politécnica de Valencia. 56p.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. 2013. Manual de compostaje del agricultor, Santiago de Chile [en línea] <<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>> [consulta: 04 junio 2017]

Ortega Viera, L., Rodríguez Muñoz, S., Fernández Santana, E. y Bárcenas Pérez, L. 2015. Principales métodos para la desulfuración del biogás. Scielo, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 12p.

Paneque, M., Román-Figueroa, C., Vásquez-Panizza, R., Arriaza, J.M.; Morales, D. y Zulantay, M. 2011. Bioenergía en Chile. Santiago: Alfabeta Artes gráficas.

Pequinsa. 2017. Etilenglicol contenedor de 1.000 litros. SoloStocks [en línea] <<http://www.solostocks.com/venta-productos/quimicos-organicos-basicos/alcoholes/etilenglicol-contenedor-de-1-000-litros-26427804>> [consulta: 12 diciembre 2017]

Pérez Sáez, Raúl. 2004. Tablas de densidad, viscosidad y tensión superficiales. Universidad del País Vasco. Facultad de Ciencia y Tecnología [en línea] <http://www.ehu.es/rperez/Fisicabio/docs/densidad_visco.pdf> [consulta: 20 noviembre 2017]

- Peters, M.S. 1991. Plant design and economics for chemical engineers (4th ed.)
- Porras Hidalgo, Sebastián Alejandro. 2011. Producción de compost a partir de residuos sólidos de una planta de celulosa. Memoria para optar al título de ingeniero civil en biotecnología, Universidad de Chile, 90p.
- Pöschl, M., Ward, S., y Owende, P. 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. Applied Energy, 87(11), 3305-3321.
- Riveros Villegas, Patricio. 2016. Boletín de insumos. Marzo de 2016. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) [en línea] < <http://www.odepa.cl/boletin/boletin-de-insumos-marzo-de-2016/> > [consulta: 18 diciembre 2017]
- Sáez, A., y Urdaneta, J. A. 2014. Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Omnia, 20(3).
- Sánchez Díaz, Ignacio. 2009. Estudio Técnico y Económico de una Planta de Tratamiento de Residuos Vegetales en Getafe. Memoria para optar al título de master profesional en ingeniería y gestión medioambiental, Escuela de Organización Industrial, 97p.
- Seremi de Medio Ambiente Región Metropolitana [SEREMI]. Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la Región Metropolitana. 2014, 44p.
- Servicio de evaluación ambiental [SEA]. 2013. Instructivo: Consulta de pertinencia de ingreso al sistema de evaluación de impacto ambiental [en línea] < http://sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/archivos/instructivos/Instructivo_solicitudes_pertinencias.pdf > [consulta: 08 septiembre 2017]
- Servicio de impuestos internos [SII]. Enero 2003. Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado [en línea] <http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm> [consulta: 18 diciembre 2017]
- Servicio de impuestos internos [SII]. 2015. Impuestos directos [en línea] < http://www.sii.cl/aprenda_sobre_impuestos/impuestos/imp_directos.htm > [consulta: 12 diciembre 2017]
- Shijiazhuang Xinlongwei Chemical Co., Ltd. Productos químicos industriales acuosa de amoniaco 25%. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-chemicals-aqueous-ammonia-25-60616643528.html?spm=a2700.8699010.29.223.69c910bbcap1Rq>> [consulta: 08 diciembre 2017]
- Soporte Técnico. Informática Formateo Notebook Computadores [en línea] <http://articulo.mercadolibre.cl/MLC-434640932-soporte-tecnico-informatica-formateo-notebook-computadores-_JM> [consulta: 12 diciembre 2017]
- Stedman. Up and Down Running Hammer Mills. 2013 [en línea] <<http://www.stedman-machine.com/docs/600-R1d-Hammermill.pdf>>. [consulta: 29 octubre 2017].

Superintendencia de seguridad y combustibles [SEC], «Documento base de proyecto de reglamento de seguridad de instalaciones de biogás,» Santiago de Chile, 2014.

Subbarao, P.M.V. Convection in Flat Plate Turbulent Boundary Layers. Mechanical Engineering Department IIT Delhi.

Tchobanoglous, G., Theissen, H. y Eliassen, R. 1982. Desechos sólidos. Principios de ingeniería y administración, 216p.

The Circles Project. Circles of Social Life [en línea] < <http://www.circlesofsustainability.org> > [consulta: 04 junio 2017]

Tianjin TYWH Import & Export Co., Ltd. 2017. Alibaba [en línea] < <https://spanish.alibaba.com/product-detail/bulk-granular-activated-carbon-price-in-ton-used-for-carbon-filter-bag-air-purification-60741083289.html?spm=a2700.8698675.29.2.2a38f677HHQ2zW&s=p> > [consulta: 08 enero 2017]

Tioga. Pipe dimensions and weights [en línea] <<http://www.tiogapipe.com/assets/files/pipe-chart.pdf>> > [consulta: 07 noviembre 2017].

Tu salario.org. 2018. Carrera laboral. Función y salario [en línea] <<https://tusalarario.org/chile/main/carrera/funcion-y-salario>> [consulta: 12 diciembre 2017]

Universidad nacional autónoma de México [UNAM]. Termodinámica biológica. Apéndices [en línea] <http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/termodinamica_biologica/apendices.pdf> [consulta: 04 noviembre 2017]

Universidad de los Andes [ULA], «INTERCAMBIADORES DE TUBO Y CARCAZA,» Venezuela [en línea] <<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OP2/CARCAZATUB.pdf>> [consulta: 07 noviembre 2017].

Universidad de Chile. 2002. Equipos de separación sólido fluido. Operaciones mecánicas.

Utreras, M., Goharriz, K. y Mora V., Gustavo. Anuario Estadístico de Energía 2016 Ministerio de energía. Comisión nacional de energía. Gobierno de Chile [en línea] <<http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/anuariocne2016final3.pdf>> [consulta: 08 enero 2018]

Varnero Moreno, María Teresa. 2011. Manual De Biogás. © FAO

Varnero, Teresa. 2014. Evaluación del potencial de Producción de Biogás en Chile.

Vatavuk, William M., 1999. Adsorbedores. Controles de COV (46). US: EPA. 46p.

Velasco, Fernando Ramiro. 2009. Estudio de viabilidad y diseño de una planta de cogeneración para una industria cárnica. Tesis para optar al grado de ingeniero técnico industrial: mecánico. Departamento de ingeniería térmica y de fluidos. Universidad Carlos iii de Madrid. 150p.

Von, K., Santana, C., Könemund, T. y Franzen K. 2012. Guía de Planificación para Proyectos de biogás en Chile. Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) [en línea] <<http://www.aproval.cl/manejador/resources/guiaplanificacionproyectosbiogasweb.pdf>> [consulta: 20 septiembre 2017].

WAM Inc., «Cema® Screw Conveyors Wam Shaftless Screw Conveyors, Drag Conveyors, Bucket Elevators» 2002 [en línea] <http://services.eng.uts.edu.au/~johnd/MaterialsHandling/ScrewBucket/AA_TechCatalogue_WAM.pdf> [consulta: 29 octubre 2017].

Wenzhou Wuhuan Refrigeration Accessories Factory. 2017. WH Fábrica un tipo Mar Shell y tubo de refrigeración evaporador de titanio precio intercambiador de calor resistente a la corrosión condensador. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/wh-refrigeration-factory-a-shell-and-tube-type-sea-water-titanium-evaporator-condenser-corrosion-resistant-heat-exchanger-price-60428641792.html?spm=a2700.8698675.29.81.514fd583Gal9uZ&s=p>> [consulta: 08 diciembre 2017]

Windfinder. 2017. Estadísticas del viento y tiempo [en línea] <https://es.windfinder.com/windstatistics/santiago_de_chile> [consulta: 29 octubre 2017]

Xinxiang Jinrui Machinery Factory. 2017. China flexible sin fin tornillo transportador de la máquina precio. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/china-flexible-endless-screw-conveyor-machine-price-60470288640.html?spm=a2700.8698675.29.31.669d6389l6Uowj&s=p>> [consulta: 08 diciembre 2017]

Yinchuan Meikelin Activated Carbon Co., Ltd. 2017. Granular a base de carbón/polvo/columnas de carbón activado. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/coal-based-granular-powder-columnar-activated-carbon-60500073955.html?spm=a2700.8699010.29.2.4c16302dEmUkkg&s=p>> [consulta: 08 enero 2017]

Young, H. D., 1992, University Physics, 7th Ed., Addison Wesley.

Zhengzhou Jianxing Water Industry Co., Ltd. 2017. Venta caliente calgon carbón activado. Alibaba [en línea] <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/2017-hot-sale-calgon-activated-carbon-60704608053.html?spm=a2700.8699010.29.32.4c16302dEmUkkg>> [consulta: 08 enero 2017]

11. Anexos

Anexo A: Caracterización de residuos orgánicos

Los residuos orgánicos emitidos en Chile se caracterizan, en primera instancia, a partir de los rubros productivos. En las Tabla 21 y Tabla 22 se muestran los principales rubros, con su actividad y sus residuos generados respectivos. Estos corresponden al rubro forestal, agrícola, agroindustrial, ganadero, residuos domiciliarios e industriales en general. Los cuales a su vez se pueden clasificar en biomasa seca y húmeda ([Chamy y Vivanco, 2007](#)).

Tabla 21: Residuos de biomasa seca por rubro

Rubro	Actividad	Residuos	Disponibilidad
Forestales	Manejo y cosecha del bosque	Desechos de: Pino Radiata, Eucalipto, Atriplex, Tamarugo/Algarrobo, Pino Oregón y Álamo.	Dispersa
Agrícola	Cultivo de temporada	Rastrojo, poda, restos de plantas, descartes de productos (Principales cultivos: trigo, maíz, papa, raps, remolacha)	Dispersa
Agroindustrial	Fermentación Alcohólica: vino, pisco y cerveza.	Escobajo, Hollejo, Pepa, Vinaza, Orujo, Levadura de cerveza, Orujo de cebada, Tierras filtrantes (sólidos cerveceros).	Agrupada
	Procesamiento de frutas y verduras	Restos de frutas o verduras.	
	Bebidas e infusiones	Residuos de café instantáneo, té y sucedáneos.	
	Industria láctea	Descarte de cortes de queso y granos de cuajada derramados.	
Ganadero	Crianza avícola	Estiércol avícola	Concentrada
	Matadero	Huesos, astas, pezuñas, vísceras, pulmones e hígados, cueros, páncreas, bilis, sangre, plumas y contenido ruminal.	Agrupada
Residuos domiciliarios	Domiciliaria	Residuos sólidos domiciliarios (RSD)	Agrupada
		Poda y maleza en las ciudades	

Residuos industriales	Plantas de tratamiento de agua (PTA)	Lodos en PTA	Concentrada
------------------------------	--------------------------------------	--------------	-------------

Tabla 22: Residuos de biomasa húmeda por rubro

Rubro	Actividad	Residuos	Cantidad
Ganadero	Crianza de vacuno	Estiércol de vacuno	Agrupada
	Crianza de porcino	Estiércol de porcino	Concentrada
Residuos domiciliarios	Actividad doméstica	Aguas residuales domésticas	Agrupada
Residuos industriales	Actividad industrial	Residuo industrial líquido	Dispersa

Como se puede observar los residuos de actividades forestales y agrícolas se encuentran dispersos dentro del país. Mientras la actividad ganadera se encuentra menos dispersa, la crianza avícola se centra en el norte de Chile y la crianza de vacuno y porcino en el sur (Chamy y Vivanco, 2007).

Los residuos industriales líquidos se encuentran dispersos; las aguas residuales domésticas agrupadas, al igual que la agroindustria, la cual puede tener usos alternativos en los mismos rubros o en otros, y Chile cuenta con un reglamento sobre el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), al cual las industrias pueden someterse para ser evaluadas.

Y los residuos sólidos domiciliarios y los restos de poda están agrupados en las zonas urbanas de Chile, la cual se centra en la zona central, principalmente en la Región Metropolitana, donde se encuentra su capital.

Anexo B: Descripción jerarquía en la gestión de residuos

A continuación, se describe la jerarquización de residuos de acuerdo con la ley 20.920.

1. Prevención: Medidas que promueven, la no generación de residuos como principio fundamental. Para ello, deben concretarse medidas económicas, tecnológicas, logísticas, de sensibilización ciudadana, entre otras, lo que resulta difícil, pues requiere de grandes cambios en el modo de vida de las personas.
2. Reutilización: reaprovechamiento de los residuos, sin cambiar su naturaleza u origen, con el fin de evitar el consumo de nuevas materias primas, sin embargo, para el caso de los residuos orgánicos se torna un poco complejo, generalmente se destina como alimento para animales.
3. Valorización: Consiste en el aprovechamiento del contenido material o energético de los residuos para un fin útil, mediante reciclaje o valorización energética.

3.1. Reciclaje: Proceso de transformación de los residuos como materia prima para procesos productivos, con el fin de aprovechar el contenido material del residuo. Hay algunas industrias que reciclan parte de sus residuos, como biocombustibles, mediante fermentación, o en el rubro agrícola se pueden aprovechar los residuos generando compost o humus, a través de compostaje o vermicompostaje.

3.2. Valorización energética: Uso directo del residuo como combustible en un proceso productivo, como incineración, pirólisis o gasificación. Para ello, debe garantizarse que el proceso sea de alta eficiencia energética, la demanda energética sea real y que remplace energías no renovables, dado que sus costos son altos.

4. Disposición: Es la última prioridad, después de haber evaluado las opciones mencionadas anteriormente. Actividad de depósito definitivo de los residuos, con tratamiento previo para el caso de los residuos peligrosos, o disponerse en depósitos seguros, como los rellenos sanitarios, de acuerdo con la norma chilena.

Anexo C: Tecnologías aeróbicas

1. Proceso de descomposición aeróbica

Compostaje:

Es un proceso de descomposición aeróbico, realizado por diferentes microorganismos que transforman la biomasa en un sustrato más estable, el Compost, además de generar calor, H_2O , y CO_2 en el proceso, como se muestra en la Figura 14 ([Environment Canada, 2013](#)).

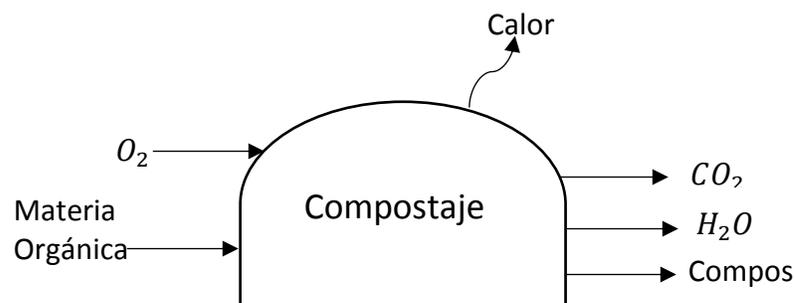


Figura 14: Proceso de compostaje

A continuación, se describen las 4 fases del proceso de compostaje ([FAO, 2013](#)).

1. Fase mesófila: Etapa en que los microorganismos mesófilos comienzan el proceso de compostaje a temperatura ambiente, a través de fuentes sencillas de carbono y nitrógeno, como azúcares, lo que provoca un aumento de temperatura a $45^{\circ}C$ y la reducción del pH a 4 o 4,5. Dura entre 2 y 8 días.

2. Fase termófila: Ocurre cuando la temperatura es mayor a $45^{\circ}C$ y los microorganismos mesófilos son reemplazados por los termófilos que comienzan la degradación de fuentes de carbono más complejas como celulosa y lignina, aumentando el pH cercano a 9 y la

temperatura a 60 °C. Esta fase puede durar de días a meses según la composición del material, las condiciones, entre otros.

3. Fase de enfriamiento: Se produce cuando se agota la fuente de carbono y nitrógeno en la materia orgánica, por lo que, la temperatura desciende entre 40 o 45°C y microorganismos mesófilos continúan con la descomposición, disminuyendo el pH, manteniéndolo ligeramente alcalino. Este proceso requiere de 2 a 5 semanas.

4. Fase de maduración: Proceso que ocurre a temperatura ambiente, en el que se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos. El cual puede durar de 3 a 6 meses.

El Compost es utilizado como abono en la agricultura, generando muchos beneficios para los suelos y el desarrollo agrícola, incrementando la materia orgánica del suelo que aporta nutrientes y microorganismos benéficos para la producción agrícola y el equilibrio de los ecosistemas, además se mejora la absorción de carbono, el control de la temperatura edáfica, aumenta el intercambio catiónico en el suelo y la porosidad del suelo que aumenta su capacidad de retención de agua, disminuyendo el riesgo de erosión y la desertificación que son las principales causas del cambio climático en el planeta ([FAO, 2013](#); [UCCSA, GEDEFF y CONAF, 2016](#)).

La conversión de materia orgánica a compostaje es aproximadamente de 0,35 kg de compost/kg materia orgánica, mientras el resto se evapora en forma de CO₂ y vapor de agua ([Alcolea y González, 2000](#)).

Vermicompostaje:

Degradación de la materia orgánica con la ayuda de lombrices y microorganismos, con lo que se obtiene humus. La lombriz más comercialmente utilizada es la denominada lombriz roja californiana, originaria de Europa, la cual, se destaca por su eficiencia al digerir materia orgánica equivalente a su peso en 24 horas, por lo que su supervivencia depende de la materia orgánica disponible, ésta puede ser de origen vegetal o animal. Además, estos organismos requieren ciertas condiciones ambientales, como temperatura óptima entre 19-25%, humedad del 80%, pH de 6,5-7,5 y baja luminosidad ([FAO, 2013](#)).

El vermicompost es más estable que el compost y contiene más proporción de ácidos húmicos y fúlvicos. Puede ser tamizado o secado antes de ser aplicado al suelo. Y al igual que el compost genera beneficios para el suelo, aportando nutrientes y microorganismos, aumentando la retención de agua, disminuyendo el riesgo de erosión y desertificación ([FAO, 2013](#); [UCCSA et al., 2016](#)).

2. Tipo de tecnologías de compostaje

El compost se puede realizar en Pila o en un Reactor, como se describe a continuación.

Compostaje en Pila

Consiste en un sistema abierto al aire libre, donde se agrupan los residuos en una pila de ciertas dimensiones, con el fin de mantener la temperatura y facilitar la difusión de oxígeno al interior.

La pila se puede airear de forma pasiva por difusión de oxígeno al interior de esta, sin embargo, la poca aireación de estas puede generar un aumento de temperatura excesivo que impide el compostaje de la materia orgánica, y puede provocar condiciones anaeróbicas al interior de la pila, lo que produce malos olores.

Para la aireación se realizan mecanismos de volteo y aireación forzada de la pila. El volteo de la pila se efectúa cada una semana al menos, lo que permite airear la pila, aumentar la porosidad y homogeneizar la mezcla, fomentando una descomposición uniforme de la materia orgánica. Las pilas de aireación forzada consisten en la disposición de la pila sobre tuberías perforadas, mediante ventiladores que impulsan el aire hacia el exterior de la pila, o extractores que succionan aire hacia la pila, permitiendo controlar las emisiones de olores a través de filtros, sin embargo, es menos efectivo para mantener una temperatura adecuada al interior de la pila.

El proceso de descomposición al interior de la pila requiere de 1 a 2 meses, y luego la etapa de maduración también se desarrolla de 1 a 2 meses ([Sánchez, 2009](#)).

Compostaje en Reactor

El compostaje en reactor es un sistema cerrado en el que se permite controlar las condiciones de operación al interior de este contenedor, tales como aireación, humedad, temperatura, pH, entre otros. Existen varios tipos de equipos, a continuación, se describen los dos principales ([Porrás, 2011](#)).

Reactor de flujo pistón vertical: En este equipo la materia orgánica ingresa por la parte superior y desciende por el estanque según el tiempo de residencia de éste. Mientras en la parte inferior se inyecta aire al interior del equipo en contracorriente. Luego el producto es extraído desde el fondo del estanque por un sistema de descarga.

Reactor de flujo pistón horizontal: Consiste en un estanque horizontal, donde el material es ingresado por un extremo y pasa a través del equipo hasta llegar a la salida por el otro lado, mediante tornillos sin fin, cinta transportadora o el reactor puede ser tipo tambor rotatorio. Mientras por los costados se encuentra el sistema de aireación, a lo largo del contenedor de forma homogénea.

El material orgánico requiere de menor tiempo de descomposición que en la pila, dependiendo de las condiciones al interior de este, el proceso al interior del contenedor puede durar de 1 semana a 1 mes, luego se extrae el material para su maduración durante 2 semanas a 2 meses ([Sánchez, 2009](#)).

Anexo D: Disposición de RSD en la RM

En la Tabla 23 y la Tabla 24 se muestra la tasa de ingreso de residuos para los principales rellenos sanitarios de la región, el relleno sanitario Lomas Lo Colorado y el relleno Santa Marta respectivamente.

Tabla 23: Tasa de ingreso de residuos por comunas en RSLLC 2016

Comuna	Ton/año
--------	---------

Cerro Navia	64.072
Colina	27.969
Conchalí	69.083
Curacaví	28.763
Huechuraba	37.420
Independencia	46.288
La Cisterna	48.335
La Reina	49.572
Lampa	34.398
Las Condes	121.185
Lo Barnechea	61.231
Lo Prado	41.871
Maipú	146.658
María Pinto	448
Ñuñoa	80.629
Providencia	80.791
Pudahuel	117.376
Quilicura	101.872
Quinta Normal	62.318
Recoleta	82.761
Renca	70.020
San Miguel	45.417
Santiago	196.330
Vitacura	47.913
I.M. Buin	2.638
I.M. Paine	1.769
I.M. Puente Alto	9.595
TOTAL	1.676.722

Tabla 24: Tasa de ingreso de residuos por comunas en RSSM 2016

Comuna	Ton/año
Estación Central	71.355
El Bosque	79.408
La Florida	181.604
La Granja	62.293
La Pintana	84.359
Lo Espejo	54.976
Macul	50.251
P. Aguirre Cerda	2.529
Peñalolén	22.911
San Ramon	44.555
San Joaquín	52.656

Puente Alto	222.555
San Bernardo	154.871
Calera De Tango	12.717
Buin	41.591
Paine	24.075
Pirque	7.910
San José De Maipo	7.252
Talagante	25.976
TOTAL	1.203.844

Estudiando las emisiones de RSD por comuna en la Región Metropolitana, se obtiene que las comunas con mayor producción de residuos por habitantes son las comunas de Padre Hurtado y San Bernardo, registrando 3,2 y 1,2 toneladas de residuos al año por habitante respectivamente al 2016. Mientras en los últimos 10 años el promedio corresponde a 0,98 y 0,88 toneladas de residuos respectivamente, como se observa en la Figura 15.

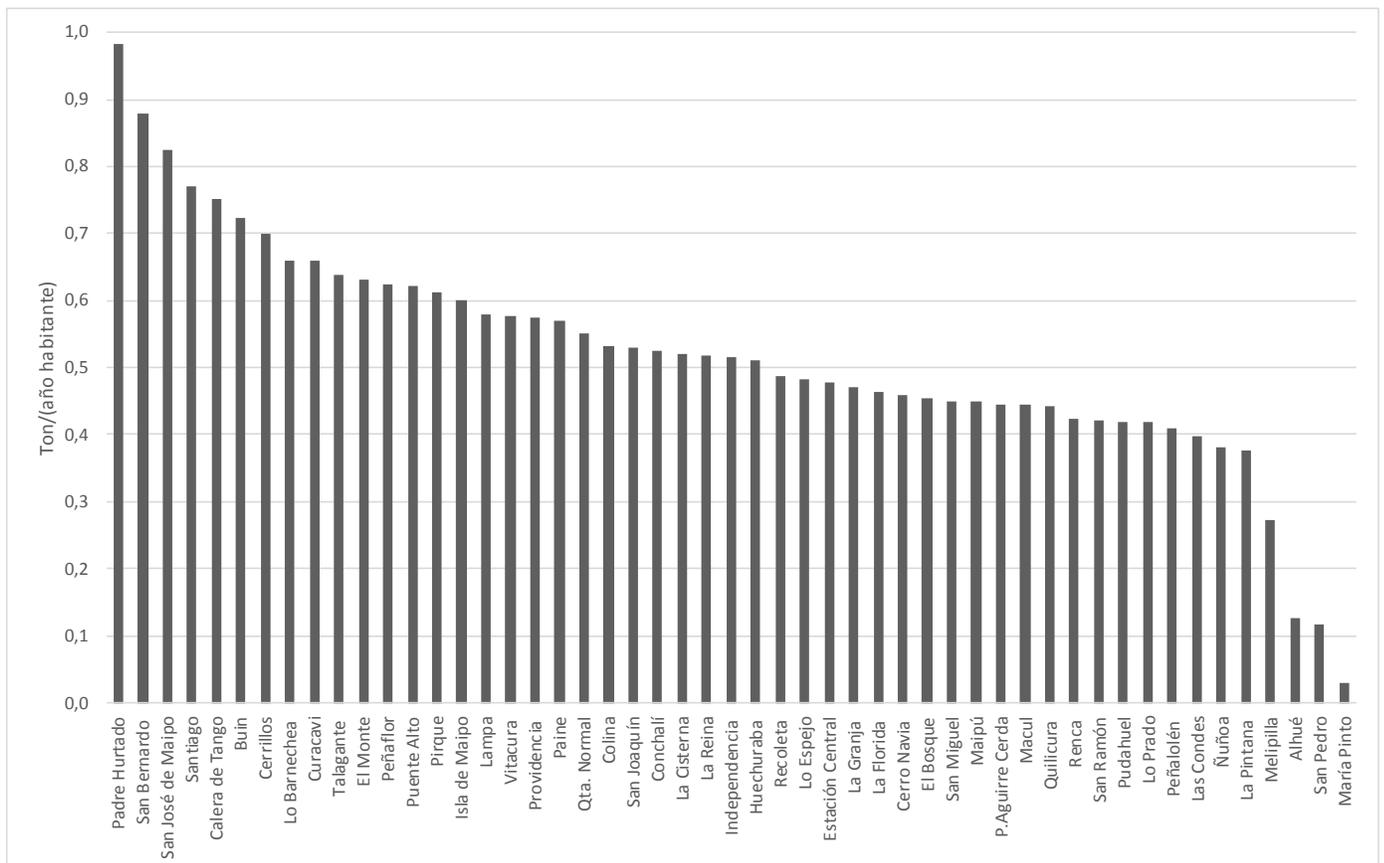


Figura 15: Toneladas de RSD al año por habitante 2007-2016

Anexo E: Proyección generación de residuos

En la Tabla 25 se muestran las comunas que llevan sus residuos al relleno sanitario de Santa Marta y la proyección de sus residuos al 2027. Primero se determinó los kilogramos por día por habitante emitidos al 2016. Luego, según el modelo MEPLAN (CIS, 1999), la tasa de producción de residuos por habitantes a 10 años aumenta en un 15%, con ello se determina la tasa de producción de residuos para el 2027 y posteriormente con las proyecciones de la población al 2027 (INE) se pueden determinar las toneladas anuales.

Tabla 25: Proyección generación de residuos

Comunas	Población		RSD 2016		RSD 2027	
	2016	2027	[kg/día hab.]	[ton/año]	[kg/día hab.]	[ton/año]
Buin	84.651	98.693	1,43	44.229	1,65	59.301
Calera de Tango	25.060	29.679	1,49	13.611	1,71	18.538
El Bosque	194.555	202.041	1,19	84.389	1,37	100.782
Estación Central	145.749	153.390	1,43	75.967	1,64	91.942
La Florida	389.392	395.964	1,37	194.776	1,58	227.773
La Granja	143.558	147.304	1,28	66.860	1,47	78.896
La Pintana	213.702	224.753	1,15	89.868	1,32	108.693
Lo Espejo	120.145	121.847	1,33	58.358	1,53	68.063
Macul	124.492	129.556	1,18	53.842	1,36	64.437
Paine	68.101	80.261	1,04	25.844	1,20	35.028
Pedro Aguirre Cerda	122.462	124.524	0,95	42.549	1,09	49.755
Peñalolén	243.847	256.027	1,24	110.289	1,43	133.168
Pirque	22.403	26.304	1,01	8.294	1,17	11.199
Puente Alto	617.914	695.270	1,06	238.748	1,22	308.932
San Bernardo	300.435	332.234	1,51	165.704	1,74	210.729
San Joaquín	104.588	107.210	1,48	56.334	1,70	66.408
San José de Maipo	15.083	15.882	1,44	7.955	1,66	9.633
San Ramón	99.860	100.977	1,30	47.303	1,49	55.007
Talagante	71.378	77.982	1,07	27.874	1,23	35.021
Promedio	163.546	174.732	1,26	74.358	1,45	91.226

Anexo F: Ejemplo de cálculo balance de masa y energía

El balance de masa global para cualquier equipo se puede escribir de la siguiente forma.

$$\text{Acumulación} = \text{entrada} + \text{generación} - \text{salida} - \text{consumo} \quad (\text{F.1})$$

En estado estacionario no hay acumulación, entonces la ecuación queda así:

$$\text{entrada} + \text{generación} = \text{salida} + \text{consumo} \quad (\text{F.2})$$

Un ejemplo de cálculo para el digestor se mostrará a continuación.

El digestor posee un flujo de entrada y dos salidas, El flujo F_8 corresponde al ingreso de residuos orgánicos molidos junto con agua añadida, F_{12} corresponde al flujo de salida de gas generado en el digestor y F_9 al flujo de digestato producido. En estado estacionario el balance se expresa como sigue:

$$F_8 = F_{12} + F_9 \quad (\text{F.3})$$

El flujo de entrada es conocido, mientras el flujo F_{12} de biogás, se estima en relación con la cinética producida por la biodigestión termofílica (Ver Anexo G.6: Digestor). Luego, se obtiene el flujo de digestato.

$$F_9 = F_8 - F_{12} \quad (\text{F.4})$$

$$F_9 = 148.085 - 40.170 = 107.915 \text{ [kg/h]} \quad (\text{F.5})$$

El balance de masa para la especie el metano queda determinado por la cinética impuesta. En la Tabla 26 se muestra el resumen.

Tabla 26: Resumen Balance de masa

Flujo [kg/h]	Orgánico Seco	Digestato seco	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	N ₂
F_8	60.266		87.819				
F_9		20.104	87.811				
F_{12}			8	7.333	29.740	9	3.080

Mientras el flujo de calor requerido para operar en condiciones termofílicas está dado por las ecuaciones:

$$\text{generación} = \text{salida} - \text{entrada} \quad (\text{F.6})$$

$$Q_r = m_a C_{pa} T_{sa} + m_g C_{pg} T_{sg} - m_a C_{pa} T_{ia} - m_g C_{pg} T_{ig} \quad (\text{F.7})$$

$$Q_r = m_a C_{pa} \Delta T + m_g C_{pg} \Delta T \quad (\text{F.8})$$

Donde, Q_r es el flujo requerido, m_a y m_g son los flujos másicos de agua y materia orgánica, C_{pa} y C_{pg} los calores específicos de agua y glucosa que representan la materia orgánica, además de T_{ia} y T_{ig} las temperaturas de agua y materia orgánica de la entrada, y T_{sa} y T_{sg} las temperaturas respectivas de la salida. Se considera la humedad de los residuos como parte de la materia orgánica, y el agua solo corresponde al agua añadida, entonces se obtiene lo siguiente.

$$Q_r = \left(141.033 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 1.215 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \cdot (333 - 298) [\text{K}] + 7.052 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot 4.186 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] \cdot (333 - 298) [\text{K}] \right) \cdot \frac{1[\text{h}]}{3600[\text{s}]} = 1.952.752 [\text{W}] \quad (\text{F.9})$$

Anexo G: Dimensionamiento

Anexo G.1: Tanque almacenador

Frente a cualquier inconveniente se considera un tanque almacenador de la materia orgánica, asumiendo un tiempo de residencia de 2 días.

Para calcular el volumen se utiliza la siguiente ecuación.

$$V = \frac{F}{\rho} \cdot t \quad (\text{G.1})$$

Donde V es el volumen en [m³], F es el flujo másico en [kg/h], ρ la densidad en [kg/m³] y t el tiempo de residencia en [h]. Para dejar un rango de espacio frente a inconvenientes se admite un espacio del 15% del volumen total, por lo que la ecuación anterior queda como.

$$V = \frac{1}{0,85} \cdot \frac{F}{\rho} \cdot t \quad (\text{G.2})$$

Además, se considera la siguiente relación entre la altura (H) y el diámetro (d).

$$H = 2d \quad (\text{G.3})$$

En la Tabla 27, se observa el volumen necesario para el tanque de almacenamiento a partir del flujo y la densidad de los residuos ([Tchobanoglous et al., 1982](#)).

Tabla 27: Dimensionamiento tanque almacenador de residuos

Datos	Valor	Unidad
Flujo	141.033	[kg/h]
Densidad compactada	605	[kg/m ³]
Volumen	13.159	[m ³]
Altura	41	[m]
Diámetro	20	[m]

Anexo G.2: Tornillo sin fin

Dado que se trata de biomasa seca con bajo contenido de humedad, menor al 60 %, se requiere de tornillos sin fin para transportar la materia prima, tres para trasladarla desde

el tanque almacenador al molino y 3 para trasladarla del molino hacia los digestores que la procesaran.

Para dimensionarlos se utilizan las especificaciones de catálogo WAM® Inc. (WAM, 2002) y se considera tornillos tipo cinta con un 45% de carga.

Primero, se calcula la capacidad equivalente del tornillo mediante la siguiente ecuación.

$$Q_{eq} = \frac{F}{\rho} \cdot CF_1 \cdot CF_2 \cdot CF_3 \quad (G.4)$$

Donde Q_{eq} es la capacidad equivalente del tornillo en [ft³/h], F es el flujo másico de entrada de materia prima en [lb/h], ρ la densidad de la materia prima en [lb/ft³], CF_1 es el factor de capacidad 1 que depende de la separación entre las crestas de la cinta y de su diámetro, CF_2 es el factor de capacidad 2 que representa el tipo de tornillo y la carga de este, y CF_3 es el factor de capacidad 3 que corresponde al uso de paletas extras en las crestas de la cita.

De acuerdo a las Tablas 1-3,1-4 y 1-5 del catálogo; utilizando una separación estándar para CF_1 , igual a 1; un tornillo tipo cinta con 45% de carga, con CF_2 igual a 1,62; y no se considera el uso de paletas, por lo que CF_3 es 1.

Además, la densidad de los residuos aumenta al ser triturados a 1020 [kg/m³].

Para los tornillos de entrada y salida del molino se obtienen los resultados en la Tabla 28, considerando una densidad de 605 y 1020 [kg/m³] o 37,8 y 78,03 [lb/ft³] respectivamente.

Tabla 28: Cálculos de capacidad equivalente

	Flujo [lb/h]	Capacidad equivalente [ft ³ /h]
Tornillo de entrada al molino	310.925	13.331
Tornillo de salida al molino	103.642	4.444

Para calcular las revoluciones por minutos se utiliza la siguiente fórmula.

$$N = \frac{Q_{eq}}{C_{(1 \text{ RPM})}} \quad (G.5)$$

Donde $C_{(1 \text{ RPM})}$ es la capacidad del tornillo a 1 RPM. Luego usando la Tabla 1-6 del catálogo se calculan las revoluciones por minuto necesarias, cuidando que está no sobrepase las revoluciones máximas recomendadas. En la Tabla 29 se muestran los resultados.

Tabla 29: Cálculos de revoluciones por minuto

	Capacidad de tornillo a 1 RPM	Máxima capacidad	[RPM]	Pulgadas del tornillo

		recomendada [RPM]		
Tornillo de entrada al molino	164,0	100	81	24
Tornillo de salida al molino	46,7	130	95	16

Luego para calcular la potencia total (P), es necesario calcular la potencia para superar la fricción (HP_f) y la potencia para transportar el material a la velocidad especificada (HP_m), como se especifica a continuación.

$$HP_f = \frac{L \cdot N \cdot F_d \cdot F_b}{1.000.000} \quad (G.6)$$

Donde L es el largo del tornillo en [ft], F_d es el factor por diámetro, F_b es el factor por tipo de soporte.

$$HP_m = \frac{F \cdot L \cdot F_f \cdot F_m \cdot F_p}{1.000.000} \quad (G.7)$$

F es el flujo es [lb/h], F_f es el factor por tipo de tornillo y carga, F_m es el factor del tipo de materia prima.

$$P = \frac{(HP_f + HP_m) \cdot F_0}{e} \quad (G.8)$$

F₀ es el factor de sobrecarga y e la eficiencia total del accionamiento.

Utilizando un largo del tornillo de 5 metros para la entrada al molino y a la salida uno de 22 metros. Además, de acuerdo a la Tabla 1-12 y 1-13 del catálogo, se obtiene F_d y F_b, considerando un tipo de soporte H. Así se obtiene que HP_f para cada caso en la Tabla 30.

Tabla 30: Cálculos de potencia para superar la fricción

	Largo de tornillo [m]	Largo de tornillo [ft]	F _d	F _b	HP _f
Tornillo de entrada al molino	5	16,4	235	4,4	1,3
Tornillo de salida al molino	22	71,5	106	4,4	2,9

Luego, para determinar HP_m se considera F_f igual a 1,2, para tornillo tipo cinta y 45% de carga, ver Tabla 1-14 del catálogo; F_m es 1,5, considerando restos de alimentos y madera, ver Tabla 1-2; y F_p es 1, pues no se ocupan paletas (ver Tabla 1-15). Con lo que se obtiene los valores para HP_m en la Tabla 31.

Tabla 31: Cálculos de potencia para mover el material

	Largo de tornillo [ft]	F	HP _m
Tornillo de entrada al molino	16,4	310.925	9,2

Tornillo de salida al molino	71,5	103.642	13,3
-------------------------------------	------	---------	------

De acuerdo a la Tabla 1-16, F_0 es 1 para $(HP_f + HP_m)$ mayor a 5,2. Mientras e es 0,85, considerando un motor reductor con conductor de cadena, según Tabla 1-17. Obteniendo los potenciales en la Tabla 32.

Tabla 32: Dimensionamiento tornillo sin fin

	Largo de tornillo [ft]	HP
Tornillo de entrada al molino	16,4	12,0
Tornillo de salida al molino	71,5	18,6

Por lo tanto, se requieren 3 tornillos de 16,4 pie y 24 pulgadas de diámetro con una potencia de 12 HP, y otros 3 tornillos de 71,5 pie y 16 pulgadas con potencia de 18,6 HP.

Anexo G.3: Molino

El dimensionamiento del molino se determina basándose en el catálogo, de acuerdo a la capacidad requerida para separar el flujo en 3 molinos. En el catálogo Stedman se encuentran molinos con capacidad de 1 a 300 [ton/h] y potencia entre 30 y 250 [HP] (Stedman, 2013). Las especificaciones para cada molino se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33: Dimensionamiento del Molino

Dato	Valor	Unidad
Flujo	47.011	[kg/h]
Potencia	100	[HP]
Área de alimentación	0,2	[m ²]
Área de cámara	0,3	[m ²]

Anexo G.4: Mezclador

Para la adición de agua no necesariamente se requiere un mezclador antes del proceso, sino que puede añadirse directamente en el reactor.

El agua a añadir depende de la humedad de los residuos, en este caso para biomasa seca, con un 57% de humedad, se requiere añadir 0,05 [m³ agua/ton residuo] (Environment Canada, 2013). Entonces, para 141.033 [kg/h] de residuos, se requiere añadir 7,052 [m³/h] de agua.

Anexo G.5: Estanque de almacenamiento

Para ahorrar agua en el proceso, se reutiliza el agua filtrada del digestato una vez, evitando la proliferación excesiva de microorganismos (Environment Canada, 2013).

Entonces se requiere de un estanque almacenador de agua que dosifique el agua necesaria en el proceso, la que corresponde a 7.052 [kg/h].

$$V = \frac{1}{0,85} \cdot \frac{F}{\rho} \cdot t \quad (\text{G.9})$$

Usando la ecuación G.9, con la densidad del agua igual a 1.000 [kg/m³] y conociendo el flujo de agua retirada del filtro igual a 83.790 [kg/h], se obtiene un volumen de 98,6 [m³].

El flujo almacenado, alcanza para cubrir 11,9 horas, por lo tanto 61 veces al mes se adicionará agua nueva al sistema. El flujo requerido es de 7.052 [kg/h], por lo que se requiere de [427 m³/mes].

Anexo G.6: Digestor

Para el dimensionamiento del digestor se considera como supuesto:

- El reactor funciona como un CSTR ideal, mediante la recirculación continua de líquido percolado del reactor.
- No existe acumulación en el reactor.
- La fracción orgánica de los residuos se considerará como celulosa.
- El digestato corresponde a los residuos que no se transforman en gases.
- La composición de los productos gaseosos se muestra en la Tabla 34 ([Mescia Hernández, Conoci y Russo, 2011](#)).

Tabla 34: Composición volumétrica del Biogás

Composición	Porcentaje Volumétrico [%]
CH ₄	54,23
CO ₂	36,87
H ₂ S	0,02
N ₂	8,88

La cinética de la variación de sustrato en la biodigestión termofílica se puede representar por la ecuación ([Fernández, 2008](#)).

$$-r = -\mu_{\max} \cdot (S_t - \alpha \cdot S_0) \quad (\text{G.10})$$

Donde r es la velocidad de reacción en [kg/día], μ_{\max} la velocidad máxima de crecimiento de microorganismos [1/día], S_t la cantidad de sustrato en el tiempo t en [kg], S_0 el sustrato inicial en [kg], y α es factor de no-biodegradabilidad [kg/kg].

Los datos para la cinética de biodigestión anaeróbica seca termofílica se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35: Datos para cinética termofílica ([Fernández, 2008](#))

Parámetro	Valor	Unidad
μ_{\max}	0,1883	[1/día]
S_0	1.446.388	[kg/día]
α	0,3178	[-]

Luego, realizando una simulación en Matlab® se obtiene un tiempo de residencia de 20 días, como se observa en el gráfico.

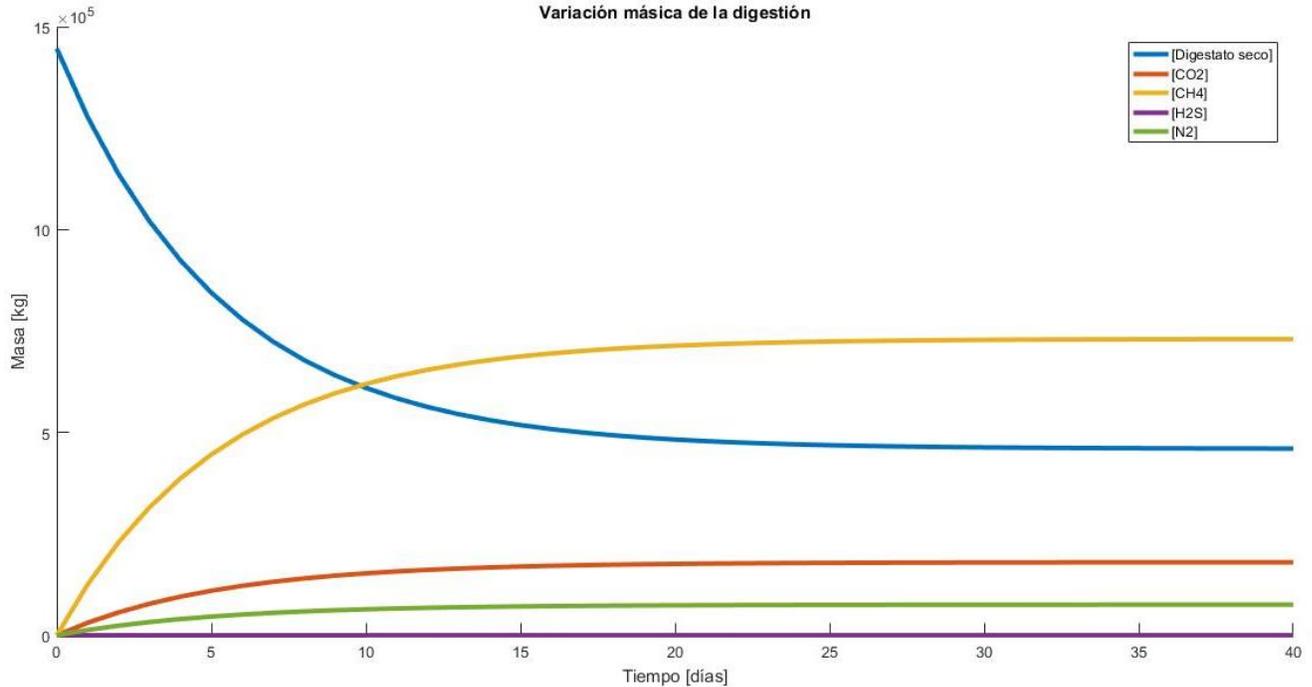


Figura 16: Variación másica de la digestión

Luego, los flujos de salida se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36: Datos de salida del reactor

Especie	Flujo [kg/h]
Digestato seco	20.104
CO ₂	7.333
CH ₄	29.740
H ₂ S	9
N ₂	3.080
H ₂ O	8

El agua añadida y la humedad de los residuos orgánicos quedan retenidas principalmente en el digestato. En el Biogás se estima que 0,02% másico corresponde a agua (Mescia et al., 2011). Obteniendo 87.811 [kg/h] de agua de digestato y 8 [kg/h] de vapor de agua en la composición de Biogás.

Asumiendo que la densidad del digestato es de 1.020 [kg/m³] y la del agua 1.000 [kg/m³]. Además, dejando un espacio del 15% del volumen total, para que no se produzcan roturas en el tanque por la presión. Con lo que se obtiene un volumen de 82.063 [m³], lo cual es muy grande para un reactor, una medida razonable son 25.000 [m³] (Guzmán, 2012), por lo que se divide el flujo en 3 reactores de aproximadamente 22.679 [m³].

Para dimensionarlo se utiliza la ecuación G.3.

$$H = 2d \quad (G.3)$$

Entonces la altura es de 48,7 [m] y el diámetro de 24,35 [m].

Además, el espesor de estos equipos es por lo general de $6 \cdot 10^{-4}$ [m].

Anexo G.7: Serpentin

Para calentar la materia orgánica a la temperatura termofílica de 60°C, se calentará el digestor para producir la metanogénesis, con el aire de cogeneración.

En primera instancia se calcula el flujo de calor necesario para calentar la mezcla. El calor recibido por los residuos se define en función de la composición de glucosa y agua para simplificar el cálculo. Además, se asume que el cambio del calor específico en el rango de temperatura es despreciable. Así, el flujo de calor se expresa como:

$$Q_i = (m_g C_{p_g} + m_a C_{p_a})(T_{out} - T_{in}) \quad (G.11)$$

Donde Q_i es el calor absorbido por la solución en [J/s], m_g y m_a es la masa de glucosa y agua respectivamente en [kg/s], C_{p_g} y C_{p_a} es el calor específico de glucosa y agua, T_{out} es la temperatura final de los residuos, de 60 [°C] y T_{in} es la temperatura inicial de los residuos orgánicos, equivalente a 25 [°C].

Tabla 37: Datos chaqueta de calentamiento

Dato	Valor	Unidad
$C_{p_{agua}}$	4.186	[J/kg·K]
$C_{p_{glucosa}}$	1.215	[J/kg·K]
m_{agua}	1.341	[kg/h]
$m_{glucosa}$	26.825	[kg/h]

Con los datos de la Tabla 37, se obtiene que el flujo necesario para calentar la materia orgánica de un reactor de 650.917 [J/s].

Luego, el flujo de calor contenido en el vapor de agua que es recuperado en el proceso se estima en base al calor de los gases de combustión y la eficiencia de la caldera, obteniendo un flujo neto de 161 [MW] o 53,7 [MW] para cada digestor respectivamente, por lo que solo se requiere el 1,2% de la energía térmica. Para ello se requiere procesar 3.115 [kg/h], calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{vap} = \lambda_{vap} \cdot m_{vap} \quad (G.12)$$

$$m_{vap} = \frac{Q_{vap}}{\lambda_{vap}} = \frac{650,917 \left[\frac{kJ}{s} \right] \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{2.256,5 \left[\frac{kJ}{kg} \right]} = 3.115 \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (G.13)$$

Donde Q_{vap} es el flujo de calor del vapor de agua, λ_{vap} es el calor latente de vaporización y m_{vap} es el flujo másico de agua en el circuito cerrado.

El siguiente paso es determinar el área de transferencia necesaria para alcanzar la temperatura deseada. Para ello se dimensionará un serpentín.

Asumiendo que el equipo está completamente aislado, el coeficiente de transferencia (U) para un cilindro en $[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}]$ y el flujo de calor (Q) se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{k_h} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_\infty}} \quad (\text{G.14})$$

$$Q = \eta \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{ln}} \quad (\text{G.15})$$

Donde d_o es el diámetro externo del serpentín y d_i el interno en $[\text{m}]$, h_o es el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado de los residuos en $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$, k_h es la conductividad térmica del acero del cilindro en $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ y h_∞ es el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del vapor de agua en $[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}]$, η es la eficiencia de intercambio, generalmente se asume como 0,8, y ΔT_{ln} la media logarítmica.

A continuación, se calculará el coeficiente de transferencia de calor por convección para los gases y los residuos.

La velocidad deseada del vapor es de 20 $[\text{m}/\text{s}]$, con esta se determina el área transversal para el flujo. El flujo volumétrico se determina con la densidad del vapor de agua a 100 $^\circ\text{C}$, equivalente a 960 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, alcanzando un flujo de 0,0009 $[\text{m}^3/\text{s}]$. Luego el área transversal debe ser 0,000045 $[\text{m}^2]$ para alcanzar un flujo de 20 $[\text{m}/\text{s}]$ al interior del serpentín.

El número de Reynolds se calcula de la siguiente forma.

$$\text{Re}_\infty = \frac{\frac{F_{\text{vap}}}{A_{\text{vap}}} \cdot d_i}{\mu_{\text{vap}}} \quad (\text{G.16})$$

Donde F_{vap} es el flujo másico del vapor en $[\text{kg}/\text{s}]$, A_{vap} es el área de transversal en $[\text{m}^2]$ y μ_{vap} la viscosidad del vapor de $1,227 \cdot 10^{-5} [\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}]$ a 100°C (Cengel, 2011). Con lo que se obtiene un valor de 18.535.525, correspondiente a un flujo turbulento.

$$\text{Re}_\infty = \frac{\frac{3,115 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{\text{h}}{\text{s}} \right] \cdot 0,015 [\text{m}]}{0,000058 [\text{m}^2]}}{1,227 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]} = 18.535.525 \quad (\text{G.17})$$

Se asume el número de Prandtl del vapor a 100°C , equivalente a 1 (Cengel, 2011).

Para fluidos turbulentos Nusselt se expresa como (Subbarao).

$$\text{Nu}_\infty = 0,027 \text{Re}^{0,805} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (\text{G.18})$$

Con lo que se obtiene un valor de 19.147. Luego, se determina el coeficiente de convección del vapor de agua mediante la siguiente ecuación.

$$h_{\infty} = \frac{Nu_{\infty} k_{gas}}{L_g} \quad (G.19)$$

Donde k_{gas} es la conductividad del vapor de agua a 100 °C, igual a 0,025 [W/m·K] (Cengel, 2011). Obteniendo 26.436 [W/m²·K].

Para determinar el número de Reynolds de los residuos se usa la siguiente ecuación:

$$Re_o = \frac{F_r \cdot L_r}{A_r \cdot \mu_r} \quad (G.20)$$

Donde F_r es el flujo másico de los residuos en [kg/s], A_r es el área de transversal en [m²], L_r es el largo característico que en este caso es el radio del estanque y μ_{gas} la viscosidad de los residuos es similar a la glucosa de 0,00089 [kg/m·s] a 25°C (Cengel, 2011). Con lo que se obtiene un valor de 403, correspondiente a un flujo laminar.

El número de Prandtl se calcula mediante la ecuación:

$$Pr_o = \frac{C_{pr} \mu_r}{k_r} \quad (G.21)$$

Donde C_{pr} es el calor específico de los residuos, similar al de la glucosa de 1.215 [J/kg K] (UNAM), y k_r es la conductividad térmica de los residuos que equivale a 0,66 [W/m·K] (Young, 1992). Luego el número de Prandtl es 1,64.

El número de Nusselt para un rango de Reynolds entre 40 y 4.000 se expresa de la siguiente forma (Subbarao).

$$Nu_o = 0,683 Re^{0,466} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (G.22)$$

Obteniendo un valor de 13,18. A continuación, se calcula el coeficiente de convección de los residuos con la ecuación.

$$h_o = \frac{Nu_o k_r}{L_r} \quad (G.23)$$

Consiguiendo 2,86 [W/m²·K].

Luego, se puede calcular el coeficiente de transferencia (U), equivalente a 2,84 [W/m²·K]. Y en relación con la ecuación G.15, se puede despejar el área de transferencia, alcanzando 4.111 [m²].

Anexo G.8: Filtro

El digestato debe filtrarse debido a su alto contenido de agua, para que pueda ser comerciable y fácil de transportar, pudiendo usarse como abono para la actividad agrícola del sector.

La ecuación de diseño de un filtro se expresa como sigue (Universidad de Chile, 2002).

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot \left(\alpha \cdot C \cdot \frac{V}{A} + R_m \right)} \quad (\text{G.24})$$

Donde Q es el caudal a filtrar en [m³/s], ΔP es la diferencia de presión entre la entrada y la salida del fluido en [Pa], A es el área de filtrada en [m²], μ es la viscosidad del residuo en [Pa·s], C es la masa de sólidos en la torta por volumen filtrado en [kg/m³], α es la resistencia específica de la torta en [m/kg], V es el volumen de filtrado en [m³] y R_m es la resistencia del medio filtrante.

La torta formada es del tipo compresible, pues se trata de residuos orgánicos cuya resistencia específica (α) varía según la diferencia de presión. Para determinar la resistencia específica se considera la variación de α con respecto a ΔP para aguas residuales, como se expresa en la siguiente ecuación (Carrasco, 2015).

$$\ln(\alpha) = 1,0617 \cdot \ln(\Delta P) + 22,385 \quad (\text{G.25})$$

Donde α está en [m/kg] y ΔP [kPa]. Asumiendo una diferencia de presión igual a 1 [kPa], se obtiene aproximadamente una resistencia específica de 5,27·10⁹ [m/kg].

Además, se considera que la resistencia del medio filtrante es despreciable. Integrando la ecuación anterior se obtiene que el área requerida se expresa como.

$$A = \sqrt{\frac{V^2 \cdot \mu \cdot \alpha \cdot C}{2 \cdot \Delta P \cdot t}} \quad (\text{G.26})$$

Tabla 38: Datos filtro de hoja

Características	Valor	Consideraciones
V [m ³]	103,9	Considerando la densidad del agua como 1000 [kg/m ³] y la del digesto seco 1250 [kg/m ³].
t [s]	3.600,0	Tiempo en el que se requiere procesar el flujo de digestato.
μ [Pa·s]	8,91·10 ⁻⁴	Se supone la viscosidad del agua a 25°C.
α [m/kg]	5,27·10 ⁹	Se calcula considerando la variación de α con respecto a ΔP para aguas residuales.
C [kg/m ³]	287,9	Se considera que el digestato concentrado retiene un 20% másicos de agua.
ΔP [Pa]	1.000	Supuesto.

Luego, utilizando la ecuación G.26 y los datos de la Tabla 38, se obtiene un área 1.473 [m²].

Anexo G.9: Gasómetro

Los gasómetros, son utilizados en la industria de producción de biogás con el fin de mantener controlado el flujo de biogás frente a fluctuaciones en la producción, o frente a casos de emergencia.

En el proceso se considera un tiempo de residencia de 3 horas y una presión de 1 [atm] dentro del equipo (Carrasco, 2015). Usando la ecuación G.27, se obtiene un volumen de 105.119 [m³]. El cual se separa en 2 equipos de 52.560 [m³].

$$V = \frac{1}{0,85} \cdot \frac{F}{\rho} \cdot t \quad (G.27)$$

Anexo G.10: Condensador

En este equipo se desea separar el agua contenida en el biogás, para ello se requiere condensar el vapor de agua a 4°C en un intercambiador de calor carcasa tubo, utilizando como refrigerante glicol.

Para el dimensionamiento, se debe determinar el área de transferencia, para lo cual se necesita estimar el calor a retirar y el coeficiente de transferencia global.

El calor a retirar se expresa como:

$$Q_i = m_i \int_{T_{in}}^{T_{out}} C_{p_i} dt \quad (G.28)$$

Donde Q_i es el calor a retirar del gas “i” en [kJ/h], m_i es la masa del gas “i” en [kg/h], T_{in} es la temperatura de entrada del gas, equivalente a 25 [°C], T_{out} es la temperatura de salida del gas, de 4 [°C] y C_{p_i} es el calor específico del gas que se puede calcular a una determinada temperatura T según la siguiente ecuación:

$$C_{p_i} = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3 \quad (G.29)$$

Luego el flujo de calor queda definido como:

$$Q_i = m_i \left[a_i (T_{out} - T_{in}) + b_i \left(\frac{T_{out}^2}{2} - \frac{T_{in}^2}{2} \right) + c_i \left(\frac{T_{out}^3}{3} - \frac{T_{in}^3}{3} \right) + d_i \left(\frac{T_{out}^4}{4} - \frac{T_{in}^4}{4} \right) \right] \quad (G.30)$$

En la Tabla 39 se muestran los coeficientes estimados para cada compuesto gaseoso (Cengel, 2011).

Tabla 39: Coeficiente de calor específico biogás

Cp Gases [kJ/kmol · K]	a	b	c	d
CO₂	22,26	5,98E-02	-3,50E-05	7,47E-09
CH₄	19,89	5,02E-02	1,27E-05	-1,10E-08
N₂	28,90	-1,57E-03	8,08E-06	-2,87E-09
H₂O	32,24	1,92E-03	1,06E-05	-3,60E-09
H₂S	0,03	1,51-05	0,00E+00	0,00E+00

Con lo que se obtiene un flujo de calor de $-1.581.175$ [kJ/h].

Además, se debe considerar el calor de cambio de fase del vapor de agua, mediante la masa de vapor de agua (m_{H_2O}) y el calor latente (λ_{H_2O}), equivalente a $2.256,54$ [kJ/kg], luego se determina el flujo de calor de cambio de fase (Q_{H_2O}):

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot \lambda_{H_2O} \quad (G.31)$$

El flujo de calor de cambio de fase es -17.534 [kJ/h]. Así, se obtiene que el calor neto requerido es $-1.581.175$ [kJ/h].

Luego, se puede calcular el flujo másico de refrigerante necesario para condensar el vapor de agua, considerando que el glicol ingresa a -3 [°C] y sale a 1 [°C], además el calor específico del glicol es $2,84$ [kJ/kg · K]. Así, se puede calcular el flujo mediante la ecuación:

$$m_{\text{glicol}} = \frac{Q_{\text{Total}}}{C_{\text{pglicol}} \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})} \quad (G.32)$$

Obteniendo un flujo de 139.188 [kg/h].

Para determinar el área de transferencia del intercambiador de calor, se necesita calcular el coeficiente global de transferencia de calor. Para ello, en primera instancia se requiere definir la geometría del intercambiador de calor.

La geometría seleccionada es un intercambiador de calor de carcasa y tubo con un arreglo cuadrado de tubos en contracorriente. Luego, se debe identificar que fluido pasa por los tubos y cual por la carcasa. Para definirlo se calcularán las características geométricas para los dos casos posibles, biogás pasa por los tubos o biogás pasa por la carcasa.

La geometría de los arreglos cuadrados está definida por el esquema de la Figura 17 y la ecuación G.33 (ULA).

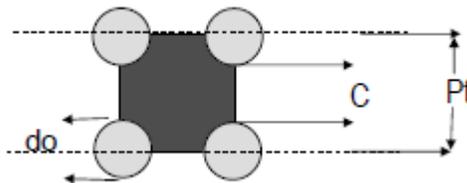


Figura 17: Geometría arreglo cuadrado de tubos

$$D_e = \frac{4 \cdot A_l}{p_m} = \frac{4 \left(P_t^2 - \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \right)}{\pi \cdot d_o} \quad (G.33)$$

Donde D_e es el diámetro equivalente del arreglo en [m], P_t es la separación entre el centro de los tubos en [m], para diámetros equivalentes mayores a 0,03 se calcula como el producto de 1,25 por d_o , C es la separación externa entre los tubos en [m] y d_o es el diámetro externo de los tubos en [m]. Además, A_1 es el área transversal dentro del arreglo cuadrado y p_m es el perímetro de los tubos que limitan con el arreglo considerado.

La velocidad deseada para el glicol es de 2 [m/s], mientras para el biogás de 20 [m/s] (Carrasco, 2015). Para definir el área transversal de los tubos se usa la siguiente ecuación.

$$A_t = \frac{F}{\rho \cdot v_d} \quad (G.34)$$

Donde A_t es el área transversal del tubo en [m²], F es el flujo másico en [kg/h] de la especie que pasa al interior del tubo, ρ la densidad en [kg/m³] y v_d la velocidad deseada en [m/s]. Así, se puede determinar el diámetro del tubo y su espesor, de acuerdo con medidas estándares (Tioga).

El número de arreglos se determina de la siguiente forma.

$$N = \frac{A_t}{A_1} \quad (G.35)$$

Donde A_t es el área transversal requerida para la especie de la carcasa y A_1 es el área transversal del arreglo cuadrado de tubos.

Para el caso en el que el biogás pasa por los tubos se obtienen los resultados de la Tabla 40.

Tabla 40: Resultados para el caso en el que el biogás pasa por los tubos

Velocidad deseada biogás	20	[m/s]
Área transversal en tubo (A_t)	0,414	[m ²]
Diámetro externo (d_o)	0,762	[m]
Diámetro interno (d_i)	0,730	[m]
Espesor de tubo	0,016	[m]
P_t	0,953	[m]
Diámetro equivalente D_e	0,754	[m]
Área transversal arreglo cuadrado (A_1)	0,488	[m ²]
Velocidad deseada glicol	2	[m/s]
Área transversal requerida (A_t)	0,017	[m ²]
N arreglos (biogás en tubos)	0,036	[-]

Dado que el número de arreglos es menor a 1, esta opción se descarta.

Luego, para el caso en el que el glicol pasa por los tubos se obtiene los resultados de la Tabla 41.

Tabla 41: Resultados para el caso en el que el glicol pasa por los tubos

Velocidad deseada glicol	2	[m/s]
Área transversal en tubo (A_t)	0,017	[m ²]
Diámetro externo (d_o)	0,168	[m]
Diámetro interno (d_i)	0,154	[m]
Espesor de tubo	0,007	[m]
P_t	0,210	[m]
Diámetro equivalente D_e	0,167	[m]
Área transversal arreglo cuadrado (A_f)	0,067	[m ²]
Velocidad deseada biogás	20	[m/s]
Área transversal requerida (A_t)	0,414	[m ²]
N arreglos (glicol en tubos)	16,151	[-]

Con lo que se obtienen 17 arreglos cuadrados para la transferencia de calor del biogás pasando por la carcasa y el glicol por los tubos. Una vez definidas las características geométricas es necesario calcular en área de transferencia.

Primero, se determina el coeficiente de transferencia de calor U en [W/m²·K]:

$$\frac{1}{\bar{U}} = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{k_h} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{1}{h_\infty}} \quad (G.36)$$

Donde d_o es el diámetro externo de la tubería y d_i el interno en [m], h_o es el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del glicol en [W/m²·K], k_h es la conductividad térmica del acero de la tubería en [W/m·K] y h_∞ es el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del biogás en [W/m²·K].

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del glicol mediante adimensionales, primero se calcula el número de Reynolds (Re_o) y el número de Prandtl (Pr_o), y de acuerdo a estos se define el número de Nusselt (Nu_o).

Las propiedades del Glicol se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42: Propiedades del Glicol

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1.109,000	[kg/m ³]
Viscosidad	0,017	[kg/m·s]
Conductividad	0,250	[W/m·K]
Calor específico	2,840	[kJ/kg·K]

El número de Reynolds se define como.

$$Re_o = \frac{F_{\text{glicol}} d_i}{A_t \mu_{\text{glicol}}} \quad (G.37)$$

Donde F_{glicol} es el flujo másico del glicol en [kg/s], A_t es el área de transversal del tubo en [m²] y μ_{glicol} la viscosidad del glicol en [kg/m·s]. Con lo que se obtiene un valor de 18.794, correspondiente a un flujo turbulento.

El número de Prandtl corresponde a.

$$Pr_o = \frac{C_{p\text{glicol}} \mu_{\text{glicol}}}{k_{\text{glicol}}} \quad (\text{G.38})$$

Alcanzando el valor de 193.

Para un flujo laminar en un cilindro en número de Nusselt se define como (Subbarao).

$$Nu_o = 0,193 Re^{0,618} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (\text{G.39})$$

Alcanzando el valor de 488.

Luego se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del glicol.

$$h_o = \frac{Nu_o k_{\text{glicol}}}{d_i} \quad (\text{G.40})$$

Donde k_{glicol} es la conductividad térmica del glicol. Lo que arroja un valor de 793 [W/m²·K].

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del biogás, se calcula el número de Reynolds (Re_{∞}) y el número de Prandtl (Pr_{∞}), luego a partir de estos se define el número de Nusselt (Nu_{∞}).

En la Tabla 43 se muestran las propiedades del biogás.

Tabla 43: Propiedades del Biogás

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1,54	[kg/m ³]
Viscosidad	1,4·10 ⁻⁵	[kg/m·s]
Conductividad	0,81	[W/m·K]
Calor específico	0,03	[kJ/kg·K]

Los números de Reynolds y Prandtl son.

$$Re_{\infty} = \frac{F_{\text{biogás}} D_e}{A_t \mu_{\text{biogás}}} \quad (\text{G.41})$$

$$Pr_{\infty} = \frac{C_{p\text{biogás}} \mu_{\text{biogás}}}{k_{\text{biogás}}} \quad (\text{G.42})$$

D_e corresponde al diámetro equivalente de la carcasa, con ello se obtiene un número de Reynolds de 320.842, mientras el valor para Prandtl es 0,38. Luego para Reynolds grandes, el fluido es turbulento por lo tanto Nusselt se expresa como.

$$Nu_{\infty} = 0,36 Re^{0,55} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (\text{G.43})$$

Obteniendo un valor de 278. Entonces, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h_{\infty} = \frac{Nu_{\infty} k_{\text{biogás}}}{D_e} \quad (\text{G.44})$$

Con lo que se obtiene un valor de 50 [W/m²·K].

Finalmente, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor, alcanzando un valor de 44,9 [W/m²·K]. Luego el flujo de calor para un intercambiador de calor carcasa y tubo se expresa como.

$$Q = \eta \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{ln}} \cdot F_T \quad (\text{G.45})$$

Donde η es la eficiencia de intercambio, generalmente se asume como 0,8, y F_T es un factor de corrección que corrige la media logarítmica (ΔT_{ln}) frente a imperfecciones en el flujo en contracorriente, el cual se calcula como sigue.

$$F_T = \frac{\sqrt{(R^2 + 1) \cdot \ln \left[\frac{1 - S}{1 - R \cdot S} \right]}}{(R - 1) \cdot \ln \left[\frac{2 - S \cdot (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S \cdot (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \right]}} \quad (\text{G.46})$$

Donde R y S se calcula de la forma sucesiva.

$$R = \frac{T_i - T_f}{t_f - t_i} \quad (\text{G.47})$$

$$S = \frac{t_f - t_i}{T_i - t_i} \quad (\text{G.48})$$

Donde T_i y T_f son las temperaturas de entrada y salida del biogás y t_i con t_f las temperaturas del glicol. Con ello se obtienen los valores de R y S que son 5,25 y 0,14 respectivamente, entonces F_T es aproximadamente 0,82.

A continuación, se puede determinar el área de transferencia de calor, mediante la ecuación G.45, alcanzando un área de 1.325 [m²].

Anexo G.11: Adsorbedor

Para extraer las impurezas del biogás se utiliza un adsorbedor de carbón activado a alta presión, con el cual se puede retirar sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico y dióxido de carbono, sin embargo, solo se dimensionará el equipo para la extracción de un componente.

El dimensionamiento del adsorbedor se realiza mediante el modelo de Freundlich en base datos bibliográficos.

Definiendo las siguientes variables de acuerdo a la Figura 18, para realizar el balance de masa.

$$X = \frac{\text{kg de H}_2\text{S}}{\text{kg de Carbón activado}} \quad (\text{G.49})$$

$$Y = \frac{\text{kg de H}_2\text{S}}{\text{kg de Biogás}} \quad (\text{G.50})$$

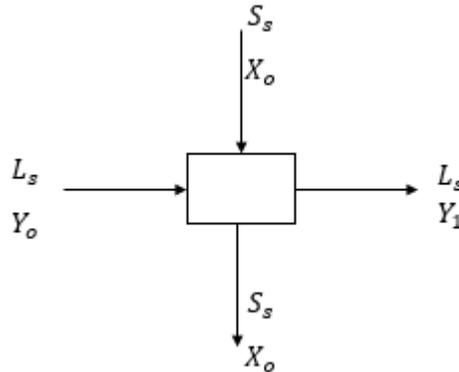


Figura 18: Balance de masa adsorción

Del balance de masa se obtiene la siguiente ecuación (Ver Figura 18).

$$-\frac{S_s}{L_s} = \frac{Y_o - Y_1}{X_o - X_1} \quad (\text{G.51})$$

Donde S_s son los kilogramos de adsorbente por hora, L_s son los kilogramos de disolvente por hora que corresponde al biogás, X_o y Y_o son fracciones en la entrada, mientras X_1 y Y_1 son las fracciones a la salida.

La ecuación de Freundlich se define como:

$$Y = m \cdot X^n \quad (\text{G.52})$$

Remplazando esta igualdad en la ecuación G.51 y suponiendo que en condiciones iniciales el adsorbato está libre de soluto, la expresión queda como:

$$\frac{S_s}{L_s} = \frac{Y_o - Y_1}{\left(\frac{Y_1}{m}\right)^{1/n}} \quad (\text{G.53})$$

La ecuación de Freundlich para el ácido sulfhídrico es (Lau, MohamadNor, Lee y Mohamed, 2016):

$$Y^{\text{H}_2\text{S}} = 2,296 \cdot X^{\text{H}_2\text{S}} + 1,56 \quad (\text{G.54})$$

Asumiendo que se extrae un 90% másico de los gases impuros, se puede determinar el flujo másico necesario de carbón activado.

$$S_s = \frac{L_s \cdot (Y_o^{\text{H}_2\text{S}} - Y_1^{\text{H}_2\text{S}})}{\left(\frac{Y_1^{\text{H}_2\text{S}}}{m}\right)^{1/n}} = \frac{40.162[\text{kg/h}] \cdot (2,13 \cdot 10^{-4} - 1,06 \cdot 10^{-5})}{\left(\frac{1,06 \cdot 10^{-5}}{2,296}\right)^{\frac{1}{1,56}}} = 12.947[\text{kg/h}] \quad (\text{G.55})$$

En total se tiene un flujo de 12.947[kg/h]. La densidad del carbón activado es 400 [kg/m³], por lo tanto, el flujo volumétrico es de 32 [m³/h]. Se considera un tiempo de agotamiento de 10 horas, esto depende de la superficie del material y su capacidad de adsorción,

resultados experimentales arrojan mayor tiempo para bajas concentración de H₂S (González, 2016). Luego el volumen requerido para 45 días sería de 699 [m³], entonces para un año se necesitan 11.186 [ton] de carbón activado.

La carga hidráulica (Q_h) permisible puede ser de 24 [m³/m²·h] (Niño y Ortíz, 2008). Con lo cual, se puede determinar el área transversal de los estanques, separando el flujo volumétrico del gas en 5 contenedores y considerando una presión de 7 bar, según referencias esta puede ser a lo más de 10 bar (Álvarez, 2016).

$$A_t = \frac{v}{Q_h} = \frac{851[\text{m}^3/\text{h}]}{24[\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}]} = 35 [\text{m}^2] \quad (\text{G.56})$$

A continuación, se puede determinar la altura de los estanques (Z).

$$Z = \frac{V}{A_t} = \frac{699[\text{m}^3]}{35 [\text{m}^2]} = 20 [\text{m}] \quad (\text{G.57})$$

Así se cumple que la razón altura/diámetro (Z/D) es igual a 3, lo cual se encuentra dentro del rango permisible entre 3 y 5 (Niño y Ortíz, 2008).

Anexo G.12: Cogenerador

Para dimensionar el cogenerador, se estima la potencia eléctrica a generar, y luego se determina el equipo de cogeneración a cotizar.

El poder calorífico del biogás se determina usando el poder calorífico inferior (PCI) para no sobrestimar la generación de energía. La que se calcula según (AChEE, 2010).

$$\text{PCI}_{\text{biogás}} = (\%p/p)\text{CH}_4 \cdot \text{PCI}_{\text{CH}_4} \quad (\text{G.58})$$

En base al poder calorífico del biogás y su flujo másico (F) se determina la energía disponible:

$$E_d = F \cdot \text{PCI}_{\text{biogás}} [\text{MW}] \quad (\text{G.59})$$

Así, se puede caracterizar el gas a utilizar, en la Tabla 44.

Tabla 44: Características Biogás

	Valor	Unidad
Flujo de CH ₄	29.740,0	[kg/h]
(%p/p)CH ₄	0,7	[%]
PCI _{CH₄}	50,0	[MJ/kg]
PCI _{biogás}	37,1	[MJ/kg]
Energía disponible (E _d)	306,0	[MW]

Para generación de energía eléctrica se usan motores de combustión interna, cuya conversión se muestra en la Tabla 45 (AChEE, 2010).

Tabla 45: Conversión motor de combustión interna

Balance Energía	Motor de combustión interna	Energía [MW]
Calor Gases de combustión y refrigeración	59%	181
Electricidad	35%	107

Pérdidas no aprovechables	6%	18
Total	100%	306

Se requieren 20 equipos cogeneradores con capacidad para generar 5,5 MW cada uno, y así generar los 107 MW.

Anexo H: Capex

Primero se determina el costo de los equipos primarios. Se intentó cotizar la mayor cantidad de equipos directamente con empresas, sin embargo, solo llegaron 2 cotizaciones, para los filtros de hoja y el compresor, el resto se estimó.

Algunos se estimaron mediante cantidad de acero necesaria para construir los equipos, como el tanque almacenador de residuos, los digestores con serpentín, el tanque almacenador de agua y los gasómetros.

Mientras para el tornillo sin fin, el molino, condensador, enfriador se consultaron los precios de venta públicos en Alibaba.

Para el adsorbedor se estimó el cálculo mediante la siguiente ecuación (Vatavuk, 1999).

$$C_{ads} = 271 \cdot A^{0,778} \quad (G.60)$$

Donde A es el área del equipo, luego se amplifica este costo para los 7 equipos.

El cogenerador y los equipos necesarios para la conexión a la red se estimaron.

Y filtro SCR se consultó el precio estimado en la consultora Better.

En la siguiente tabla se muestra los costos FOB de todos los equipos, es decir, el costo libre de costos de transporte, tanto los importados y los chilenos. Mientras el costo CIF, costo en planta, supone un 15% del costo FOB en transporte para los importados y un 5% para los productos chilenos. Con lo cual se obtiene un costo total de 19.597.867 [USD] como se ve en la Tabla 46.

Tabla 46: Costos de equipos primarios

	Costo FOB importados	Costo FOB chilenos	Costo CIF importados	Costo CIF chilenos	Costo total [USD]	Referencia
Tanque almacenador residuo		6.273		6.587	6.587	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Tornillo sin fin	43.200		49.680		49.680	(Xinxiang Jinrui Machinery Factory, 2017; Botou Xin Jia Machinery Co., Ltd, 2017)
Molino	78.000		89.700		89.700	(Jiangxi Shicheng Mine Machinery Factory, 2017)

Digestor con serpentín		316.325		332.141	332.141	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Tanque almacenador agua		270		283	283	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Filtro	400.000		460.000		460.000	(Chang, 2017)
Gasómetro		522.262		548.375	548.375	(Alacero, 2016; Pérez, 2004)
Compresor	2.250.120		2.587.638		2.587.638	(Gutierrez, 2017)
Condensador	100.000		115.000		115.000	(Wenzhou Wuhuan Refrigeration Accessories Factory, 2017)
Enfriador	73.000		83.950		83.950	(Dongguan Naser Machinery Co., Ltd., 2017)
Adsorbedor		233.970		245.668	245.668	(Vatavuk, 1999)
Cogenerador	12.796.243		14.715.679		14.715.679	(Chamy y Vivanco, 2007)
Conexión a la red	300.000		345.000		345.000	(Chamy y Vivanco, 2007)
Filtro SCR	15.796		18.165		18.165	(Araya, 2017)
				Total	19.597.867	

Luego, conociendo el costo de los equipos comprados en planta, el resto de los costos se estima mediante porcentajes recomendados por el Manual de análisis económico de procesos químicos (Peters, 1991), como se muestra en la Tabla 47. Obteniendo un costo total de 62.805.778 [USD].

Tabla 47: Capex

Costos Directos		
	[%]	Costos [USD]
Equipos comprados en planta	33,3%	19.597.867
Instalación de Equipo	7,3%	4.296.229
Instrumentación y Control	2,5%	1.471.311
Piping	3,5%	2.059.836
Sistema eléctrico	4,1%	2.412.951
Construcciones	8,0%	4.708.196
Mejoras de terreno	1,5%	882.787
Instalaciones de Servicios	8,1%	4.767.049
Terreno	1,0%	588.525
Subtotal	69,3%	40.784.749
Costos Indirectos		
	[%]	Costo [USD]
Ingeniería y Supervisión	4,0%	2.354.098

Gastos de Construcción	10,2%	6.002.950
Honorarios de Contratista	1,5%	882.787
Contingencia	15,0%	8.827.868
Subtotal	30,7%	18.067.703
Otros		
Derechos de agua		31.103
Página web		1.583
Diseñador (logo)		1.583
Subtotal		34.269
Total		58.886.722

Anexo I: Organización de la empresa

Como se muestra en el organigrama la empresa contará con 4 áreas, el área gerencial, operacional, comercial y administración.

Gerencia general

- Gerente general: (Ingeniería civil química o industrial con posgrado) Se encarga de la administración general, contacto entre áreas, toma de decisiones y vínculo entre empresa e inversionistas.
- Asistente gerencial: Organiza las actividades gerenciales y lleva registro de ellas.

Área de Operaciones

- Gerente de operaciones: (Ingeniería civil química o industrial) Supervisa el funcionamiento de la planta y el cumplimiento del programa de producción. Organizando al equipo de trabajo que tiene a su cargo, planificando sus funciones y tareas. Además, debe realizar informes de gestión a la gerencia general informando sobre resultados obtenidos.
 - Jefe de producción: (Ingeniería civil química) Debe supervisar y administrar al personal a cargo, los operarios, además de gestionar los insumos que se requieren para el proceso.
 - Operario de producción: (Educación media) Se contará con 5 operarios por turno que se encarguen del funcionamiento de la planta, controlando que los equipos funcionen correctamente.
 - Jefe de mantención: (Ingeniería civil mecánico) Encargado de diseñar y supervisar el mantenimiento de la planta, gestionando equipos, maquinaria o servicios necesarios.
 - Supervisor mecánico: (Técnico en mecánica industrial) Es el encargado de mantener la planta operando sin problemas mecánicos, realizando el mantenimiento correspondiente para cada equipo.
 - Supervisor eléctrico: (Técnico en electricidad industrial) Es el encargado de mantener el funcionamiento eléctrico de la planta, mediante la supervisión correspondiente.

- Jefe de control de calidad: (Ingeniería civil química) Aplica técnicas de control estadístico de la calidad y supervisa las actividades del proceso en relación al cumplimiento de los estándares de calidad y control del proceso del biogás y el digestato.
- Analista control de calidad: (Analista químico) Es el encargado de registrar las variables del proceso que se desean estudiar para su control de calidad.
- Jefe de bodega: (Ingeniero de logística) Debe supervisar y administrar el funcionamiento de la bodega donde se reciben los residuos y se encuentran los digestores.
- Operario de bodega: (Educación media) Se encarga de recibir los residuos que llegan a la planta y llevar registro de esto.

Área Comercial: Estrategia de marketing, contabilidad, compras y ventas, tesorería y presupuestos.

- Gerente comercial: (Ingeniería comercial) Administra campañas publicitarias, supervisa la contabilidad de la empresa, además facilita la gestión comercial de compras y ventas. Y debe generar indicadores comerciales y realizar un seguimiento de estos.
- Asistente de contabilidad: (Contador auditor) Debe llevar el registro y documentación de contables. Revisión de libros de compra/venta, honorarios y formularios del servicio de impuestos internos.
- Asistente de ventas: (Técnico en administración de empresas) Gestiona y recibe órdenes de compras y ventas, además se encarga de la atención de clientes.

Área de administración y recursos humanos: Administración de personal, prevención de riesgos y, funciones de limpieza y seguridad.

- Gerente de administración y recursos humanos: (Ingeniería en recursos humanos) Supervisa y administra el proceso de pago de remuneraciones y finiquitos, acorde a los contratos establecidos. Además de velar por el cumplimiento de las leyes laborales de contratación y asesorar en temas de administración y legislación laboral.
- Asistente de recursos humanos: (Técnico en administración de recursos humanos) Realiza el cálculo y pago de las remuneraciones a los empleados.
- Prevencionista de riesgo: (Técnico en prevención de riesgos) Realiza capacitaciones de prevención de riesgos en la planta para los trabajadores, así como charlas de seguridad para los visitantes. Debe diseñar un plan de prevención de riesgos en la empresa y gestionarlo. Además, es el encargado de supervisar y realizar auditorías en planta.
- Asistente de servicios administrativos: (Técnico en administración de empresas) organiza, coordina y transmite la información y documentación requeridas en las tareas administrativas y de gestión, como la gestión de insumos y materiales frente a requerimientos de técnicos, de acuerdo con procedimientos establecidos, las normativas de seguridad y sanitarias necesarias para la realización de su oficio.

- Asistente de contratista: (Técnico en administración de empresas): Encargado de la subcontratación de personal de aseo y seguridad. Contará con 2 guardias por turno y 3 personas por turno para aseo.

Anexo J: Opex

En la Tabla 48 se muestra el detalle de los costos de operación del proyecto, estos se separan de forma general en costos directos de producción y costos de administración y ventas. Dentro de los costos directos, se encuentran los insumos del proceso, servicios, mano de obra de operación, profesionales de supervisión y servicios de mantención. Los gastos de administración y ventas comprenden, los honorarios del personal subcontratado, los sueldos de administración, gastos en comunicación y publicidad, además de peajes por el uso de la red de transmisión de energía eléctrica del SIC y seguro de la propiedad.

Tabla 48: Opex al 2018

	Cantidad anual	Unidad	Precio unitario/ sueldo	Unidad	Costo anual (USD 2018)	Porcentaje	Comentarios
Costos directos de producción							
Insumos del proceso					8.992.895	59,87%	
<i>Carbón activado</i>	194.123	[ton/año]	80	[USD/ton]	8.948.995		
<i>NH₃ líquido</i>			0,05	[USD/ton]	43.651		El producto tiene una pureza del 25% (Shijiazhuang Xinlongwei Chemical Co., Ltd.) Se cambia una vez al año. (Pequinsa, 2017)
	873.015	[ton/año]					
<i>Glicol</i>	126	[m3/año]	1,98	[USD/M3]	249		
Servicios de agua	117.282	[m3/año]	0,019	[USD/m3]	2.268	0,02%	
Mano de obra de operación					555.454	3,70%	
<i>Operario de producción</i>	20	N.º	792	[USD]	189.964		(Tu salario.org, 2018)
<i>Supervisor mecánico</i>	4	N.º	1.520	[USD]	72.946		(Mifuturo)
<i>Supervisor eléctrico</i>	4	N.º	1.520	[USD]	72.946		(Mifuturo)
<i>Analista de control de calidad</i>	4	N.º	1.330	[USD]	63.828		(Mifuturo)
<i>Operario de bodega</i>	8	N.º	792	[USD]	75.985		(Tu salario.org, 2018)
<i>Guardia</i>	6	N.º	792	[USD]	56.989		(Tu salario.org, 2018)
<i>Aseo</i>	3	N.º	633	[USD]	22.796		(Tu salario.org, 2018)
Supervisión directa					112.458	0,75%	
<i>Jefe de producción</i>	1	N.º	2.659	[USD]	31.914		(Mifuturo)
<i>Jefe de mantención</i>	1	N.º	2.470	[USD]	29.634		(Mifuturo)
<i>Jefe de control de calidad</i>	1	N.º	2.659	[USD]	31.914		(Mifuturo)
<i>Jefe de bodega</i>	1	N.º	1.583	[USD]	18.996		(Tu salario.org, 2018)
Mantención					4.122.071	27,44%	Se asume como el 7% de la inversión.
Subtotal					13.785.146	91,77%	
Costos de administración y ventas							
Honorarios					5.635	0,04%	

<i>Asistencia computacional</i>			404	[USD/mes]	4.844		Servicio técnico 1 vez al mes, para 17 computadores (Soporte Técnico).
<i>Asistencia jurídica</i>					792		Servicios legales (Bio Bussines Group [BBG])
Administración					220.738	1,47%	
<i>Gerente General</i>	1	N.º	3.799	[USD]	45.591		(Mifuturo)
<i>Secretaria de Gerencia</i>	1	N.º	855	[USD]	10.258		(Mifuturo)
<i>Gerente Comercial</i>	1	N.º	2.090	[USD]	25.075		(Mifuturo)
<i>Asistente de ventas</i>	1	N.º	950	[USD]	11.398		(Mifuturo)
<i>Asistente de contabilidad</i>	1	N.º	1.330	[USD]	15.957		(Tu salario.org, 2018)
<i>Gerente de operaciones</i>	1	N.º	3.609	[USD]	43.312		(Mifuturo)
<i>Gerente de recursos humanos</i>	1	N.º	1.583	[USD]	18.996		(Mifuturo)
<i>Asistente de RR.HH</i>	1	N.º	1.330	[USD]	15.957		(Mifuturo)
<i>Prevencionista de Riesgos</i>	1	N.º	950	[USD]	11.398		(Mifuturo)
<i>Asistente de servicios administrativos</i>	1	N.º	950	[USD]	11.398		(Mifuturo)
<i>Asistente de contratistas</i>	1	N.º	950	[USD]	11.398		(Mifuturo)
Comunicaciones y publicidad				[USD]	2.407	0,02%	
Telefonía e internet					2.393		Internet de 60 Mbps con 12 líneas. (Entel, 2017)
Página web					14		Tarifa promedio por año. (NIC,2017)
Peaje SIC					418.065	2,78%	Se asume como el 5% del costo de la energía eléctrica.
Seguros					588.867	3,92%	Se supone como el 1% del costo de inversión.
Subtotal					1.235.712	8,23%	
Total					15.020.857	100,00%	

Anexo K: Flujo de caja

El financiamiento considerado para el proyecto cubre el 85% de la inversión junto con el capital de trabajo. En la Tabla 49 se muestra el detalle para el caso base del préstamo a 10 años con una tasa de interés del 8% y una cuota fija.

Tabla 49: Flujo para el financiamiento del proyecto

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Deuda inicial	65.841.177	65.841.177	61.296.194	56.387.613	51.086.345	45.360.975	39.177.577	32.499.506	25.287.189	17.497.888	9.085.442
Cuota		-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277	-9.812.277
Interés		-5.267.294	-4.903.696	-4.511.009	-4.086.908	-3.628.878	-3.134.206	-2.599.960	-2.022.975	-1.399.831	-726.835
Amortización		-4.544.983	-4.908.581	-5.301.268	-5.725.369	-6.183.399	-6.678.071	-7.212.316	-7.789.302	-8.412.446	-9.085.442
Deuda final	65.841.177	61.296.194	56.387.613	51.086.345	45.360.975	39.177.577	32.499.506	25.287.189	17.497.888	9.085.442	0

Las depreciaciones se calculan según la vida útil de los bienes físicos de activos del Servicio de Impuestos Internos (SII, 2003). En la Tabla 50 se muestran valores residuales, depreciación anual, valor libro y ganancia o pérdida de capital.

Tabla 50: Depreciaciones a los 10 años

	Inversión	Valor residual	Vida útil	Depreciación anual	Valor libro	Ganancia/Pérdida de capital
Equipos	20.902.912	2.090.291	5	4.180.582	0	2.090.291
Instalación de Equipo	4.582.320	458.232	3	1.527.440	0	458.232
Instrumentación y Control	1.569.288	156.929	3	523.096	0	156.929
Piping	2.197.003	219.700	3	732.334	0	219.700
Sistema eléctrico	2.573.632	257.363	3	857.877	0	257.363
Construcciones	5.021.721	502.172	13	386.286	1.158.859	-656.687
Instalaciones de Servicios	5.084.492	508.449	3	1.694.831	0	508.449
Total		4.193.137		9.902.447	1.158.859	3.034.278

A continuación, en la Tabla 51 se presenta el flujo de caja del caso base esperado para un horizonte de evaluación de 10 años.

Tabla 51: Flujo de caja esperado

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
(+) Ingresos por basura recolectada		13	13	13	14	14	15	15	15	16	16
(+) Ingresos por venta de electricidad		8.458.065	12.667.787	16.877.510	21.087.232	25.296.954	29.506.676	33.716.398	37.926.120	42.135.842	46.345.564
(+) Ingresos por venta de digestato		3.043.255	3.168.321	3.293.386	3.418.451	3.543.517	3.668.582	3.793.647	3.918.712	4.043.778	4.168.843
(-) OPEX		-15.020.857	-15.228.935	-15.437.013	-15.645.091	-15.853.168	-16.061.246	-16.269.324	-16.477.402	-16.685.480	-16.893.557
(-) Pago Interés crédito		-5.267.294	-4.903.696	-4.511.009	-4.086.908	-3.628.878	-3.134.206	-2.599.960	-2.022.975	-1.399.831	-726.835
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital											2.844.837
(-) Depreciaciones		-9.284.201	-9.284.201	-9.284.201	-4.281.742	-4.281.742	-362.169	-362.169	-362.169	-362.169	-362.169
(-) Pérdidas ejercicio anterior		0	-18.071.019	-31.651.729	-40.713.043	-40.221.087	-35.144.391	-21.526.740	-3.248.134	0	0
(=) Utilidad antes de Impuesto		-18.071.019	-31.651.729	-40.713.043	-40.221.087	-35.144.391	-21.526.740	-3.248.134	19.734.167	27.732.156	35.376.698
(-) Impuesto (25%)		0	0	0	0	0	0	0	-4.933.542	-6.933.039	-8.844.175
(=) Utilidad después de Impuesto		-18.071.019	-31.651.729	-40.713.043	-40.221.087	-35.144.391	-21.526.740	-3.248.134	14.800.626	20.799.117	26.532.524
(+) Depreciaciones		9.284.201	9.284.201	9.284.201	4.281.742	4.281.742	362.169	362.169	362.169	362.169	362.169
(-/+) Ganancias/pérdidas de Capital		0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.844.837

(+) Pérdida ejercicio anterior		0	18.071.019	31.651.729	40.713.043	40.221.087	35.144.391	21.526.740	3.248.134	0	0
(=) Flujo de caja Operacional		-8.786.818	-4.296.509	222.887	4.773.698	9.358.438	13.979.820	18.640.775	18.410.929	21.161.286	24.049.856
(-) Inversiones	-58.886.722										
(-) IVA de la inversión 19%	-11.188.477										
(+) Recuperación del IVA de la inversión		11.188.477									
(+) Valor Residual de los activos											3.931.344
(-) Capital de trabajo	-7.385.009										
(+) Recuperación del Capital de Trabajo											7.385.009
(+) Préstamos	65.841.177										
(-) Amortizaciones		-4.544.983	-4.908.581	-5.301.268	-5.725.369	-6.183.399	-6.678.071	-7.212.316	-7.789.302	-8.412.446	-9.085.442
(=) Flujo de Capitales	-11.619.031	6.643.494	-4.908.581	-5.301.268	-5.725.369	-6.183.399	-6.678.071	-7.212.316	-7.789.302	-8.412.446	2.230.912
Flujo de caja Neto	-11.619.031	-2.143.324	-9.205.091	-5.078.381	-951.671	3.175.039	7.301.749	11.428.459	10.621.627	12.748.840	26.280.767