



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

MODELO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE
CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS
PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

DANIEL ÁLVARO LÓPEZ ARRIAZA

PROFESOR GUÍA:
LEONEL NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
BRUNO GROSSI CÓRDOVA

SANTIAGO DE CHILE
2016

Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es una instalación para la eliminación de residuos sólidos domiciliarios. Dentro de éste ocurren reacciones que tiene como producto el biogás, un gas de gran valor energético. Además de este producto, también se producen residuos líquidos denominados lixiviados.

En Chile no hay incentivos que favorezcan el desarrollo de proyectos de biogás y la experiencia en instalaciones de aprovechamiento energético es escasa, por lo que la motivación de este trabajo es contribuir, mediante una guía básica de diseño, a la evaluación de alternativas de valorización energética de biogás; como una nueva oportunidad de negocio con valor social, privado y comercial.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo de estudio de ingeniería de perfil para evaluar proyectos de extracción y aprovechamiento de biogás, el cual incluya una metodología para cuantificar el potencial energético de un relleno sanitario y para efectuar el diseño básico de una instalación, en particular, para cuatro alternativas tecnológicas de aprovechamiento energético.

Para el desarrollo de este trabajo se emplea la siguiente metodología: i) Recopilación de antecedentes generales, ii) Estudio de modelos de estimación de la producción de biogás, iii) Revisión del estado del arte de sistemas de biogás, iv) Caracterización de los rellenos sanitarios chilenos, v) Selección de tecnologías de aprovechamiento energético técnicamente factibles, vi) Definición de casos particulares de estudio, vii) Desarrollo de un modelo para el diseño y viii) Aplicación del modelo para el análisis de los siguientes proyectos: a) Generación eléctrica con motores de combustión interna y b) Evaporación de lixiviados para el relleno sanitario de El Molle; c) Cogeneración con microturbinas y d) Generación de vapor y agua caliente con calderas para uso directo y calefacción en red distrital para el relleno sanitario de Osorno.

Para los proyectos contemplados en el relleno sanitario El Molle, la instalación de motores resulta rentable económicamente, la instalación de unidades de evaporación de lixiviado es rentable cuando no se considera el costo de inversión del sistema de extracción. Para el caso de los proyectos en el relleno sanitario de Osorno, se evalúa la factibilidad privada y social. La instalación de microturbinas no es factible ni privada ni socialmente, mientras que el proyecto de generación de agua caliente y vapor no resulta factible privadamente, sin embargo, si es factible desde la perspectiva social, debido a los beneficios asociados a la sustitución de la leña húmeda.

Los resultados obtenidos sugieren que las mejores oportunidades de negocio para los proyectos de valoración energética se concentran en la zona central del país y corresponden a la instalación de sistemas de generación eléctrica con motores a combustión interna para inyección a la red. La factibilidad privada de otro tipo de proyectos de biogás depende en gran parte de las características de su entorno y de las tarifas de comercialización de productos energéticos (energía eléctrica y térmica). Es clave analizar exhaustivamente la selección de la tecnología adecuada y establecer un modelo de negocios apropiado a las condiciones y restricciones de la zona de emplazamiento del relleno sanitario. Se identifica, como oportunidad con valor social, el uso de biogás para sustitución de leña húmeda en zonas saturadas; este tipo de proyectos podría optar por un subsidio que genere incentivos a invertir a un agente privado.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes Generales.....	1
1.2	Motivación.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo General.....	3
1.3.2	Objetivos Específicos.....	3
1.4	Alcances.....	4
2	Antecedentes Específicos.....	5
2.1	Residuos sólidos urbanos.....	5
2.2	El relleno sanitario.....	5
2.3	Métodos constructivos de un relleno sanitario.....	5
2.3.1	Método de zanja o trinchera.....	6
2.3.2	Método del área.....	6
2.4	Emisiones del relleno.....	7
2.5	Factores que condicionan la producción de biogás.....	8
2.6	Fases de la generación del biogás.....	9
2.7	Propiedades del biogás.....	11
2.8	Sistema de extracción de biogás.....	11
2.8.1	Pozos de extracción.....	12
2.8.2	Cabecal de pozo.....	13
2.8.3	Tuberías colectoras.....	14
2.8.4	Bombeo de extracción.....	15
2.9	Modelos de estimación de producción de biogás.....	15
2.9.1	Modelo Estequiométrico.....	16
2.9.2	Modelo LandGEM.....	17
2.10	Tecnologías de utilización de biogás de relleno sanitario.....	20
2.10.1	Generación de electricidad.....	22
2.10.2	Uso directo como gas de medio-BTU.....	24
2.10.3	Uso directo como gas de alto-Btu.....	24
2.11	Casos exitosos de aprovechamiento energético en Chile.....	25
2.11.1	Relleno sanitario Loma los Colorados.....	25
2.11.2	Relleno sanitario Santa Marta.....	25
3	Metodología.....	26
3.1	Recopilación de antecedentes generales de un relleno sanitario.....	26

3.2	Estudio de modelos de predicción de biogás	26
3.3	Revisión del estado del Arte	26
3.4	Caracterización de los rellenos sanitarios Chilenos.....	26
3.5	Selección de tecnologías y casos de estudio	27
3.6	Desarrollo del modelo de estudio	27
3.7	Análisis de casos	27
4	Caracterización de rellenos sanitarios nacionales y sus condiciones	28
4.1	Caracterización de rellenos sanitarios.....	28
4.2	Caracterización de los residuos.....	29
4.3	Condiciones climáticas	31
4.4	Estimación de generación de biogás de rellenos sanitarios nacionales	31
5	Selección de tecnología y casos de estudio	33
6	Modelo de diseño	35
6.1	Caracterización del relleno sanitario y sus condiciones	36
6.1.1	Determinación de la geometría del relleno sanitario	36
6.1.2	Estimación del volumen de material de cobertura.....	37
6.1.3	Profundidad promedio del relleno sanitario	37
6.1.4	Determinación de la masa total de residuos al término de la vida útil	37
6.1.5	Estimación de la recepción de residuos	38
6.1.6	Determinación de la vida útil del relleno sanitario.....	38
6.1.7	Caracterización de condiciones de sitio.....	39
6.1.8	Caracterización de residuos	39
6.2	Estimación de la producción de biogás.....	39
6.2.1	Estimación de la tasa anual de generación de metano.....	40
6.2.2	Estimación del potencial de generación de metano.....	40
6.2.3	Estimación de la composición del biogás.....	40
6.2.4	Estimación de la producción de biogás	40
6.3	Diseño del sistema de extracción de biogás.....	41
6.3.1	Diseño de pozos de extracción vertical y colectores horizontales.....	41
6.3.2	Determinación del radio de influencia de pozos y vacío requerido en cabezal de succión 46	
6.3.3	Localización de los pozos.....	47
6.3.4	Estimación del flujo de biogás por pozo	47
6.3.5	Layout ductos colectores	48
6.3.6	Dimensionamiento de los diámetros de ductos	51
6.3.7	Sistemas de manejo de condensado.....	51

6.3.8	Cálculo pérdidas de carga y construcción de la curva H-Q de la red.....	54
6.3.9	Selección equipos de tratamiento primario	55
6.3.10	Selección de equipos de extracción y componentes auxiliares	57
6.4	Estimación de la eficiencia de extracción y del potencial energético de un relleno sanitario.	58
6.5	Selección de tecnologías de aprovechamiento.....	61
6.5.1	Generación eléctrica a gran escala con motores a combustión interna.	62
6.5.2	Generación eléctrica y cogeneración a pequeña escala con microturbinas	64
6.5.3	Uso directo del biogás para producción de vapor o agua caliente.....	65
6.5.4	Evaporación de lixiviados	66
6.6	Selección de equipos.....	67
6.6.1	Equipos de compresión, limpieza y secado de biogás.....	67
6.6.2	Motores de combustión interna	68
6.6.3	Microturbinas	69
6.6.4	Tren de gas y quemadores para calderas.	70
6.6.5	Evaporadores de lixiviado	70
6.7	Estimación de Inversiones (CAPEX).....	71
6.7.1	Sistema de extracción de biogás.....	72
6.7.2	Proyecto de generación eléctrica con motores a combustión interna.....	72
6.7.3	Proyecto de cogeneración con microturbinas	72
6.7.4	Proyecto uso directo de biogás para producción de ACS y/o vapor.	73
6.7.5	Proyecto de evaporación de lixiviados	74
6.8	Estimación de costos de operación y mantenimiento (OPEX)	74
6.9	Análisis de factibilidad económica	75
6.9.1	Estimación de ingresos	76
6.9.2	Flujo de caja	80
6.9.3	Valor Actual Neto (VAN)	83
6.9.4	Tasa interna de retorno (TIR)	83
6.9.5	Análisis de sensibilidad	83
6.9.6	Factibilidad privada	83
6.9.7	Identificación de beneficios sociales y ambientales.....	83
6.9.8	Corrección de costos por precios sociales	84
6.9.9	Flujo de caja, VAN y TIR Social.	84
6.9.10	Factibilidad Social	85
6.9.11	Determinación de subsidio aplicable.....	85
7	Análisis de casos.....	86

7.1	Relleno sanitario de Osorno.....	86
7.1.1	Caracterización del relleno sanitario y sus condiciones.....	87
7.1.2	Estimación producción de biogás.....	89
7.1.3	Diseño de sistema de extracción de biogás.....	90
7.1.4	Estimación eficiencia de extracción y potencial energético.....	92
7.1.5	Selección de tecnología.....	93
7.1.6	Selección de equipos.....	93
7.1.7	Estimación de inversiones.....	95
7.1.8	Estimación costos de operación y mantenimiento.....	96
7.1.9	Análisis de factibilidad económica.....	97
7.2	Relleno sanitario El Molle.....	101
7.2.1	Caracterización del relleno sanitario y sus condiciones.....	102
7.2.2	Estimación de la producción de biogás.....	105
7.2.3	Diseño del sistema de extracción de biogás.....	106
7.2.4	Estimación de la eficiencia de extracción y potencial energético.....	109
7.2.5	Selección de la tecnología.....	110
7.2.6	Selección de equipo.....	111
7.2.7	Estimación de Inversiones.....	112
7.2.8	Estimación de costos de operación y mantenimiento.....	113
7.2.9	Análisis de factibilidad económica.....	114
8	Discusiones.....	117
8.1	Discusión caracterización de rellenos sanitarios chilenos.....	117
8.2	Discusión de resultados de implementación de modelo de diseño.....	117
8.3	Discusión económica de estudio de casos relleno sanitario de Osorno.....	118
8.4	Discusión económica de estudio de casos relleno sanitario de El Molle.....	119
9	Conclusiones.....	120
10	Bibliografía.....	123
	Anexos.....	127

Índice de tablas

Tabla 2.1 Composición típica de biogás en rellenos nacionales.	7
Tabla 2.2 Duración típica de las fases de generación de biogás en un relleno sanitario.	10
Tabla 2.3 Propiedades de una biogás tipo.	11
Tabla 2.4 Análisis de composición porcentual de residuos productores de biogás.	16
Tabla 2.5 Clasificación de residuos nacionales según rapidez de descomposición.	17
Tabla 2.6 Tabla estimación de factor de corrección de metano.	19
Tabla 2.7 Alternativas tecnológicas de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario con sus rangos de flujos.	21
Tabla 2.8 Número de instalaciones de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario en el mundo (Año 2003).	22
Tabla 2.9 Costos estimados de inversión.	22
Tabla 2.10 Costos estimados de operación y mantenimiento.	22
Tabla 2.11 Rangos típicos de flujos, potencias y eficiencias de tecnologías de generación eléctrica.	24
Tabla 2.12 Valores referenciales de vapor potencial según capacidad del Relleno sanitario	24
Tabla 4.1 Valores estimados de capacidad de rellenos sanitarios en Chile.	29
Tabla 4.2 Lista de localidades para estimar composición de residuos domiciliarios.	30
Tabla 4.3 Estimación de la composición promedio de los residuos según localidad.	30
Tabla 4.4 Estimación de generación de metano rellenos sanitarios nacionales.	32
Tabla 6.1 Ventajas y desventajas de tipos de colectores de biogás.	42
Tabla 6.2 Comparación entre ductos enterrados o sobre el suelo.	51
C: Constante de ajuste por diámetro de tubería, dado por Tabla 6.3.	54
Tabla 6.3 Valor constante de C ecuación de Pole.	54
Tabla 6.4 Relación Longitud/Diámetro por accesorio.	55
Tabla 6.5 Tipos de sopladores y compresores utilizados.	58
Tabla 6.6 Eficiencias promedio de extracción.	59
Tabla 6.7 Principales características de las microturbinas.	65
Tabla 6.8 Especificaciones Motores Serie G3500 CAT.	68
Tabla 6.9 Especificaciones Motor APG1000 Waukesha.	69
Tabla 6.10 Especificaciones Motores serie TCG 2020 MWM.	69
Tabla 6.11 Especificaciones Microturbinas CR Capstone.	69
Tabla 6.12 Especificaciones Microturbinas Ingersoll Rand.	70
Tabla 6.13 Costos sistema de extracción de biogás.	72
Tabla 6.14 Costos proyecto generación eléctrica con motores a combustión interna.	72

Tabla 6.15 Costos proyecto cogeneración con microturbinas.....	73
Tabla 6.16 Costos proyecto de generación de vapor y/o agua caliente.....	73
Tabla 6.17 Inversiones de redes distritales.....	74
Tabla 6.18 Costos de operación y mantenimiento por tipo de proyecto.....	75
Tabla 6.19 Emisiones de CO ₂ equivalentes del sistema eléctrico por región.....	79
Tabla 6.20 Rangos de costos de tratamientos de lixiviado.....	80
Tabla 6.21 Modelo de flujo de caja social.....	81
Tabla 6.22 Modelo de flujo de caja privado.....	82
Tabla 6.23 Precios sociales 2015.....	84
Tabla 7.1 Caracterización geométrica y capacidad de relleno sanitario de Osorno.....	87
Tabla 7.2 Datos para estimación de generación de residuos.....	87
Tabla 7.3 Estimaciones de residuos.....	88
Tabla 7.4 Caracterización de residuos estimada para Osorno.....	88
Tabla 7.5 Características climáticas zona de emplazamiento de relleno sanitario de Osorno.....	89
Tabla 7.6 Estimación composición de biogás de relleno sanitario de Osorno.....	89
Tabla 7.7 Constantes cinéticas para modelo LandGEM para relleno sanitario de Osorno.....	89
Tabla 7.8 Estimación de biogás relleno sanitario de Osorno.....	89
Tabla 7.9 Datos para cálculo de requerimientos de vacío en cabezal de pozo.....	90
Tabla 7.10 Cálculo de velocidad máxima en ductos de biogás.....	91
Tabla 7.11 Cálculos de máxima pérdidas de carga.....	92
Tabla 7.12 Estimaciones de máximo flujo de biogás captable.....	93
Tabla 7.13 Inversiones del sistema de extracción relleno sanitario Osorno.....	95
Tabla 7.14 Inversiones del proyecto de microturbinas.....	95
Tabla 7.15 Inversiones del proyecto generación de agua caliente y vapor.....	96
Tabla 7.16 Inversiones estimadas para redes distritales.....	96
Tabla 7.17 Costos de operación y mantenimiento de proyectos para relleno sanitario Osorno.....	97
Tabla 7.18 Indicadores económicos privados proyecto microturbinas.....	98
Tabla 7.19 Indicadores sociales proyecto microturbinas.....	99
Tabla 7.20 Indicadores económicos privados proyecto caldera para generación de agua caliente y vapor.....	99
Tabla 7.21 Indicadores sociales proyecto caldera para generación de agua caliente y vapor.....	100
Tabla 7.22 Caracterización geométrica y capacidad de relleno sanitario de El Molle.....	103
Tabla 7.23 Datos para estimación de generación de residuos.....	103
Tabla 7.24 Estimación de residuos.....	104
Tabla 7.25 Caracterización de residuos estimada para relleno sanitario El Molle.....	104
Tabla 7.26 Características climáticas zona de emplazamiento relleno sanitario El Molle.....	105

Tabla 7.27 Estimación composición biogás de relleno sanitario de El Molle.....	105
Tabla 7.28 Constantes cinéticas para modelo LandGEM para relleno sanitario de El Molle.	105
Tabla 7.29 Estimación de biogás relleno sanitario El Molle.....	105
Tabla 7.30 Datos para cálculo de requerimientos de vacío de cabezal de pozo.....	107
Tabla 7.31 Cálculos de velocidad máxima en ductos de biogás.	107
Tabla 7.32 Estimación de máximo flujo de biogás captable y potencia energético.	109
Tabla 7.33 Estimación de lixiviados generados en relleno sanitario El Molle.....	112
Tabla 7.34 Inversiones para sistema de extracción relleno sanitario El Molle.	112
Tabla 7.35 Inversiones del proyecto de generación eléctrica con motores de combustión interna.	113
Tabla 7.36 Inversiones del proyecto de evaporación de lixiviado.	113
Tabla 7.37 Costos de operación y mantenimiento de proyectos para relleno sanitario El Molle.	114
Tabla 7.38 Indicadores económicos privados proyecto motores de combustión interna.	114
Tabla 7.39 Indicadores económicos privados proyecto motores de combustión interna en mercado spot.	115
Tabla 7.40 Indicadores económicos proyecto evaporación de lixiviados.	116
Tabla 7.41 Indicadores económicos proyecto evaporación de lixiviados sin sistema de extracción de biogás.	116
Tabla 8.1 Resumen evaluación de proyectos en relleno sanitario de Osorno.	118
Tabla 8.2 Resumen evaluación de proyectos en relleno sanitario El Molle.....	119

Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema método de zanja o trinchera.....	6
Figura 2.2 Esquema método de área.....	7
Figura 2.3 Factores que afectan la generación de biogás.	8
Figura 2.4 Curva de generación de biogás típica.	10
Figura 2.5 Evolución de la composición del biogás en cada fase.	11
Figura 2.6 Esquema típico de relleno sanitario.	12
Figura 2.7 Esquemas de pozos de extracción de biogás.....	13
Figura 2.8 Cabezal de pozo de extracción.....	13
Figura 2.9 Esquema trampa de condensado.	14
Figura 2.10 Esquema de cárcamo de condensado.	15
Figura 2.11 Usos del biogás según tratamientos.	21
Figura 3.1 Metodología para el desarrollo del trabajo de título.	26
Figura 4.1 Temperaturas y precipitaciones promedio anuales por región.....	31
Figura 6.1 Diagrama metodología general de diseño de sistema de extracción y aprovechamiento de biogás.....	35
Figura 6.2 Diagrama etapa de caracterización de relleno sanitario.....	36
Figura 6.3 Diagrama etapas para estimación de flujo de biogás.....	40
Figura 6.4 Diagrama etapa de diseño de sistema de extracción de biogás.....	41
Figura 6.5 Diseño típico de pozo de extracción vertical.	44
Figura 6.6 Esquema de sistemas de colectores horizontales	45
Figura 6.7 Esquema unión de tuberías colectoras horizontales.....	45
Figura 6.8 Posicionamiento de pozos de extracción.....	47
Figura 6.9 Tipos de layout para ductos colectores.	49
Figura 6.10 Esquema de control con valvulas en Manifold.	50
Figura 6.11 Esquemas de control de presión de vacío en pozos.	50
Figura 6.12 Esquema extracción de condensado en puntos bajos del sistema.	52
Figura 6.13 Tipos de cárcamos de condensado.	52
Figura 6.14 Esquema de separador de humedad centrífugo.....	56
Figura 6.15 Diagrama de proceso de estación de tratamiento primario.	56
Figura 6.16 Diagrama de proceso de tratamiento primario para sistemas de alta presión.	57
Figura 6.17 Diagrama de proceso de estación de extracción.	58
Figura 6.18 Diagrama etapa de estimación de eficiencia de extracción y potencial energético.	59
Figura 6.19 Planificación de construcción de un relleno sanitario.....	61
Figura 6.20 Dimensionamiento y expansión sistema de generación eléctrica.	63

Figura 6.21 Diagrama de procesos instalación con motores a combustión interna.....	64
Figura 6.22 Diagrama de proceso de funcionamiento de una microturbina.....	64
Figura 6.23 Tren de gas para calderas de biogás.....	66
Figura 6.24 Diagrama de proceso de evaporación de lixiviado.	67
Figura 6.25 Sistema E-VAP para evaporación de lixiviados con biogás.....	71
Figura 6.26 Diagrama etapa de análisis de factibilidad económica.	76
Figura 6.27 Evolución PMM SIC.....	77
Figura 6.28 Evolución PMM SING.....	77
Figura 6.29 Evolución costo marginal barra Alto Jahuel 220.	77
Figura 6.30 Evolución del valor promedio de traspaso de excedentes de energía ERNC.	78
Figura 7.1 Localización de relleno sanitario de Osorno.....	86
Figura 7.2 Dimensiones generales relleno sanitario de Osorno.	87
Figura 7.3 Curva de generación de biogás relleno sanitario de Osorno.....	90
Figura 7.4 Esquema sistema de extracción propuesto.....	91
Figura 7.5 Dimensiones circuito de biogás de mayor largo equivalente.....	92
Figura 7.6 Curva de biogás captable relleno sanitario de Osorno.....	93
Figura 7.7 Estrategia de expansión de capacidad instalada máxima.....	94
Figura 7.8 Estrategia de expansión de capacidad instalada mínima.....	94
Figura 7.9 Análisis sensibilidad precio del vapor para aserraderos.	98
Figura 7.10 Análisis de sensibilidad precio del ACS para red distrital 500 viviendas.....	98
Figura 7.11 Análisis sensibilidad precio del vapor en red distrital 350 viviendas.	100
Figura 7.12 Análisis de sensibilidad precio del ACS para red distrital 350 viviendas.....	100
Figura 7.13 Localización de relleno sanitario y vertedero El Molle.	101
Figura 7.14 Predio de emplazamiento de relleno sanitario y vertedero El Molle.	102
Figura 7.15 Diseño final relleno sanitario de El Molle.	103
Figura 7.16 Curva de generación de biogás relleno sanitario El Molle.	106
Figura 7.17 Esquema sistema de extracción propuesto.....	108
Figura 7.18 Curva de biogás captable relleno sanitario El Molle.	109
Figura 7.19 Interconexión eléctrica proyecto generación El Molle.	110
Figura 7.20 Expansión de la capacidad eléctrica instalada.	111
Figura 7.21 Análisis sensibilidad distancia de línea de distribución.....	115

1 Introducción

1.1 Antecedentes Generales

Un relleno sanitario se define formalmente como una instalación de eliminación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables. Está diseñado, construido y operado con el fin de minimizar molestias y riesgos para la salud, la seguridad de la población y daños en el medio ambiente. En un relleno sanitario la basura es compactada en capas al mínimo volumen practicable, las que son cubiertas diariamente¹.

La eliminación segura y confiable de los residuos sólidos urbanos es una preocupación de las autoridades de salud y municipalidades, las que han sido responsables de estas medidas. Acorde con la realidad y posibilidades de Chile, las autoridades sanitarias han escogido el relleno sanitario como el método de disposición final para residuos sólidos urbanos, debido a su bajo costo y a los mínimos requerimientos tecnológicos.

El programa de mejoramiento de la disposición sanitaria de los residuos sólidos urbanos comienza en Chile con la habilitación del relleno sanitario La Feria en 1977. Unos años después el Ministerio de Salud formula y pone en operación en 1980, el Programa Nacional de Residuos Sólidos, estableciendo un programa priorizado de habilitación de rellenos sanitarios en diferentes ciudades del país. El relleno sanitario en Chile es el único sistema de tratamiento para la disposición final de residuos sólidos urbanos.

Un aspecto importante de un relleno sanitario, es que en su interior este ocurre la degradación anaeróbica de los residuos sólidos (fase predominante), resultando como productos de esta descomposición una serie de gases, que en conjunto se denominan biogás. El gas metano es uno de sus principales componentes, el cual debe ser controlado debido a su alto poder explosivo y por provocar un gran impacto en el efecto invernadero. Producto de lo anterior es que los rellenos sanitarios deben contar con sistemas de extracción de biogás, para controlar la emisión de éste. Así, dependiendo de la tasa de generación de biogás, se decide qué hacer con él, pues solo si se presenta en bajos índices puede ser venteadado a la atmósfera, sino debe ser incinerado en antorchas. También hay diversas alternativas de aprovechamiento energético en lugar de quemarlo. En Chile existen más de 15 instalaciones que captan biogás de relleno sanitario, que producen aproximadamente 160.000.000 m³/año. La mayoría de las instalaciones de gran tamaño y gran parte del volumen captado, se quema en antorchas [1].

El último estudio del potencial de biogás en Chile, publicado por la Comisión Nacional de Energía y la Coperación técnica alemana, señala que el potencial de energía eléctrica total varía entre 160.215 [MWh/año] a 256.343 [MWh/año] y que el potencial de energía cogenerada total varía entre 370.353 [MWh/año] a 592.565 [MWh/año] [2].

¹ DS 189, artículo 4, Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios.

1.2 Motivación

De los gases de efecto invernadero emitidos como resultado de actividades humanas, el metano (principal componente del biogás de relleno sanitario) se convirtió en el segundo más importante después del dióxido de carbono, contabilizando para el año 2005 el 21% de las emisiones globales² [3]. Algunos operadores de rellenos sanitarios en Chile tuvieron incentivos económicos para controlar, extraer e incinerar el metano proveniente del biogás mediante la comercialización de bonos de carbono, debido a la vigencia del protocolo de Kioto. Sin embargo, debido a la no ratificación de compromisos de este protocolo por importantes países industrializados, los precios de los bonos de carbono disminuyeron de forma considerable, eliminando el principal incentivo económico de los proyectos de biogás. Pese a esto último, los rellenos sanitarios deben poseer sistemas de manejo de biogás, habiendo obligación legal de aquello³. Sin embargo, el diseño exigido para la operación de rellenos sanitarios, no contempla elementos que favorezcan la óptima generación y control del biogás, ni tampoco normas específicas destinadas al aprovechamiento del biogás capturado.

Como consecuencia de la ausencia de incentivos y estándares que fomenten el desarrollo de proyectos de biogás, la experiencia en diseño y operación de instalaciones para la producción de este es escasa y está ligada esencialmente a proyectos pilotos. En la actualidad aún existe desconocimiento del potencial energético de cada relleno sanitario en Chile. La nula difusión de la tecnología para la extracción, control y aprovechamiento de biogás potencia el desinterés por proyectos relacionados, debido a la asimetría de conocimiento entre los proveedores de tecnología y los operadores de rellenos sanitarios. Los proyectos de biogás tienen claros beneficios ambientales, producto del control de emisiones contaminantes y la sustitución de combustibles fósiles.

La motivación de este trabajo radica en proporcionar una contribución mediante una guía básica de diseño, y un modelo de estudios de factibilidad validado por casos de estudio, que incentiven la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético del biogás, como nueva oportunidad de negocio con valor social, privado y comercial.

² Basado en potencial calentamiento global durante 100 años.

³ Decreto 189, Artículo 16. “Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios”

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar y validar un modelo para estudios de ingeniería de perfil para proyectos extracción de biogás de relleno sanitario y sus alternativas de valorización energética, mediante la generación de una metodología de diseño y el estudio de casos representativos en Chile.

1.3.2 Objetivos Específicos

- i. Evaluar el estado del arte sobre sistemas de biogás proveniente de rellenos sanitarios, con énfasis en la captura y aprovechamiento energético, tanto en forma de calor como electricidad.
- ii. Estudiar modelos de cálculo de producción de biogás, adaptar y aplicar metodologías a rellenos sanitarios nacionales.
- iii. Caracterizar los rellenos sanitarios nacionales, y proponer alternativas tecnológicas con valor comercial y/o social acorde a la realidad de los rellenos sanitarios en Chile.
- iv. Desarrollar una metodología para diseño básico del sistema de biogás incluyendo las obras de captación, tratamiento y aprovechamiento energético.
- v. Definir casos de estudio y evaluar los costos y beneficios, tanto privados como sociales, generados de la implementación de estos proyectos.

1.4 Alcances

El alcance de este trabajo es el desarrollo de una metodología de diseño a nivel de ingeniería de perfil/conceptual, en la que se incluye el modelamiento de la producción de biogás, la estimación de principales obras e inversiones requeridas y estudio de factibilidad económica tanto privada como social desde un enfoque costo-beneficio.

El desarrollo se limita al estudio de un conjunto de cuatro tecnologías de aprovechamiento energético con merito técnico y económico, a partir de los cuales se expone de la metodología de diseño.

Solo se considera el estudio del sistema de extracción de biogás y aprovechamiento energético, por lo que queda excluido del análisis, el diseño y obras requeridas para el relleno sanitario mismo y su sistema para tratamiento de líquidos percolados (lixiviados).

La metodología se aplica a cuatro casos de estudio para los proyectos Relleno Sanitario el Molle y Relleno Sanitario Osorno.

2 Antecedentes Específicos

2.1 Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU), también denominados residuos sólidos municipales, son remanentes generados en los hogares y sus asimilables, como por ejemplo, los desechos generados en vías públicas, comercio, oficinas, edificios e instituciones tales como escuelas, entre otros. La tasa de formación de desechos aumenta, como consecuencia del crecimiento de la población y el incremento del nivel de vida.

En la última publicación del Reporte del Estado de Medio Ambiente, publicado por el Ministerio de Medio Ambiente el año 2013, se señala en base al estudio “Levantamiento, Análisis, Generación y Publicación de Información Nacional Sobre Residuos Sólidos de Chile” realizado entre el 2009 y 2010, que en el país se generaron 16,9 millones de toneladas de desechos, de los que 6,5 millones correspondían a RSU [4]. La Región Metropolitana es la mayor concentradora de RSU, con 2,8 millones de toneladas en 2009, equivalentes al 43% del total generado. En cuanto a la composición de los residuos municipales, las materias orgánicas representaban el 48%, los plásticos 11%, papel y cartón 10%, vidrios 7%, voluminosos 7%, metales 3% y telas 3% [4].

Mientras en 1995 la totalidad de los residuos domiciliarios se disponía en vertederos y basurales, hoy día más del 60% de los desechos van a dar a rellenos sanitarios [4].

2.2 El relleno sanitario

El relleno sanitario es una instalación para la disposición final de los residuos sólidos. La unidad básica de este es una celda, que consiste en la zona de descarga diaria de basura. Un relleno está conformado por una o más celdas. Esta instalación emplea técnicas para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

Un relleno sanitario, en la práctica, es un reactor bioquímico en el que sus principales entradas son residuos y agua, mientras que sus principales salidas son líquidos percolados (lixiviados) y biogás. Los rellenos han sido el método más económico y ambientalmente aceptable para la evacuación de desechos sólidos. La gestión integral de estos incluye el manejo apropiado de las emisiones atmosféricas y líquidas, pues conllevan riesgos para la salud y el medio ambiente [5].

2.3 Métodos constructivos de un relleno sanitario

El método constructivo y la secuencia de operación de un relleno sanitario están determinados, principalmente, por la topografía del terreno escogido; aunque también depende de la fuente del material de cobertura y de las condiciones hidrogeológicas, siendo clave la profundidad del nivel freático.⁴

El diseño básico contempla la delimitación del área total del sitio y del terreno. La forma en que debe ser repletado determina el método de construcción del relleno sanitario, que condiciona a su

⁴ El nivel freático corresponde al nivel superior de una capa de agua que se almacena y transmite subterráneamente.

vez el origen de la tierra de cobertura y la disposición de las obras de infraestructura. Es clave en el estudio de instalaciones complementarias para un relleno sanitario —como un sistema de extracción de biogás—, las memorias de cálculo que estiman la vida útil de este y su capacidad de albergar residuos. El método constructivo utilizado en un relleno sanitario, influye en las características geométricas finales de este y, en consecuencia, en las posibles configuraciones de redes de tuberías de captación.

De acuerdo a las cualidades del lugar considerado para el emplazamiento del proyecto, existen los métodos constructivos de trinchera, área o mixto. Los métodos se describen a continuación.

2.3.1 Método de zanja o trinchera

Consiste en la excavación de zanjas con determinadas dimensiones. Estas deben estar impermeabilizadas para evitar la infiltración de líquidos percolados y deben contar con una construcción de drenes de recolección. Este método por lo general se usa en pendientes planas y suelos no rocosos, y donde el nivel freático se encuentre a una profundidad considerable [6].

Las zanjas poseen entre 3 y 6 metros de ancho (determinado por los equipos de excavación y transporte de residuos), para así evitar acarrear por largas distancias los desechos y el material de cobertura. La profundidad adecuada debe ser de 2 a 4 metros, delimitado por el nivel freático. El largo y número de trincheras se define por la superficie disponible para el proyecto y la vida útil esperada del relleno sanitario.

En la Figura 2.1 se observa el esquema de un relleno sanitario construido con el método de zanja.

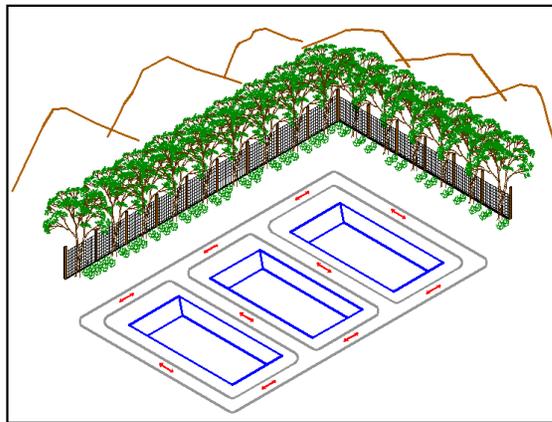


Figura 2.1 Esquema método de zanja o trinchera.

Fuente: [6].

2.3.2 Método del área

Método aplicado en terrenos o áreas planas a semi planas, donde no es factible excavar zanjas o trincheras para disponer y confinar los residuos. El suelo natural, dependiendo de sus características y permeabilidad, debe ser acondicionado y nivelado previo a la recepción de basura. En estos casos, se debe tener identificada la fuente donde se extraerá el material de cobertura, según características y cantidad necesaria. Las celdas se construirán con una pendiente suave en el talud para evitar

deslizamientos y lograr una mayor estabilidad, a medida que se eleva el relleno hasta la altura proyectada [6].

En la Figura 2.2 se observa el esquema de un relleno sanitario con este método constructivo.

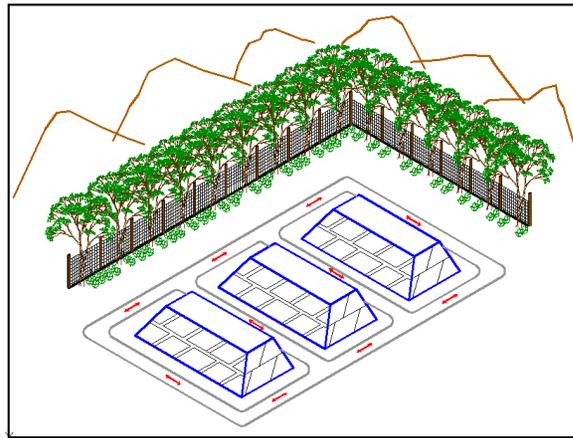


Figura 2.2 Esquema método de área.

Fuente: [6].

2.4 Emisiones del relleno

Los residuos de un relleno sanitario presentan una serie de reacciones químicas, físicas y biológicas que dan origen a las emisiones atmosféricas y líquidas. Los desechos, especialmente los de origen orgánico, al ser compactados liberan agua y líquidos contenidos en su interior, los que escurren hasta la base de la celda del relleno sanitario. El agua que ingrese al relleno lixiviará los desechos arrastrando sólidos en suspensión y compuestos diluidos. Esta mezcla con alto poder contaminante es lo que se conoce como lixiviados o líquidos percolados.

Las emisiones atmosféricas de un relleno sanitario, llamadas comúnmente biogás, son producidas principalmente por reacciones anaeróbicas. La cantidad y composición de este gas depende de la masa depositada de residuos; la composición y el tipo de desecho orgánico; su estado y las condiciones del medio.

La composición del biogás de los rellenos sanitarios nacionales se mantiene dentro de los rangos que se observan en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Composición típica de biogás en rellenos nacionales.

Compuesto del biogás	Rango de composición [% volumen]
Metano (CH ₄)	50,0 – 54,0
Dióxido de carbono (CO ₂)	45,0 – 48,0
Nitrógeno (N ₂)	1,0 – 3,0
Oxígeno (O ₂)	0,2 – 0,9

Fuente: [7].

2.5 Factores que condicionan la producción de biogás

El biogás se genera como resultado de reacciones físicas, químicas y microbianas que ocurren dentro de los rellenos sanitarios, debido a la naturaleza orgánica de gran parte de los residuos, el proceso microbiano gobierna la producción de biogás. Estos procesos son sensibles al medio en que se desarrollan, por lo que existe una serie de condiciones naturales y artificiales que determinan la población microbiana y, en consecuencia, la producción de biogás. Es importante mencionar que el biogás se origina en condiciones anaeróbicas, por lo que cualquier circunstancia que cambie el proceso a una condición aeróbica, influirá en la creación de biogás [8].

Los factores que afectan la producción de biogás se resumen en la Figura 2.3 [8]. A continuación se describe el efecto de cada uno de los elementos.

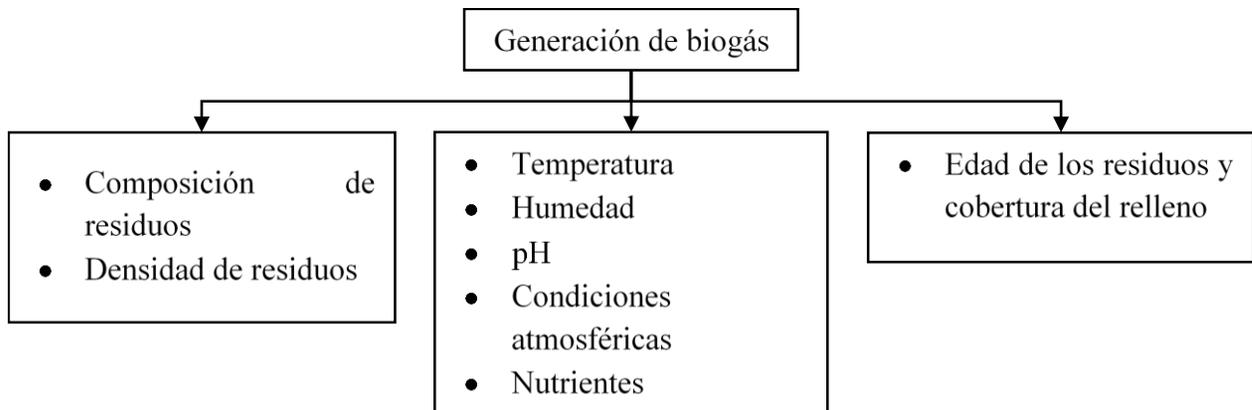


Figura 2.3 Factores que afectan la generación de biogás.

Fuente: Adaptado de [8].

Composición de residuos: Es el factor más importante, pues el máximo potencial de generación de biogás depende del porcentaje de residuos orgánicos sobre el total, además del tipo de desecho orgánico, pues estos son la fuente de producción de biogás.

Densidad de residuos y tamaño de las partículas: Esto afecta el transporte de nutrientes y humedad en el relleno, la presencia de partículas pequeñas favorece el transporte, lo que aumenta la tasa de formación de biogás.

Temperatura: La temperatura de un relleno sanitario es mayor que la ambiental, debido a que ocurren reacciones exotérmicas en su interior. De este modo, influencia el tipo de bacteria que es predominante y, en consecuencia, la tasa de generación de biogás. Se observa que a bajas temperaturas disminuye la tasa, de modo que los rellenos sanitarios poco profundos, al verse su temperatura afectada mucho más por variaciones estacionales, presentan cambios significativos en la tasa de producción de biogás. El rango óptimo para la existencia de bacterias anaeróbicas es de 30°C a 41°C. En rellenos sanitarios con temperaturas bajo los 10°C hay una drástica caída en la actividad de dichas bacterias [5].

Humedad: Esta puede variar mucho en distintas zonas del relleno sanitario. Bajos índices de humedad limitan la descomposición de los residuos y, por lo tanto, restringen la producción de biogás. El contenido óptimo de humedad para la producción de biogás es de 50% a 60%. El contenido de metano del biogás aumenta también con la humedad, sin embargo, altos contenidos

de esta crean problemas con el sistema de captación, inundando las chimeneas. En Chile los RSU tienen un contenido promedio de humedad entre 45% y 55% [5].

pH y nutrientes: La generación de metano en rellenos sanitarios es máxima cuando existen condiciones de pH neutro. El pH tiene un profundo efecto en la actividad biológica, así por ejemplo, un pH bajo 6.0 es considerado perjudicial para las bacterias metanogénicas. El pH óptimo durante la formación de metano es en el rango de 6.5 a 8.0 [8]. El ecosistema anaeróbico necesita de una serie de nutrientes, entre los que destacan el nitrógeno y fósforo, siendo este último el que tiene mayor posibilidad de escasear [5].

Condiciones atmosféricas: Es importante considerar las condiciones atmosféricas, especialmente las precipitaciones. La topografía de la zona es clave, puesto que no son deseables pendientes pronunciadas por el efecto erosional que se produce junto con las lluvias. Las precipitaciones son la mayor fuente de humedad para un relleno sanitario, que además de contribuir a la producción de biogás, favorecen la “impermeabilización” del terreno impidiendo el ingreso de aire por grietas [8].

Cobertura: El recubrimiento diario tiene una serie de efectos en el relleno sanitario, ya que evita el contacto de los desechos con el oxígeno, permitiendo que se consigan condiciones anaeróbicas, además reduce la entrada de aguas lluvias. Que los residuos sean o no cubiertos diariamente determinará el tipo de reacción biológica que tendrá lugar en el relleno sanitario. Una producción óptima requiere condiciones anaeróbicas y, por lo tanto, recubrimiento diario. El espesor debe impedir que la temperatura de la basura se vea afectada por las condiciones meteorológicas y obstaculizar el ingreso del aire [5].

Edad de los residuos: Una vez que las condiciones anaeróbicas se establecen, la generación de biogás es significativa durante 10 a 20 años. Los rellenos sanitarios con varias décadas tienen menos probabilidad de producir grandes cantidades de biogás, pues la mayor parte de las descomposiciones biológicas ya han ocurrido. La producción de biogás no es constante a lo largo del tiempo. Se considera que los gases se emiten en cinco fases secuenciales, que serán descritas en la siguiente sección.

2.6 Fases de la generación del biogás

Se pueden distinguir cinco fases en la generación de biogás:

Fase I, Descomposición aeróbica: Ocurre inmediatamente después del depósito de residuos, mientras haya presencia de oxígeno en el relleno sanitario. La descomposición aeróbica produce dióxido de carbono, agua y calor.

Fase II, Descomposición anóxica, no metanogénica: En esta fase se originan compuestos ácidos y gas hidrógeno, además de sostenerse la producción de dióxido de carbono. También se destruyen grandes moléculas, que forman pequeñas cadenas en las que se incluye amoníaco, dióxido de carbono, hidrógeno y agua. Estas reacciones consumen el oxígeno y nitrógeno residual presente en el relleno sanitario.

Fase III, Anaeróbica Metanogénica inestable: Aquí la creación de dióxido de carbono decrece, porque la descomposición comienza la transición desde una fase aeróbica a una anaeróbica. La

descomposición anaeróbica produce calor, agua y metano. Las bacterias metanogénicas se activan durante este periodo, usando subproductos de la etapa anterior.

Fase IV, Anaeróbica Metanogénica estable: En esta fase el gas metano se produce en concentraciones entre 40% a 70% del volumen total y, generalmente, en forma estable. Es usual que la mayoría de los rellenos sanitarios alcancen la fase metanogénica estable dos años después de posicionados los residuos.

Fase V, Anaeróbica Metanogénica en disminución: Después de convertirse gran parte del material biodegradable en metano y dióxido de carbono durante la fase IV, la humedad sigue migrando a través de los desperdicios y convierte el material orgánico que antes no estaba disponible. Sin embargo, la creación de biogás baja significativamente debido a la escasez de nutrientes y por sustratos disponibles son de degradación lenta.

La duración de cada fase puede variar, los rangos se observan en la Tabla 2.2 ; mientras que en la Figura 2.4 [8] se detalla cómo varía la tasa de generación de biogás a lo largo del tiempo. Por último, se presenta en la Figura 2.5 [9] cómo evoluciona la composición del biogás en cada una de sus etapas.

Tabla 2.2 Duración típica de las fases de generación de biogás en un relleno sanitario.

Fase	Condición	Duración típica
I	Aeróbica	Horas a Semanas
II	Anóxica	1 a 6 Meses
III	Anaeróbica, Metanogénica, inestable	3 Meses a 3 Años
IV	Anaeróbica, Metanogénica, estable	8 a 40 Años
V	Anaeróbica, Metanogénica, en disminución	1 a 40 Años
Total		10 a 80 años

Fuente: Adaptado de [8].

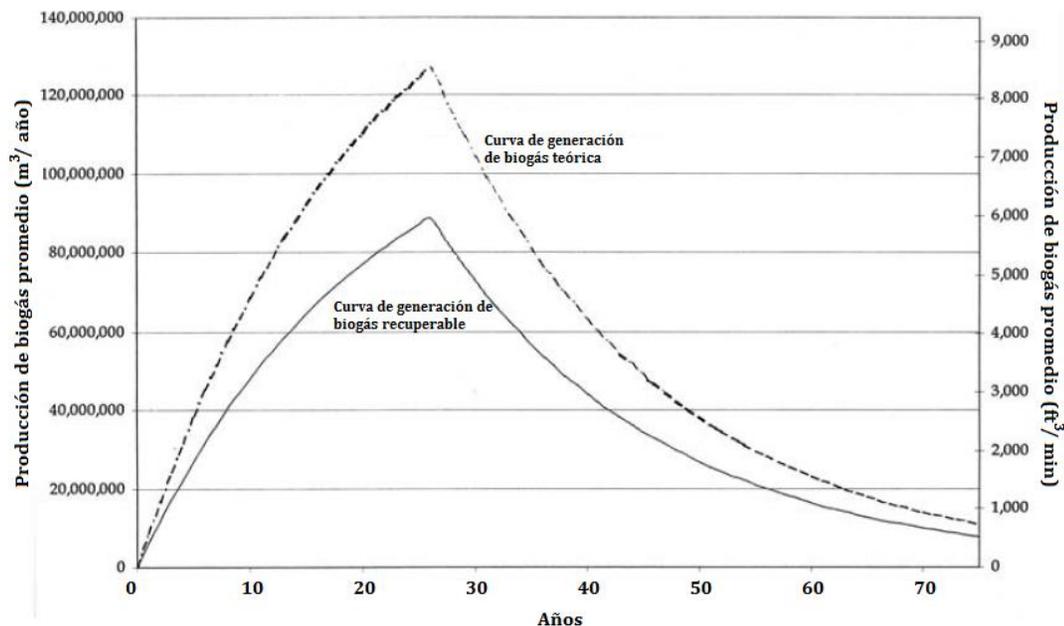


Figura 2.4 Curva de generación de biogás típica.

Fuente: Adaptado de [8].

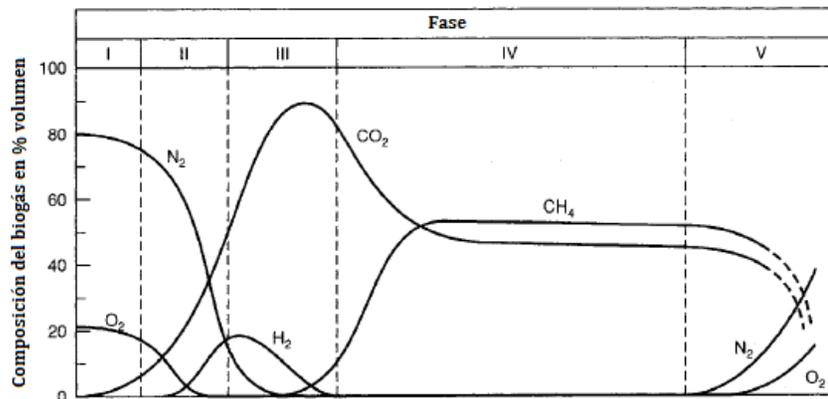


Figura 2.5 Evolución de la composición del biogás en cada fase.
Fuente: Adaptado de [9].

2.7 Propiedades del biogás

Los principales componentes del biogás, presente en rellenos sanitarios, son metano y dióxido de carbono. La existencia de metano, gas combustible, en concentraciones cercanas al 50%, le confiere un poder calorífico considerable al biogás. Los límites de inflamabilidad del metano comprenden entre un 5% a un 15% de concentración en el aire, mientras que para el biogás sus valores normalmente abarcan de un 11% a un 21% [5].

Algunas propiedades físico-químicas del biogás están en la Tabla 2.3. Estas son referidas a un biogás tipo, a una temperatura de 20°C.

Tabla 2.3 Propiedades de una biogás tipo.

Propiedad	Valor
Densidad relativa (c/r al aire)	1,022
Densidad absoluta	1,202 [kg/m ³]
Poder calorífico superior	5500 [kcal/m ³]
Poder calorífico inferior	4700 [kcal/m ³]

Fuente: [5].

2.8 Sistema de extracción de biogás

El esquema típico de un relleno sanitario, con su respectivo sistema de extracción de biogás y una estación de incineración o, eventualmente, de aprovechamiento energético se expone en la Figura 2.6.

Un sistema de extracción puede ser pasivo o activo. Un sistema pasivo drena el biogás al interior de un relleno sanitario mediante la implementación de chimeneas que otorgan un paso de baja pérdida de carga para el biogás, un sistema activo emplea equipos de extracción que generan la diferencia de presión necesaria para evacuar el biogás del interior del relleno sanitario. Para efectos de aprovechamiento energético, se deben considerar sistemas activos, estos sistemas consisten en los siguientes componentes:

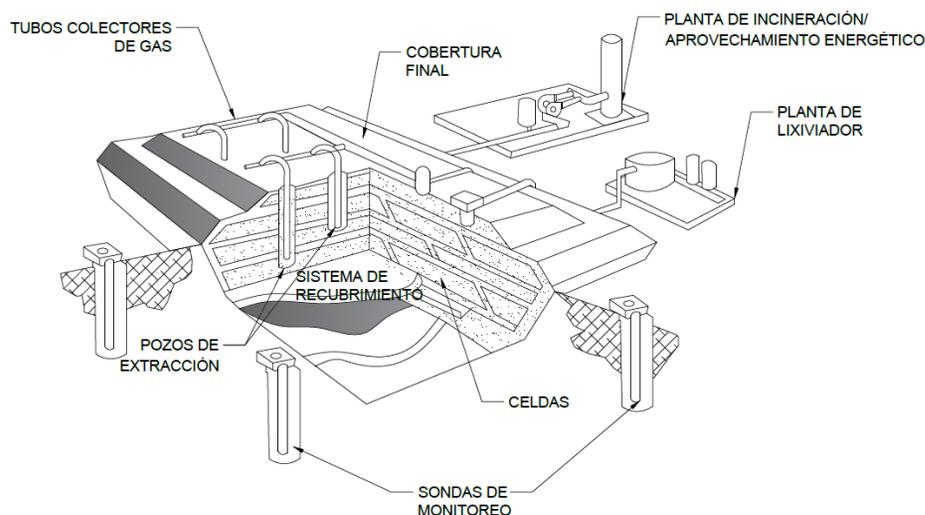


Figura 2.6 Esquema típico de relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia.

- **Pozos de extracción:** Existen pozos con tuberías verticales, horizontales y mixtas, estos pueden construirse junto con el relleno sanitario o realizar excavaciones para una instalación posterior.
- **Cabezal de pozo:** Situado en la parte superior de los pozos de extracción. Permite controlar la extracción de gas. Cumplen funciones como medir caudal de gas de cada pozo, regular el flujo, eliminar el agua, manejo combinado de lixiviados y gas, y constituir un acople telescópico para considerar el movimiento de la superficie del relleno sanitario. El material más utilizado es polietileno (PE).
- **Tuberías colectoras:** Transportan el biogás de los pozos de extracción a la estación de aprovechamiento o incineración. Las tuberías por lo general están hechas de polietileno —de media o alta densidad— o polipropileno, pues estos materiales presentan propiedades óptimas de resistencia mecánica y química. Además el sistema debe contar con puntos de drenaje de agua y poseer un número de válvulas suficientes para aislarlo en secciones [8].
- **Bombeo de extracción:** Con frecuencia se usan compresores o sopladores centrífugos para la extracción del biogás. En el caso de los compresores, hay disponibles en el rango de capacidad de 150 [m³/h] hasta 3000 [m³/h]. Además deben considerarse supresores de llama en caso de auto combustión, con el fin de minimizar el riesgo de una explosión. Adicionalmente hay instrumentación para balancear el flujo extraído de cada pozo.

2.8.1 Pozos de extracción

Un pozo de extracción es, en pocas palabras, el camino que ofrece una menor pérdida de carga para evacuar biogás en forma controlada y evitar la migración accidental.

Los esquemas más comunes en proyectos de captura de biogás son con pozos verticales, los que se instalan en áreas de disposición ya clausuradas. Es ideal una profundidad de residuos de 10 metros al menos [10].

El método menos usado para la captura de biogás es el de colectores horizontales, a veces denominado zanjas. Se instalan en áreas poco profundas y en rellenos sanitarios que aún están en operación. Son una buena alternativa para rellenos con altos niveles de lixiviados, pues evitan la obstrucción de cañerías [10].

Habitualmente, cuando se emplean colectores horizontales, también se usan pozos de extracción vertical, es decir, sistemas mixtos.

Se observa en la Figura 2.7 el esquema con los tipos de pozos de extracción recomendados para sistemas activos. Estos cuentan con tuberías perforadas, montadas en zanjas (como es el caso de los colectores horizontales), rellenos con materiales de distinta granulometría, para así poder evitar la infiltración de aire al relleno y a su vez facilitar la extracción del biogás [11].

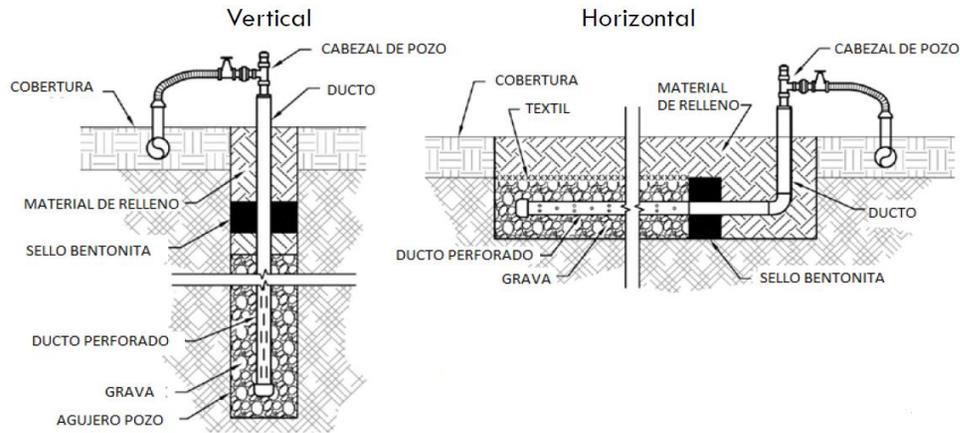


Figura 2.7 Esquemas de pozos de extracción de biogás.

Fuente: Adaptado de [11].

2.8.2 Cabezal de pozo

Los cabezales de pozo permiten monitorear la captura de biogás en los colectores. Poseen manómetros para medir la presión en el cabezal, tubo de pitot o sistemas de placa orificio para medir el caudal de biogás extraído y sensores de temperatura. Además contienen una válvula que regula la succión de biogás.

En la Figura 2.8 se observa un ejemplo de cabezal de pozo de extracción, con sus puertos de monitoreo de temperatura y presión, y la válvula que permite regular la succión de biogás en un pozo de extracción vertical [10].



Figura 2.8 Cabezal de pozo de extracción.

Fuente: [10].

2.8.3 Tuberías colectoras

Dirigen el biogás a una estación de incineración o de aprovechamiento energético. Un sistema de colección común está compuesto por:

- Tuberías de conexión lateral de pequeño diámetro, a partir de los cabezales de los pozos de extracción o colectores [12]. Pueden estar por encima o debajo del nivel del suelo. Se usa en general Polietileno de alta densidad (HDPE) o PVC, este último material solo en caso de tuberías por encima del suelo [10].
- Manifold de distribución que conecta tuberías de conexión lateral con una o más tuberías principales.
- Tubería principal que transporta el biogás a la planta de incineración o aprovechamiento.

Los diámetros de los ductos incrementan su tamaño a medida que se acercan al soplador o compresor del sistema de extracción, para adaptarse al mayor caudal. El sistema debe ser dimensionado para la máxima tasa de producción de biogás [12].

Para eliminar el condensado se usan trampas de condensado o cárcamos de condensado (Estaciones de almacenamiento y bombeo). En las Figura 2.9 y Figura 2.10 se muestran esquemas de una trampa de condensado y cárcamo de condensado respectivamente [10].

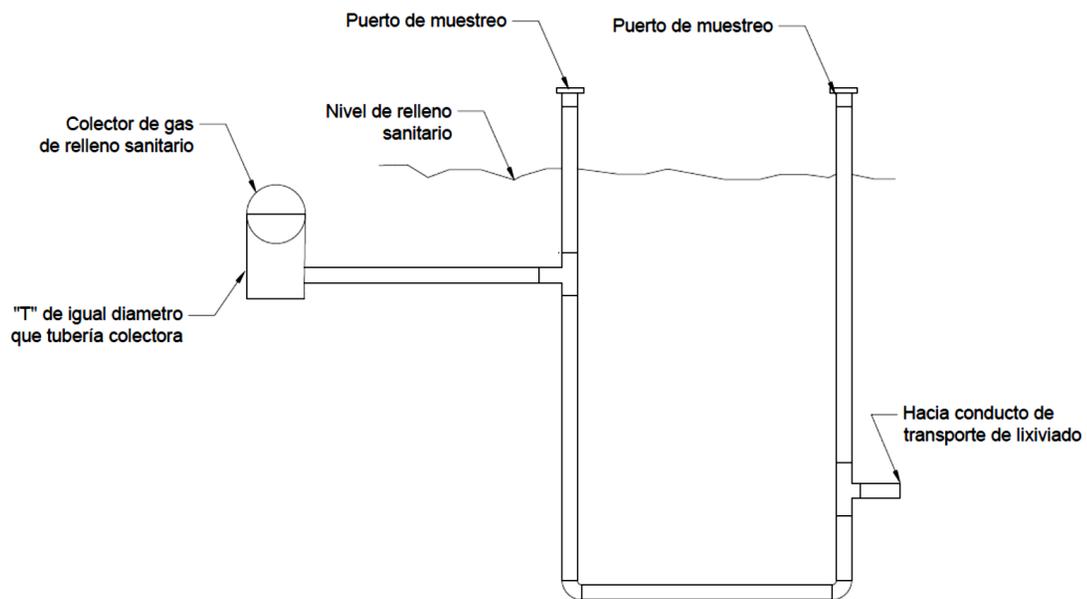


Figura 2.9 Esquema trampa de condensado.

Fuente: Elaboración propia.

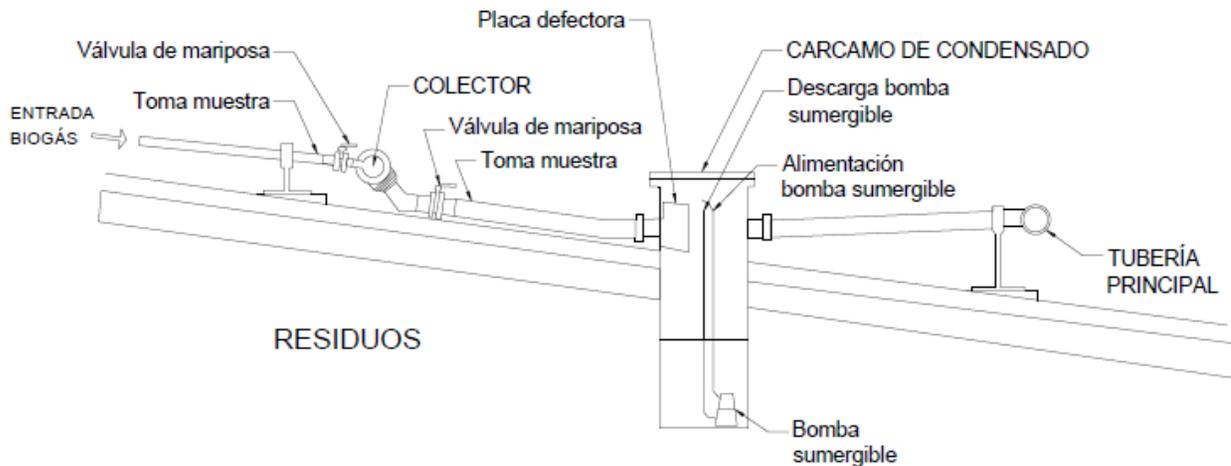


Figura 2.10 Esquema de cárcamo de condensado.

Fuente: Elaboración propia.

2.8.4 Bombeo de extracción

El sistema de bombeo incluye todos los componentes para inducir un vacío que permita la extracción del biogás y suministro de este para su uso final. Debe ser instalado cerca de la estación de aprovechamiento o incineración y debe existir espacio suficiente para expandir el sistema a medida que se requiera [12].

Las dimensiones que pueda tener son una decisión acoplada al sistema de aprovechamiento o incineración del biogás. La selección del equipo adecuado debe considerar la tasa de recuperación de biogás y la eficiencia de colección deseada. A pesar de que la capacidad de un sistema de extracción sea suficiente durante algunos años, este se verá superado con el paso del tiempo, por lo que se puede llegar a expandir el sistema mediante la adición de nuevos sopladores o compresores [12].

Para muchos sistemas de biogás, la elección de un soplador centrífugo de una etapa es adecuado y económico, a causa de sus bajos costos de inversión y operación, y por sus bajos requerimientos de mantenimiento [12].

En algunos casos cuando la necesidad de presión es mayor, se usan compresores de capacidades de 345 [kPa] hacia arriba. Por lo general, se emplean si el uso final de biogás solicita alimentación a alta presión, como por ejemplo un moto-generador de gas. Los compresores son más costosos que los sopladores y requieren mayor mantenimiento [12].

2.9 Modelos de estimación de producción de biogás.

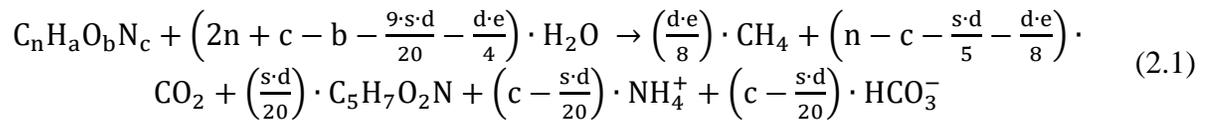
Para evaluar la viabilidad técnica y económica de un proyecto de aprovechamiento del biogás, es necesario estimar el volumen —específicamente de metano—, que es posible recuperar. Rellenos sanitarios con sistemas activos de extracción, proveen de información “histórica” sobre el flujo de biogás y metano de la instalación, sin embargo, no suministran información sobre el potencial futuro. Por los motivos descritos es que existen variados modelos para calcular el potencial de

recuperación de biogás, ya sea para planificar proyectos de aprovechamiento energético o simplemente de incineración.

Algunos modelos se describen a continuación:

2.9.1 Modelo Estequiométrico

Método basado en la reacción química que se produce en los residuos en estado anaeróbico, por lo que determina el potencial máximo de producción de biogás. Requiere conocer la composición química básica de los residuos biodegradables. Uno de estos métodos presenta la reacción que se observa en la Ecuación (2.1).



Donde:

$C_nH_aO_bN_c$:Representa la materia orgánica.

$C_5H_7O_2N$:Representa a las células bacterianas.

e :Fracción de demanda química de oxígeno convertida en biogás.

s : Fracción de la demanda química de oxígeno de los residuos convertida en células.

d :Parámetro de ajuste de coeficientes estequiométrico.

Para la fórmula de representación de la materia orgánica se puede emplear la composición promedio según tipo de residuo, la cual se observa en base seca en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Análisis de composición porcentual de residuos productores de biogás

Tipo de residuo	Composición de cada elemento [%]			
	C	H	O	N
Residuo de comida	45,0	6,4	28,8	3,3
Residuos de jardín	43,0	6,0	41,7	2,2
Madera	50,5	6,0	42,4	0,2
Papeles y cartones	43,2	6,0	44,3	0,3

Fuente: [5].

Además de la Ecuación (2.1), se deben cumplir las Ecuación (2.2) y la Ecuación (2.3):

$$s + e = 1 \quad (2.2)$$

$$d = 4n + a - 2b - 3c \quad (2.3)$$

La fracción de la demanda química de oxígeno de los residuos sinterizados “s” es descrito por la Ecuación (2.4):

$$s = a_0 \cdot \left(\frac{1 + 0,2 \cdot f \cdot T}{1 + f \cdot T} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

a_0 : Coeficiente que depende del sustrato, para proteínas y carbohidratos toma un valor medio de 0,2.

f : Tasa de decaimiento celular, varía entre 0,01 y 0,04 [1/día].

T : Tiempo de retención de los residuos [día].

Realizando el balance, se obtiene una tasa teórica de producción de biogás por unidad de residuo. Para estimar la producción real de biogás, se debe tener en cuenta la humedad total de los residuos, la fracción biodegradable de la materia orgánica y el porcentaje de esta última sobre el total de desechos. Luego la estimación se obtiene de la Ecuación (2.5) [5]:

$$P_{Br} = P_B \cdot M_{org} \cdot B_{mo} \cdot (1 - H_{total}) \quad (2.5)$$

P_{Br} : Producción real de biogás [l/kg].

P_B : Producción de biogás calculada del balance estequiométrico [l/kg].

M_{org} : Porcentaje de materia orgánica contenida en los residuos [%].

B_{mo} : Fracción biodegradable de la materia orgánica.

H_{total} : Humedad total de los residuos.

Para considerar la variación de generación de biogás en el tiempo, se debe tener cuenta la curva de deposición de residuos en el relleno, la vida útil de este y los diferentes grados de biodegradabilidad y vida media de la basura depositada.

Algunos valores referenciales que permiten clasificar los residuos nacionales de acuerdo a rapidez de descomposición se ven en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clasificación de residuos nacionales según rapidez de descomposición.

Clasificación	Porcentaje del total de materia degradable [%]
Elementos de rápida descomposición con un periodo de vida media de un año.	41,8
Elementos de rápida descomposición con un periodo de vida media de dos años.	22,5
Elementos de descomposición moderada con un periodo de vida media de cinco años.	11,4
Elementos de descomposición moderada con un periodo de vida media de quince años.	24,3

Fuente: [5].

2.9.2 Modelo LandGEM

Existen diferentes modelos cinéticos basados en el crecimiento bacteriano. Dada la dificultad de describir todas las variables que influyen en este proceso, es que los modelos existentes son

simplificaciones apoyadas en principios fundamentales, con ajustes empíricos mediante constantes cinéticas.

Un modelo importante de esta categoría es el de LandGEM, el que asume que después de estabilizadas las condiciones anaeróbicas y de masa microbial, la producción de biogás es máxima. Pero a partir de ahí, la tasa decrece junto con la fracción orgánica de los desechos del relleno sanitario. Este modelo es recomendado por la “Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.” (EPA).

El modelo consiste en la Ecuación (2.6):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) (e^{-kt_{ij}}) \quad (2.6)$$

En que:

Q_{CH_4} : Cantidad de gas metano generada en el año t [m³/año].

L_0 : Potencial de generación de metano [m³/ton].

M_i : Cantidad de residuos promedios depositadas al año i [ton/año].

k : Tasa anual de generación de metano [1/año].

n : Año de cálculo-año inicial de disposición de residuos.

t_{ij} : Edad de la "j" sección de los residuos depositados en año "i" [año].

c : Tiempo que lleva el relleno sanitario sin recibir residuos [año]. En rellenos en operación $c=0$.

El potencial de generación de metano (L_0) es una función casi exclusiva de la composición de los residuos. Su valor se estima en base al contenido de carbono del desecho, la fracción de carbono biodegradable y un factor de conversión estequiométrico. Si se tiene información del sitio, se puede estimar el valor de L_0 empleando la Ecuación (2.7) de la metodología de IPCC [13].

$$L_0 = 1000 \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (2.7)$$

Donde:

L_0 : Potencial de generación de metano [m³/ton].

MCF: Factor de corrección de metano.

DOC: Factor de ajuste de la composición de los residuos.

DOC_F : Factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás.

F: Fracción de metano contenido en biogás, su asume típicamente 0,5.

El factor $\frac{16}{12}$ corresponde a la constante estequiométrica.

MCF depende de la profundidad y el tipo de relleno sanitario, los valores estimados se observan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Tabla estimación de factor de corrección de metano.

Manejo del sitio	Profundidad <5 [m]	Profundidad ≥ 5 [m]
Sin manejo	0,4	0,8
Con manejo	0,8	1,0
Semi-aeróbico	0,4	0,5
Condición desconocida	0,4	0,8

Fuente: [13].

DOC depende la composición de los residuos orgánicos, los que son divididos en 4 categorías. Se calcula mediante la Ecuación (2.8).

$$DOC = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,3 \cdot D \quad (2.8)$$

Donde:

A: Porcentaje de residuos que corresponden a papel, cartón y textiles.

B: Porcentaje de residuos que corresponde a desechos de jardín u orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos).

C: Porcentaje de residuos que corresponden a desechos de alimentos.

D: Porcentaje de residuos que corresponden a madera y paja.

DOC_F representa la porción de materia orgánica que es convertida en biogás, su cálculo está basado en un modelo teórico que varía solo con la temperatura en la zona anaeróbica del relleno sanitario, el cual se observa en la Ecuación (2.9). El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de 0,77.

$$DOC_F = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (2.9)$$

Donde:

T: Temperatura [°C].

La tasa anual de generación de metano (k) depende de parámetros específicos del lugar en que se encuentra el relleno sanitario, como por ejemplo: contenido de humedad, temperatura, potencial de óxido reducción, pH, densidad y tamaño de las partículas del relleno. Aunque se sabe cuáles parámetros impactan la tasa anual de generación de metano, no existe una relación matemática entre estos [14].

Hay 4 formas tradicionales para determina el valor de “k” para un relleno sanitario [14]:

- Comparando con otros rellenos sanitarios de condiciones similares cuyos valores de k son conocidos,
- Usando la información del flujo de gas de un sistema de extracción y las condiciones específicas de residuos para estimar k.
- Estimar k en base a información histórica de las emisiones de un relleno sanitario.
- Instalar una chimenea de extracción y usar el método USEPA 2E.

Se identifican cuatro factores clave de mayor impacto en “k” que son: la precipitación media anual, temperatura promedio diaria, fracción biodegradable de los residuos y la profundidad del relleno sanitario [14].

Cuando la incertidumbre se debe a falta de conocimiento o imprecisión en los datos de entrada de un modelo, en los que ninguno de estos es una variable aleatoria, la aplicación de evaluación con lógica difusa es considerada apropiada para realizar el análisis [14].

En el Anexo A se presenta un modelo de evaluación con lógica difusa, para estimar “k” a partir de los cuatro parámetros clave mencionados antes.

2.10 Tecnologías de utilización de biogás de relleno sanitario

El objetivo de un proyecto de aprovechamiento energético de biogás de relleno sanitario es convertir el biogás en energía útil. Las formas de emplearlo se adaptan a cada relleno por su distinto tamaño. Destacan entre los usos los siguientes tipos de proyectos [15]:

- Proyectos de generación de electricidad y cogeneración
- Proyectos de uso directo como gas de medio-Btu en calderas, secadores, hornos u otros equipos térmicos.
- Proyectos de conversión de biogás a un gas de alto-Btu asimilable a gas natural para comercializarlo como combustible en gas de cañería, CNG o LNG.

Los primeros proyectos energéticos con biogás en Chile fueron en Santiago, y se asemejan bastante con esta última opción. En el año 1999, en Santiago, se recuperaba un promedio mensual de 4.000.000 [m³] de biogás de un poder calorífico superior del orden de 5000 [kcal/m³], el que era mezclado directamente con gas de nafta, en una proporción inicial de 30% biogás y 70% gas de nafta, agregándosele un 10% adicional de biogás previamente sometido a un proceso de craking catalítico. La mezcla final era distribuida por la red de tuberías de la ciudad para consumo doméstico e industrial [7].

En la Tabla 2.7 se observan diversas alternativas tecnológicas de aprovechamiento energético de acuerdo a los flujos de biogás requeridos.

Para usar el biogás es necesario darle un tratamiento, con el fin de extraer la humedad y el material particulado. Esto se conoce como tratamiento primario.

En algunas aplicaciones se requiere la remoción de compuestos sulfurados y siloxanos, ya que aumentan los efectos de la corrosión y erosión, respectivamente. A este proceso se le conoce como tratamiento secundario.

Dependiendo del nivel de tratamiento al que se ha sometido el biogás, se clasifica en:

- **Grado bajo de energía:** Tratamientos primarios de remoción de condensado, disminución de la humedad y filtración de partículas.
- **Medio grado de energía:** Tratamientos secundarios, que incluyen compresión y refrigeración para deshidratar el biogás; y tratamiento químicos de para remoción de componentes trazas como sulfuros, siloxanos y compuestos orgánicos volátiles
- **Alto grado de energía:** Tratamientos de separación del dióxido de carbono y otros gases, del gas metano. Además de los tratamientos secundarios para remover impurezas, comprimir y deshidratar el biogás.

Tabla 2.7 Alternativas tecnológicas de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario.

Tecnología	Flujo de biogás (con 50% de metano aproximadamente)
Electricidad	
Motores de combustión interna (800 kW a 3MW por motor)	300 a 1.100 [ft ³ /min]; Múltiples motores pueden ser combinados para grandes proyectos.
Turbina a gas (1 a 10 MW por turbina)	Exceder como mínimo 1.300 [ft ³ /min]; típicamente sobre 4.000 [ft ³ /min].
Micro turbina (30 a 250 kW por turbina)	20 a 200 [ft ³ /min].
Uso directo como gas de medio-Btu	
Calderas, secadores y calentadores de proceso.	Proyectos en que se utilice todo el biogás disponible.
Calefactores infrarrojos de gas	Pequeñas cantidades de gas, tan bajo como 20 [ft ³ /min].
Invernaderos	Pequeñas cantidades de gas.
Evaporación de lixiviados	Se requiere de 300 [m ³] para tratar 1 m ³ de lixiviado.
Uso directo como gas de alto-Btu	
Gas de cañería	600 [ft ³ /min] o más, basado en proyectos operativos actualmente en Estados Unidos.
CNG o LNG	Depende de las condiciones específicas del proyecto.

Fuente: Adaptado de [15].

Las potenciales aplicaciones del biogás dependen del nivel de tratamiento y esto se observa en la Figura 2.11.

En la Tabla 2.8 se detallan el número de instalaciones a lo largo del mundo, clasificándolas según el tipo de tecnología de aprovechamiento.

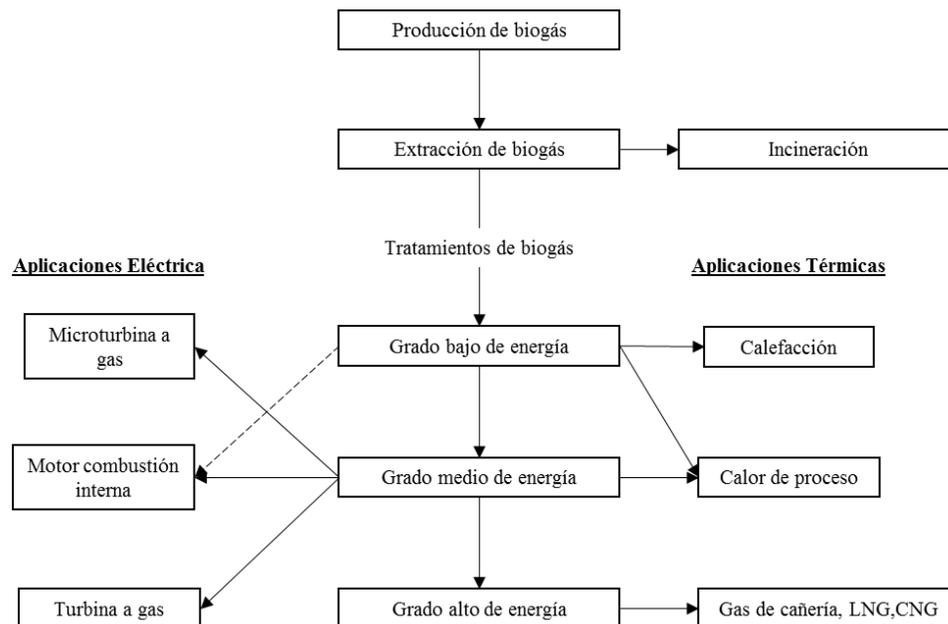


Figura 2.11 Usos del biogás según tratamientos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.8 Número de instalaciones de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario en el mundo (Año 2003).

Tipo de instalación	Número
Motor a gas	581
Uso directo en calor	277
Cogeneración	187
Turbinas a gas	39
Evaporación de lixiviado	17
Hornos	14
Comercialización de gas alto BTU	13
Turbina de vapor	11
Ciclo combinado	7
Microturbinas	4
Combustible para automóviles	2
Celdas de combustible	1

Fuente: [16].

Algunos valores referenciales de costos de inversión, operación y mantenimiento para distintos tipos de instalaciones se presentan en la Tabla 2.9 y Tabla 2.10.

Tabla 2.9 Costos estimados de inversión.

Tipo de instalación	Costo (US\$)
Motor a gas	1.100 a 1700/KWe instalados
Turbina a gas	1.000/KWe instalado
Microturbina	3.000 a 5.000/KWe instalado
Comercialización de gas alto BTU	1.800 a 4.000/m ³ de biogás por día
Uso directo en equipos térmicos	20 a 40/KWt instalados
Calderas/generadores de vapor	30 a 50/kWt instalados
Evaporación de lixiviado	7.000 a 10.000/m ³ de lixiviado por día

Fuente: [16].

Tabla 2.10 Costos estimados de operación y mantenimiento.

Tipo de instalación	Costos de operación y mantenimiento anuales
Planta de biogás con antorchas	4% a 8% del costo de inversión
Planta de biogás con producción eléctrica	10% a 12% del costo de inversión
Planta con Evaporación de lixiviado	4 US\$ a 10 US\$ / m ³ de lixiviado evaporado
Planta de tratamiento de biogás a gas de alto BTU	17% a 21% del costo de inversión

Fuente: [16].

2.10.1 Generación de electricidad

Las principales tecnologías para generación eléctrica disponibles en el mercado son:

Motores de combustión interna: Usado en rellenos sanitarios con caudales de biogás entre 0,4 [MMft³/día] a 1,6 [MMft³/día] con 50% de metano. Algunas capacidades representativas de motores comerciales son [15]:

- 204 [ft³/min] → 540 [kW]
- 234 [ft³/min] → 633 [kW]
- 350 [ft³/min] → 800 [kW]
- 500 [ft³/min] → 1200 [kW]

Los motores logran eficiencias eléctricas de 30% a 40%, para mejores rendimientos se emplean aplicaciones de cogeneración [15].

Dependiendo el motor puede requerirse tratamiento secundario o no.

Turbinas a gas: Son usadas en rellenos sanitarios con flujos mayores a 2 [MMft³/día]. Presentan grandes economías de escala, por lo que se emplean en grandes proyectos. En promedio las turbinas a gas tienen eficiencias entre 20% a 28% en plena carga (a media carga la eficiencia disminuye). En ciclos combinados se puede alcanzar eficiencias del orden de 40% [15].

Son más resistentes a la corrosión y tienen menores emisiones de NO_x que los motores, además son más compactos y sus costos de operación y mantenimiento son menores, sin embargo, exigen más tratamientos previos al biogás [15].

La principal desventaja radica en las altas presiones de trabajo que tiene una turbina a gas, siendo de 165 [psi] o mayor para operar, por lo que necesitan compresores, lo que involucra un incremento de consumo eléctrico importante [15].

Microturbinas: Están disponibles comercialmente para aplicaciones de biogás desde el año 2001. Desde el año 2001 al 2015 se han creado 26 instalaciones en Estados Unidos. En general, su valor de inversión por unidad de potencia instalada [\$/kW] es mayor que los motores, pero posee las siguientes ventajas con respecto a ellos [15]:

- Operan con menores caudales de biogás.
- Pueden operar con biogás de bajo poder calorífico (35% metano).
- Producen menos NO_x.
- Se puede agregar o quitar unidades frente a cambios en la tasa de generación de biogás, pues su interconexión es sencilla.

Para estas unidades, en general aplica un tratamiento secundario al biogás.

En la Figura 2.11 se detallan los rangos típicos para seleccionar alternativas de generación eléctrica, de acuerdo a la escala del proyecto. Se mencionan como opciones adicionales, el uso de turbinas de vapor y ciclos combinados, sin embargo, estas requieren proyectos de gran escala, y como se constata en la Tabla 2.8, existen muy pocos con este tipo de tecnología, en comparación con los que usan motores de combustión interna.

Tabla 2.11 Rangos típicos de flujos, potencias y eficiencias de tecnologías de generación eléctrica.

Tecnología	Rango típico de flujo [ft³/min]	Tamaño preferido de planta [kW]	Eficiencia de conversión eléctrica [%]
Microturbinas	<100	<100	25 a 30
Motores de combustión interna	>150 a 5.000	0,5 a 12	32 a 40
Turbina de gas	>4.000 a 2.000	3 a 18	26 a 32
Turbinas de vapor	>6.000 a 25.000	10 a 50	24 a 29
Ciclo combinado	>5000 a 25.000	>10	38 a 45

Fuente: [17].

2.10.2 Uso directo como gas de medio-BTU

Estos proyectos consisten en crear ductos de transporte de biogás, así se conectan con alguna fábrica cercana que requiera combustible para usarlo en aplicaciones térmicas, ya sea en equipos de secado, calderas, hornos, etc. En general, a los equipos de combustión de gas natural u otro combustible, se les debe realizar modificaciones para que puedan operar con biogás [15]. Almacenar el biogás no es económicamente viable, por lo que la curva de producción de este debe ser compatible con la demanda del consumidor, para así aprovechar todo el gas disponible [15].

Los costos de adaptación de los equipos varían, pudiendo ser mínimos en caso de solo requerir “re-sintorizar” un equipo térmico para operar con un combustible de menor poder calorífico. Otros casos requieren intervenciones mayores, como el de las calderas, donde se implementan sistemas que usan combustibles auxiliares o intercambiables con biogás. También es el caso de calderas con stock o superávit de vapor, para que puedan amortiguar las variaciones del flujo de este [15].

Algunos valores referenciales se observan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Valores referenciales de vapor potencial según capacidad del Relleno sanitario

Tamaño Relleno Sanitario [ton]	Flujo anual biogás [MMBtu/año]	Vapor potencial [lbs/h]
1.000.000	100.000	10.000
5.000.000	450.000	45.000
10.000.000	850.000	85.000

Fuente: [15].

Otra alternativa de uso directo de biogás como combustible de medio-BTU es en la evaporación de lixiviados, existiendo evaporadores con capacidades para tratar hasta 10.000 a 30.000 galones por día de lixiviado, con costos de inversión de 3.000.000 [USD] a 500.000 [USD].

2.10.3 Uso directo como gas de alto-Btu

Para el uso directo del biogás como un combustible asimilable al gas natural, además de los tratamientos primarios y secundarios, se requiere un proceso de remoción de CO₂. Los proyectos de transformación de biogás a gas de alto-BTU son escasos aún.

2.11 Casos exitosos de aprovechamiento energético en Chile

De los proyectos de rellenos sanitarios que han optado por la instalación de sistemas activos de extracción de biogás, la mayoría lo emplea simplemente en combustión en antorcha. Algunos casos emblemáticos de aprovechamiento energético se han desarrollado en la Región Metropolitana, y corresponden a los rellenos de Loma los Colorados y Santa Marta.

2.11.1 Relleno sanitario Loma los Colorados

Loma los Colorados se encuentra a 63 kilómetros al norte de Santiago, y es el relleno más grande de Chile, recibiendo el 64% del total de desperdicios generados en la Región Metropolitana. Su capacidad es de 100 millones de toneladas. La producción de biogás para el año 2010 era de 8.000 [m³/h] con 48% de metano.

El proyecto energético de este relleno sanitario se registra como Mecanismo de desarrollo limpio (MDL) en 2007, y corresponde al acuerdo suscrito en el Protocolo de Kioto para que las empresas puedan cumplir con metas de reducción de gases de efecto invernadero. El año 2009 inicia la fase 1 del proyecto de aprovechamiento energético, que consiste en la generación eléctrica e inyección al sistema interconectado central (SIC), con una potencia de 2 [MW]. Actualmente está en desarrollo la fase 2, que consiste en la adición 9.9 [MW]. El proyecto termina con una fase 3 que consiste en 21.78 [MW] adicionales.

La tecnología empleada son motores a combustión interna de 1 [MWe] a 2 [MWe], y en su capacidad máxima se espera la instalación de 28 motores. La conexión al SIC se realiza mediante una línea de transmisión de 25 [km]. Para la extracción del biogás se utilizan 14 sopladores centrífugos multietapas, y se transporta el biogás en ductos de 16 pulgadas de diámetro. Se considera un sistema de limpieza y filtrado para tratar material particulado, sulfuro de hidrogeno, siloxanos y humedad. El sistema de extracción tiene una capacidad de 10.000 [m³/h] de biogás y cuenta con igual capacidad para incinerar con antorchas. La inversión total estimada para la fase 1 es de 3.000.000 [US\$], y el total para las 3 fases restantes del proyecto se calcula en 40.000.000 [US\$].

2.11.2 Relleno sanitario Santa Marta

El relleno sanitario Santa Marta se encuentra a sur de Santiago, en la comuna de Talagante, este recibe más de 50.000 [ton/mes] de residuos domiciliarios del sur de la región metropolitana. Desde el 2013 está en operación una central de generación eléctrica con capacidad de recibir 8.000 [m³/h] de biogás recuperado del relleno sanitario. El proyecto consta de una instalación de tratamiento y acondicionamiento del biogás, y una central de generación formada por 8 motores de combustión interna, capaces de generar 14 [MWe], y ampliable a 20 [MW] en su periodo de mayor producción de biogás. La energía eléctrica es inyectada al SIC mediante una línea de transmisión aérea de 840 [m] y 4.400 [m] de tendido de cable subterráneo. El monto de inversión de este proyecto se estima en 36.000.000 [US\$].

3 Metodología

La metodología empleada en este trabajo de título se resume en el diagrama de la Figura 3.1.

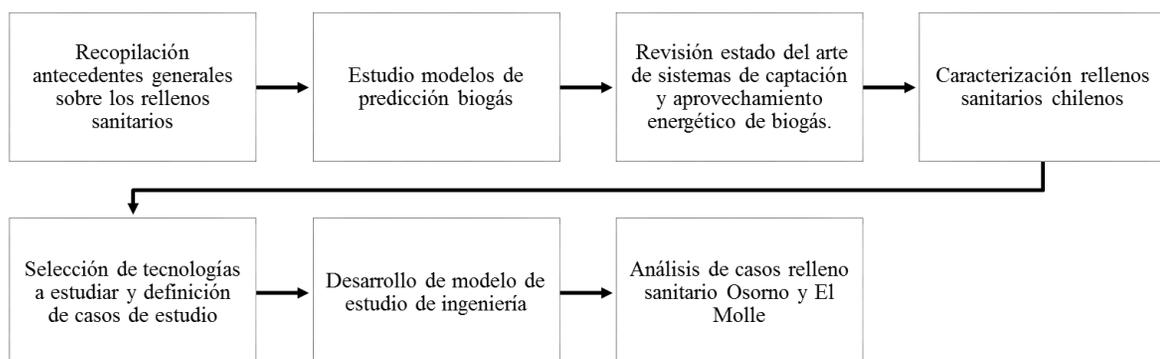


Figura 3.1 Metodología para el desarrollo del trabajo de título.

Fuente: Elaboración propia.

La descripción de cada una de las etapas de la metodología es descrita a continuación.

3.1 Recopilación de antecedentes generales de un relleno sanitario

Se inicia con la comprensión de los principios básicos de diseño y operación de las instalaciones sanitarias, para identificar los elementos que determinan y afectan el diseño del sistema de extracción. Además se estudian los factores que condicionan la producción de biogás en rellenos sanitarios, para así comprender mejor los fundamentos de los modelos de predicción de emisiones de biogás.

3.2 Estudio de modelos de predicción de biogás

Se estudian e implementan los modelos de predicción de biogás, identificando metodologías complementarias para adaptarlos a las condiciones y características de los rellenos sanitarios nacionales.

3.3 Revisión del estado del Arte

Se evalúan las tecnologías disponibles para la captación y aprovechamiento energético de biogás de relleno sanitario, mediante la revisión bibliográfica a través de libros, publicaciones científicas, manuales, guías técnicas e información de proyectos en Chile y en el mundo.

Mediante esta revisión se propone disponer de los antecedentes para escoger un grupo de cuatro tecnologías apropiadas a la realidad chilena, tanto desde la perspectiva de la factibilidad técnica como económica.

3.4 Caracterización de los rellenos sanitarios Chilenos

Se recopila información de una muestra de proyectos realizados en Chile, para caracterizar el estado actual de los rellenos sanitarios nacionales y sus condiciones, las que permitirían cuantificar su

potencial energético y analizar las alternativas de su utilización. La información reunida estará integrada por datos de acceso público disponibles en declaraciones y estudios de impacto ambiental de proyectos. El estudio se complementa con la revisión de casos exitosos de aprovechamiento energético en Chile.

3.5 Selección de tecnologías y casos de estudio

Se escoge un grupo de tecnologías con méritos técnicos y económicos, que sean potencialmente aplicables en Chile, con objetivo de proponer modelos de negocio en base a una definición de casos de estudio. La principal variable para la selección de tecnología apropiada serán las estimaciones de la producción de biogás, pero se considerarán además los siguientes criterios:

- Madurez de la tecnología.
- Idoneidad según tamaño de rellenos sanitarios en Chile y su producción de biogás.
- Experiencia mundial, capacidad instalada según tipo de tecnología.
- Costos de inversión, operación y mantenimiento.

Se definen máximo cuatro tecnologías para elegir y a partir de dicha selección se establecen casos de estudio de producción energética para usos potenciales en Chile

3.6 Desarrollo del modelo de estudio

Desarrollo del modelo de estudio de ingeniería a nivel de ingeniería conceptual, incluyendo metodología de diseño para el sistema de extracción de biogás y de las alternativas tecnológicas escogidas. Se incluyen las obras de captación, tratamiento y aprovechamiento energético. El desarrollo es el siguiente:

- a) Identificación de factores claves en el diseño de la instalación.
- b) Elección y adaptación de modelo de estimación de producción de biogás.
- c) Implementación de Modelo de producción de biogás.
- d) Establecimiento de criterios básicos de diseño para sistema de captación de biogás.
- e) Descripción de principales componentes de los sistemas de aprovechamiento energético y tratamientos previos requeridos.
- f) Estimación de principales obras y costos de inversión requeridos.
- g) Estimación de costos de operación y mantenimiento.
- h) Estudio de factibilidad económica.

3.7 Análisis de casos

Para validar el modelo de estudio se realizará el análisis de los casos propuestos, con información disponible de los rellenos sanitarios de El Molle y Osorno. El Molle comenzó recientemente a operar, mientras que Osorno está en etapa de ejecución de obras.

4 Caracterización de rellenos sanitarios nacionales y sus condiciones

Para efectuar el diseño de un sistema de captación, es necesario conocer preliminarmente algunas características generales de un relleno sanitario, como por ejemplo, su diseño geométrico y la tasa de generación de biogás. Ambas cualidades dependen de la capacidad del relleno sanitario, el tipo y cantidad de residuos que recibe y las condiciones climáticas de la zona donde se emplaza.

La selección de la tecnología de aprovechamiento energético apropiada y el dimensionamiento de los equipos, dependerá de la tasa de generación de biogás y la eficiencia del sistema de captación. Para identificar cuáles son técnicamente factibles en Chile, se recopila la siguiente información de algunos rellenos sanitarios nacionales:

- Método constructivo (Área, Zanja o Mixto).
- Capacidad del relleno sanitario.
- Tasa de recepción de residuos estimada.

Por otro lado, para especificar las condiciones en que operan los rellenos, se caracterizan las zonas de emplazamiento a partir de:

- Composición de los residuos promedio.
- Precipitaciones anuales promedio.
- Temperatura diaria promedio.

Con la información anterior, se estiman la proyección de biogás de los rellenos sanitario y su potencial energético, para así poder escoger cuatro tecnologías de aprovechamiento energético técnicamente factibles para un subconjunto de rellenos sanitarios chilenos. Esta información es la base para el desarrollo de la metodología de diseño de los sistemas de aprovechamiento energético.

4.1 Caracterización de rellenos sanitarios

A partir de la información publicada en los estudios o declaraciones de impacto ambiental de los proyectos de relleno sanitario en Chile se elabora la Tabla 4.1 en que se estiman la capacidad de los rellenos sanitarios.

En la Tabla 4.1 se asume crecimiento lineal de producción de residuos, una densidad promedio de los residuos compactados de 0.9 [ton/m³] y un 15% de volumen adicional para material de cobertura.

Tabla 4.1 Valores estimados de capacidad de rellenos sanitarios en Chile.

Región	Relleno Sanitario	Tipo de relleno	Vida útil [años]	Recolección de residuos año base [ton/año]	Recolección de residuos año final [ton/año]	Capacidad de residuos Relleno Sanitario [ton]	Volumen total Relleno sanitario [m3]
I	Huara	Zanja	10	26	648	3.367	4.302
	Pica	Mixto	16	1.226	2.633	30.879	39.457
	Pozo Almonte	Zanja	30	1.708	5.589	109.451	139.854
II	Mejillones	Área	25	3.366	10.337	171.292	218.873
	Quebrada Ancha	Área	25	10.861	13.959	310.250	396.430
III	Copiapó	Mixto	20	115.467	204.548	3.200.150	4.089.081
	Caldera	Zanja	20	15.426	23.197	386.230	493.516
IV	Punta Colorada	Mixto	20	1.533	2.546	40.789	52.119
	Panul	Mixto	13	158.600	288.600	2.906.800	3.714.244
V	El Molle	Área	20	239.000	350.000	5.890.000	7.526.111
RM	Santiago Poniente	Área	22	540.000	1.464.000	22.044.000	23.221.085
	Santa Marta	Área	20	756.000	1.236.376	19.923.760	25.458.138
VI	Las Quilas	Zanja	15	2.364	2.855	39.144	50.017
VII	El Retamo	Área	39	112.000	160.000	5.304.000	6.777.333
VIII	Los Ángeles	Área	37	38.572	100.915	2.580.514	3.297.323
IX	Freire	Zanja	50	5.475	9.125	365.000	466.389
XIV	Los Ríos	Mixto	20	112.221	129.828	2.420.494	3.092.854
X	Osorno	Mixto	20	72.202	102.822	1.750.239	2.236.416

Fuente: Elaboración propia a partir de información de [18] a la [36].

4.2 Caracterización de los residuos

La composición de los residuos es un aspecto clave para determinar la cantidad de metano que generará un relleno sanitario. El porcentaje de cada tipo de materia orgánica establece la velocidad de degradación, que determina a su vez la tasa de generación de metano y curva de generación de biogás en el tiempo.

Existen variaciones en la composición de los residuos que recibe cada relleno sanitario, sin embargo, no se dispone de datos exactos para cada caso. Debido a lo anterior, se asume que la composición de los residuos de cada relleno sanitario será la composición de los datos disponibles de la localidad más cercana, como se indica en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Lista de localidades para estimar composición de residuos domiciliarios.

Región	Relleno Sanitario	Localidad asumida para estimar composición de recursos
I	Huara	Arica
	Pica	Arica
	Pozo Almonte	Arica
II	Mejillones	Antofagasta
	Quebrada Ancha	Antofagasta
III	Copiapó	Serena
	Caldera	Serena
IV	Punta Colorada	Serena
	Panul	Serena
V	El Molle	Valparaíso
RM	Santiago Poniente	Santiago
	Santa Marta	Santiago
VI	Las Quilas	Pichilemu
VII	El Retamo	Talca
VIII	Los Ángeles	Los Ángeles
IX	Freire	Los Ángeles
XIV	Los Ríos	Valdivia
X	Osorno	Puerto Montt

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.3 se presenta la aproximación de la composición de los residuos.

Tabla 4.3 Estimación de la composición promedio de los residuos según localidad.

	Arica	Antofagasta	Serena	Valparaíso	Santiago
Componentes orgánicos totales [% peso]	78,9%	60,6%	77,6%	79,5%	75,3%
Desechos de jardín u orgánicos putrescibles	7,1%	38,4% (*)	67,1% (*)	58,0% (*)	8,9%
Desechos de alimentos	61,3%				42,1%
Madera y paja	0,5%				S/INF
Papel, cartón y textiles	10,0%	22,2%	10,5%	21,5%	21,0%
	Pichilemu	Talca	Los Ángeles	Valdivia	Pto. Montt
Componentes orgánicos totales [% peso]	57,8%	76,7%	74,0%	63,5%	65,1%
Desechos de jardín u orgánicos putrescibles	48,6% (*)	58,6% (*)	61,0% (*)	2,0%	57,8% (*)
Desechos de alimentos				58,7%	
Madera y paja	0,3%	2,5%	S/INF	2,5%	S/INF
Papel, cartón y textiles	8,9%	15,6%	13,0%	15,6%	7,3%

S/INF: Sin información

(*) Información de composición para 2 o más categorías de residuos agrupadas

Fuente: Elaboración propia a partir de información de [18] a la [36].

4.3 Condiciones climáticas

Un aspecto clave que afecta la producción de biogás, son las condiciones de humedad y temperatura. El rango de temperatura óptimo para su generación es de 30°C a 41°C, bajo 10°C decae drásticamente la tasa de generación. El contenido de humedad óptimo para su creación es de 50% a 60%. Índices de humedad menores al 20% paralizan las reacciones de producción de metano. Como consecuencia de esto, es importante considerar los factores climáticos en los que se emplaza un relleno sanitario, siendo las temperaturas y precipitaciones promedio anuales los principales aspectos de interés.

En la Figura 4.1 se muestra el promedio de temperatura y precipitaciones por región, respectivo a cada estación meteorológica de los últimos seis años.

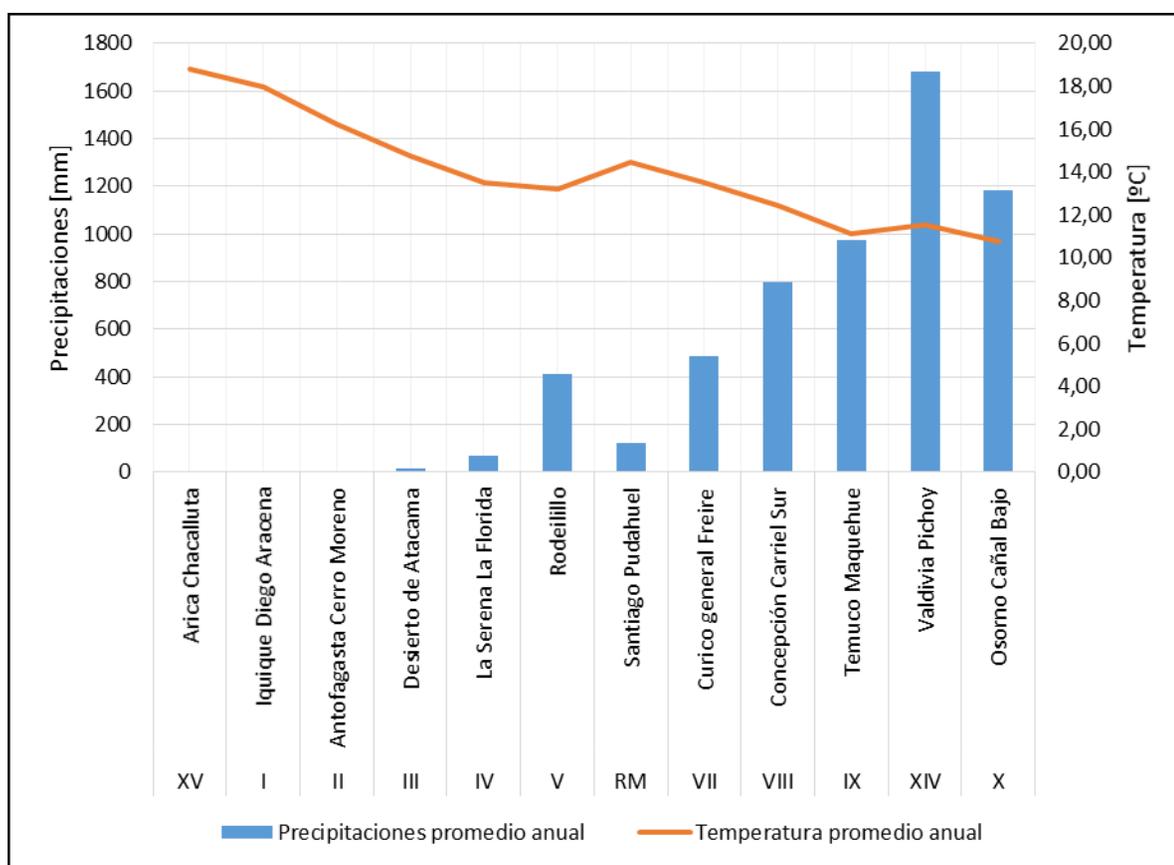


Figura 4.1 Temperaturas y precipitaciones promedio anuales por región.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de anuarios climatológicos de la dirección meteorológica de Chile

4.4 Estimación de generación de biogás de rellenos sanitarios nacionales

Para cada relleno sanitario se asignan el valor de k y L_0 . Con ambas constantes calculadas, se emplea el modelo LandGEM para estimar la producción de metano. Los resultados se observan en la Tabla 4.4. Para determinar L_0 se utiliza la metodología IPCC. Para obtener resultados conservadores de la producción de biogás, se aproxima la generación de este hacia valores

inferiores, tomando en cuenta las siguientes consideraciones en los cálculos en caso de falta de información:

- Cuando se desconoce la fracción de la composición porcentual de algún tipo de residuos orgánico, se considera su aporte nulo.
- Cuando no se tiene información desglosada de cada tipo de materia orgánica, pero sí se conoce su fracción total en conjunto, se asume que dicha fracción corresponde al tipo de residuo que aporta menos en la producción de biogás.

Para estimar la constante k se utiliza un modelo de evaluación difusa expuesto en el Anexo A.

Tabla 4.4 Estimación de generación de metano rellenos sanitarios nacionales.

Región	Relleno sanitario	L ₀ [m ³ /ton]	k [1/año]	Max. Generación de metano [dam ³ /año]	Promedio generación de metano [ft ³ /min] ^(*)	Razón capacidad/generación máxima [dam ³ /año/ton]	Potencia térmica equivalente promedio [kW]
I	Huara	45,74	0,024	3	0,1	0,0010	2
	Pica	45,74	0,024	29	1,5	0,0009	25
	Pozo Almonte	45,74	0,024	91	5,1	0,0008	86
II	Mejillones	45,80	0,024	149	8,1	0,0009	137
	Quebrada Ancha	67,91	0,026	409	23,2	0,0013	393
III	Copiapó	62,98	0,026	4.194	224,9	0,0013	3.806
	Caldera	62,98	0,026	503	27,2	0,0013	460
IV	Punta Colorada	60,98	0,024	48	2,6	0,0012	44
	Panul	63,11	0,024	3.848	186,6	0,0013	3.158
V	El Molle	77,1	0,026	10.655	584,5	0,0017	9.889
RM	Santiago Poniente	77,62	0,026	28.926	1564,7	0,0016	26.479
	Santa Marta	77,62	0,026	32.080	1728,5	0,0016	29.251
VI	Las Quilas	32,43	0,027	28	1,5	0,0007	25
VII	El Retamo	69,81	0,028	6.521	385,0	0,0012	6.515
VIII	Los Ángeles	62,01	0,037	3.961	222,5	0,0014	3.765
IX	Freire	52,90	0,041	365	21,3	0,0010	360
XIV	Los Ríos	49,23	0,120	5.603	271,6	0,0023	4.596
X	Osorno	51,22	0,068	3.546	180,8	0,0018	3.059

(*) Promedio considera la generación durante 21 años en torno a la generación máxima.

Fuente: Elaboración propia.

5 Selección de tecnología y casos de estudio

Una de las tecnologías más comunes de aprovechamiento de biogás en proyectos de mediana a gran escala, son los motores de combustión interna. Esta tecnología es la más adecuada para proyectos entre 0,5 [MWe] y 12 [MWe] o superiores. Sin embargo, se recomienda implementar esta tecnología en proyectos sobre 4 [MWe], ya que los motores de combustión interna son más pequeños que las turbinas y permiten incrementos de capacidad con bajo costo de inversión a medida que se desarrolla el proyecto, acoplando la capacidad instalada a la producción de biogás. La tecnología de motores de combustión interna es confiable, además los costos de operación y mantenimiento han disminuido considerablemente los últimos años. Existen plantas con más del 98% de disponibilidad anual, lo que es atribuido a un cuidadoso programa de mantenimiento desarrollado por los fabricantes.

Las turbinas a gas son bastante menos usadas que los motores, y presentan economías de escala para grandes proyectos que exceden los 4.000 [ft³/min] de biogás. Son menos eficientes que los motores de combustión interna y no permiten adaptar mediante la adición de unidades la capacidad de generación con las variaciones de flujo de biogás. Se puede acotar, por lo demás, que para el tamaño de los rellenos sanitarios nacionales no se justifica un proyecto de estas características.

Por otro lado, existe la alternativa de las microturbinas para proyectos de generación eléctrica en escalas bastante menores y comercialmente viables, lo que permite proveer de energía zonas donde el costo es elevado. Esta tecnología genera energía para usuarios en las proximidades del relleno sanitario, sin la necesidad de exportarla a la red. Se pueden añadir aplicaciones de cogeneración con microturbinas para mejorar la eficiencia en el uso del combustible, y así aprovechar la energía en forma de calor también. Existen experiencias de provisión de energía eléctrica y calor para invernaderos, comunidades y consumidores pequeños.

En el caso de las aplicaciones de uso directo del biogás, se requiere de un cliente dispuesto a usar el combustible en las cercanías del relleno sanitario. Este tipo de proyectos resulta atractivo económicamente para clientes a 5 [km] de distancia o menos, sin embargo, la mayoría de los rellenos sanitarios están ubicados a una distancia mayor de 5 km de los centros urbanos y de los potenciales consumidores de biogás. En efecto, el total de los rellenos sanitarios del país se encuentran entre 5 [km] a 10 [km] el 15%, entre 5 [km] y 10[km] el 62% y sobre los 10 [km] el 23% restante [37]. Por lo anterior, la distribución de grandes cantidades de biogás para el uso directo de este, no es una alternativa real y económicamente viable en Chile.

En proyectos de uso directo a menor escala, lo más común es proveer energía térmica para calefacción, por ejemplo, para pequeños consumidores o comunidades. Esto habitualmente se realiza por entregas directas de un producto térmico, que puede ser vapor, aire caliente o agua caliente, producida mediante calderas.

Una alternativa de uso directo del biogás sin tener la dependencia de un cliente externo, es la evaporación de lixiviados, para disminuir los costos de tratamiento de este residuo líquido. Esta alternativa es posible en rellenos sanitarios presentes en lugares con muchas precipitaciones, en que hay gran generación de lixiviados y de biogás.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se seleccionan las siguientes tecnologías con sus respectivos casos de estudio para proyectos tipos con valor comercial o social:

- Generación eléctrica a gran escala con motores a combustión interna para inyección de energía a la red de distribución eléctrica. (4 [MWe] a 12 [MWe]).
- Generación eléctrica y cogeneración a pequeña escala con microturbinas. (30 [kWe] a 2000 [KWe]) para consumidores pequeños o comunidades.
- Uso directo del biogás para redes distritales de distribución de agua caliente o vapor para comunidades o pequeños consumidores.
- Evaporación de lixiviados, como alternativa de tratamiento de los residuos líquidos aprovechando energía térmica de la combustión del biogás.

6 Modelo de diseño

A continuación se describe una metodología de diseño, para el desarrollo de la ingeniería conceptual de un proyecto de instalación de un sistema de extracción y aprovechamiento energético de biogás en un relleno sanitario.

El modelo incluye una metodología para estimar la generación potencial de biogás, y con esto dimensionar el sistema de extracción y analizar las alternativas de aprovechamiento energético.

Lo anterior permite una estimación de las principales obras e inversiones requeridas, y de los costos de operación y mantenimiento, para finalmente estudiar la factibilidad económica de un proyecto.

Un diagrama resumido de la metodología se observa en la Figura 6.1.

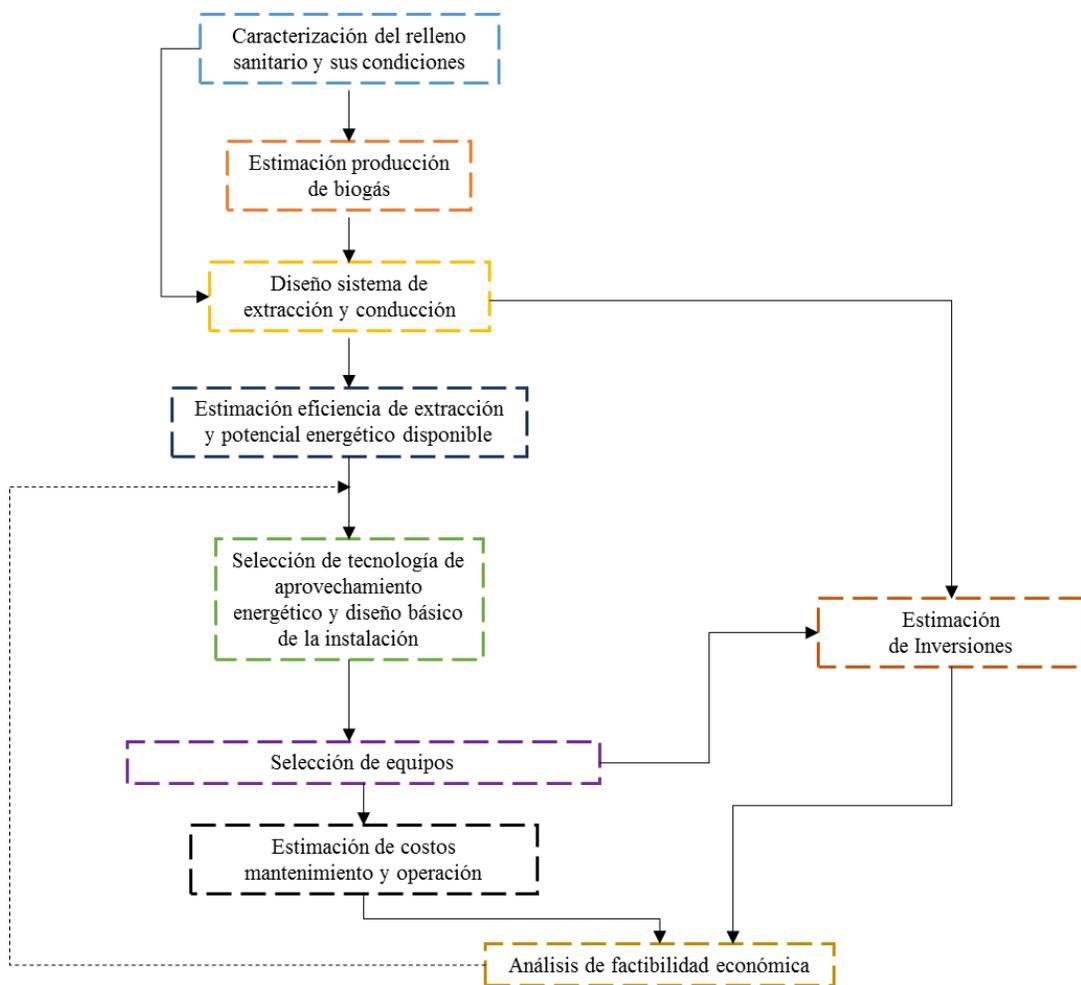


Figura 6.1 Diagrama metodología general de diseño de sistema de extracción y aprovechamiento de biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los bloques de la Figura 6.1 es desarrollado en detalle en las secciones posteriores.

6.1 Caracterización del relleno sanitario y sus condiciones

En esta etapa se menciona la información relevante y necesaria para caracterizar un relleno sanitario y así poder evaluar posteriormente las proyecciones de flujo de biogás. En la Figura 6.2 se muestra el detalle de esta etapa.

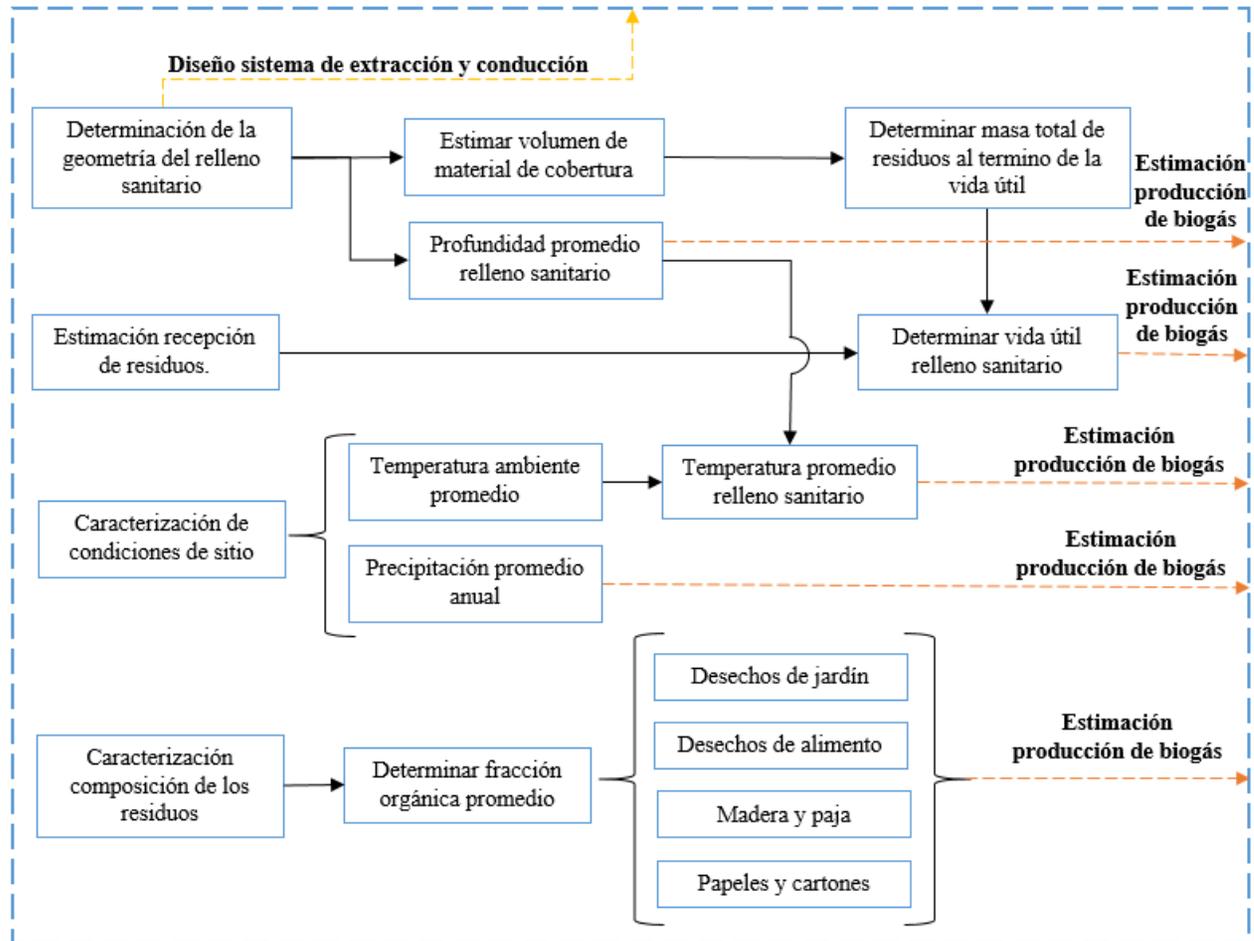


Figura 6.2 Diagrama etapa de caracterización de relleno sanitario.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Determinación de la geometría del relleno sanitario

Un aspecto clave para determinar la capacidad volumétrica de un relleno sanitario, es su diseño geométrico. Dependiendo de las condiciones específicas del sitio, tales como: la topografía, disponibilidad de material de cobertura o profundidad del nivel freático; se elegirá el método constructivo para el relleno, que puede ser el de área, zanja o mixto, el que determinará el volumen total disponible para disposición.

En caso de grandes rellenos sanitarios, el volumen total de disposición se obtiene a partir de la información de levantamiento topográfico y el método constructivo escogido. Se puede aproximar el volumen mediante el uso de las curvas de nivel.

6.1.2 Estimación del volumen de material de cobertura

Para determinar el volumen de disposición efectivo para residuos, se debe aproximar el volumen usado por el material de cobertura y restarlo del volumen total.

El material de cobertura se puede calcular como el 15% al 25% del volumen total de disposición. Si se desea una estimación más precisa, se debe considerar que en el caso de la normativa chilena las coberturas deben poseer las siguientes características:

- **Cobertura diaria:** 15 [cm] de espesor mínimo al final de cada día de operación.
- **Cobertura intermedia:** No exigida. Se recomienda una capa de 30[cm] mínimo para áreas inactivas por más de 180 días.
- **Cobertura final:** 30 [cm] a 60 [cm] de espesor, más la capa de suelo vegetal de 15 [cm] de espesor.

6.1.3 Profundidad promedio del relleno sanitario

Parte de la información que define un proyecto de relleno sanitario, es el área total disponible para su disposición, junto con la información del volumen total, se puede estimar una profundidad promedio del sitio de acuerdo a la Ecuación (6.1).

$$h_{RS} = \frac{V_{RS}}{A_{RS}} \quad (6.1)$$

Donde:

h_{RS} : Altura promedio relleno sanitario [m].

V_{RS} : Volumen total de disposición de residuos [m^3].

A_{RS} : Área total de disposición de residuos [m^2].

6.1.4 Determinación de la masa total de residuos al término de la vida útil

La masa total de residuos depende de la densidad de estos y a su vez de los equipos de compactación utilizados. La densidad del material depositado en el relleno tiende a aumentar con el tiempo por efecto de la compactación, producto de esfuerzos dinámicos originados por el tránsito de maquinaria. Un valor referencial para la densidad del relleno estabilizado es de 0,6 [ton/m^3] a 1 [ton/m^3]. La masa total de residuos al final de la vida útil se puede estimar con la Ecuación (6.2).

$$M_{RS} = (V_{RS} - V_C) \cdot \rho_{RE} \quad (6.2)$$

Donde:

M_{RS} : Masa de Residuos total [ton].

V_C : Volumen total de material de cobertura [m^3].

ρ_{RE} : Densidad de residuos estabilizados [ton/m^3].

6.1.5 Estimación de la recepción de residuos

Es clave determinar proyecciones de la recepción de residuos para estimar la vida útil de un relleno sanitario. La recepción de desechos depende del número de habitantes y la producción de basura per cápita. Como consecuencia de lo anterior, es necesario calcular la población futura, lo que debe realizarse por medio de proyecciones basadas en datos censales. Un modelo matemático básico se observa en la Ecuación (6.3), y corresponde a uno de crecimiento geométrico, en el que se asume una tasa de crecimiento constante. Se recomienda comparar los resultados con otros métodos de proyección.

$$P_f = P_o \cdot (1 + r)^{t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}} \quad (6.3)$$

Donde:

P_f : Población proyectada al final del periodo [habitantes].

P_o : Población inicial [habitantes].

r : Tasa de crecimiento poblacional [%].

t_{inicial} : Tiempo actual [año].

t_{final} : Tiempo final [año].

Por otro lado, para calcular la producción per cápita de basura se puede usar la Ecuación (6.4). Para esto se considera la recolección de por lo menos una semana, en la mayoría de los casos no se justifica realizar un muestreo más exhaustivo.

$$ppc = \frac{D}{7 \cdot P \cdot Cob} \quad (6.4)$$

En que:

ppc : Producción de residuos por habitante por día [kg/(habitantes · día)].

D : Masa semanal de residuos recolectada [kg/semana].

P : Población total [habitantes].

Cob : Cobertura de servicio de recolección [%].

Los valores típicos se encuentran en el rango de 0,7 [kg/habitante · día] a 1,2 [kg/habitante · día]. Este último valor varía con el desarrollo comercial y urbano de la población, se recomienda considerar un crecimiento anual de 0,5% a 1%.

A partir de la información anterior, es posible determinar curvas de proyección de recepción de residuos.

6.1.6 Determinación de la vida útil del relleno sanitario

A partir de las proyecciones de recepción de residuos y la capacidad volumétrica del relleno, se puede estimar la vida útil o de diseño del relleno sanitario.

6.1.7 Caracterización de condiciones de sitio

La producción de biogás depende de una serie de factores físicos, y de las condiciones donde está emplazado el relleno sanitario. Se identifican que los parámetros de mayor impacto, además de la fracción orgánica o susceptible a descomponerse, son la temperatura y humedad de los residuos.

La temperatura del relleno sanitario, por lo general es mayor que la temperatura ambiente, puesto que las reacciones que ocurren al interior de él son exotérmicas. En rellenos de baja profundidad, la temperatura al interior se ve influida por la temperatura ambiente promedio. Dado esto último, es posible calcular la temperatura promedio al interior del relleno sanitario, correlacionándolo con la profundidad y la temperatura ambiente promedio. Para esto se propone un modelo mediante la evaluación difusa descrito en el Anexo A.

A raíz de lo anterior, se debe manejar información de la temperatura promedio anual de la zona de emplazamiento del relleno sanitario.

Por otro lado, la humedad de los residuos en el relleno sanitario, depende fundamentalmente del ingreso de agua causada por precipitaciones. Por este motivo es que se utiliza un promedio anual de las precipitaciones, como parámetro representativo de la humedad, para estimar la producción de biogás.

Los datos entregados anteriormente se pueden obtener de los anuarios climatológicos de la dirección meteorológica de Chile.

6.1.8 Caracterización de residuos

Para determinar la cantidad de biogás potencial, es necesario conocer la composición promedio de los desechos. Específicamente conocer qué fracción del total corresponde a residuos orgánicos, los que a su vez deben ser clasificados como residuos de: jardín, comida, madera y papel o cartón. Cada una de estas categorías se identifica con distintas velocidades de degradación o vida media, que permitiría calcular el potencial general de metano (I_0). Si se conoce la composición de la basura, también se puede estimar la composición del biogás, y así conocer la fracción en volumen de metano presente en el biogás.

6.2 Estimación de la producción de biogás

En la Figura 6.3 se observa un esquema para determinar la producción de biogás, donde se identifican las variables de entrada para cada sub etapa. La información expuesta procede de la etapa anterior.

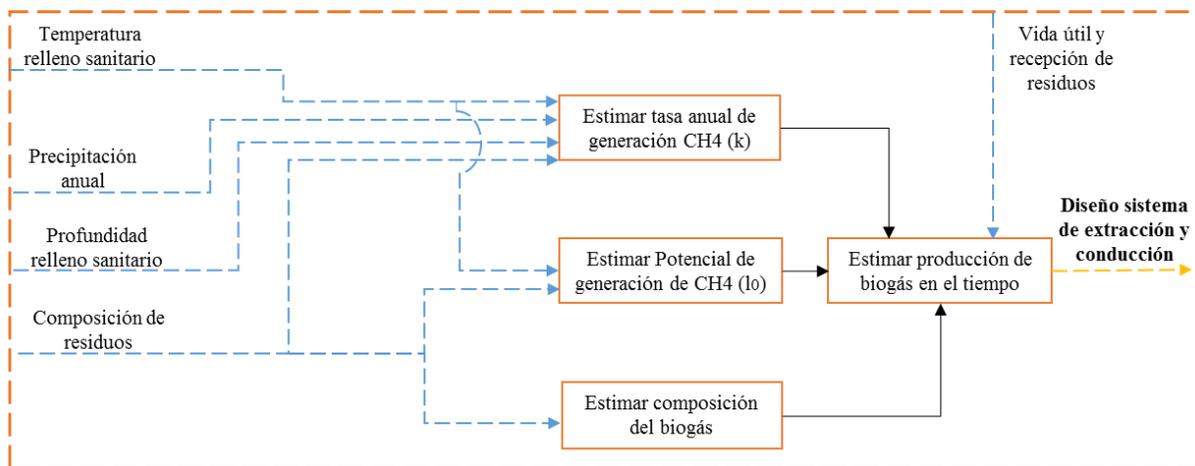


Figura 6.3 Diagrama etapas para estimación de flujo de biogás.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 Estimación de la tasa anual de generación de metano

Para calcular la tasa anual de generación de metano (k), se propone un modelo de evaluación difusa, el detalle de este se encuentra en el Anexo A. Se requiere como información de entrada la temperatura ambiente promedio, precipitación promedio anual, fracción orgánica de los residuos y profundidad del relleno sanitario.

El modelo propuesto entrega como resultados la temperatura promedio al interior de relleno sanitario y la tasa anual de generación de metano (k).

6.2.2 Estimación del potencial de generación de metano

Para determinar el valor de l_0 se propone la metodología de IPCC, presente en la sección 2.9.2. Para su aplicación se requiere calcular previamente la fracción en volumen de metano en el biogás, la temperatura al interior del relleno sanitario y caracterizar la composición de la fracción orgánica de los residuos.

6.2.3 Estimación de la composición del biogás

Para este procedimiento se propone el uso del modelo estequiométrico, descrito en la sección 2.9.1. Como principales resultados se obtiene la fracción de metano y dióxido de carbono del biogás.

6.2.4 Estimación de la producción de biogás

Con la información de la tasa de recepción de residuos, la vida útil del relleno sanitario, la fracción en volumen de metano en el biogás y las constantes k y l_0 , se propone determinar las proyecciones mediante la aplicación de modelo LandGEM descrito en la sección 2.9.2.

6.3 Diseño del sistema de extracción de biogás

En la Figura 6.4 se observa la serie de etapas para realizar un diseño preliminar de un sistema de extracción de biogás.

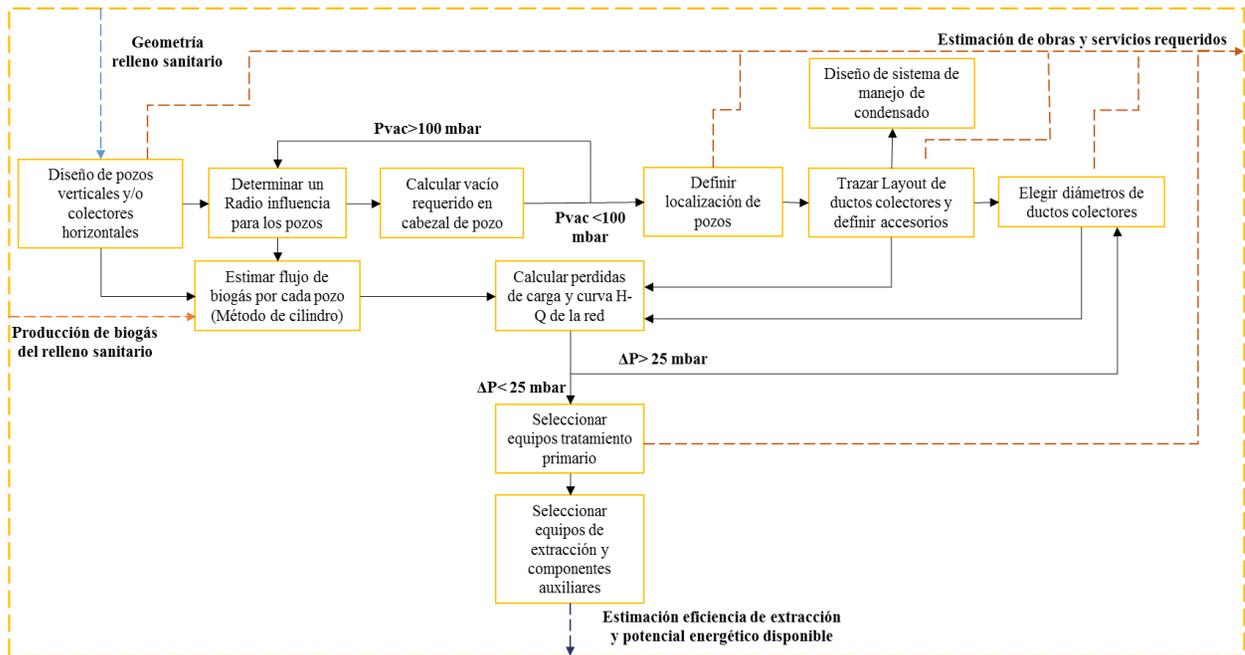


Figura 6.4 Diagrama etapa de diseño de sistema de extracción de biogás.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.1 Diseño de pozos de extracción vertical y colectores horizontales

Primero, se debe definir qué tipo de colectores de biogás se usarán. Las alternativas más comunes son pozos de extracción vertical, pero también existen sistemas con colectores horizontales. Para la elección del tipo de colector se debe considerar el objetivo de la extracción, las ventajas y desventajas de cada tipo, las que se encuentran en la Tabla 6.1.

En general, cuando se aplican colectores horizontales, luego de alcanzar la elevación final del relleno sanitario, se emplean pozos verticales para aumentar el flujo captado de biogás y mejorar la eficiencia del sistema, es decir, se aplican sistemas mixtos.

Un diseño típico de pozos de extracción vertical se observan en la Figura 6.5.

Tabla 6.1 Ventajas y desventajas de tipos de colectores de biogás.

Pozos verticales		Colectores horizontales	
Ventajas	Desventajas	Ventaja	Desventaja
Interferencia mínima a las operaciones de disposición de residuos, si pozos son instalados en áreas clausuradas.	Incrementa los costos de mantención y operación en áreas de disposición aun operativas.	Facilita la extracción temprana de biogás, pues permite extraer en zonas activas.	Incrementa la posibilidad de ingreso de aire al relleno.
Diseño más común, confiables y accesibles para la inspección.	Retraso en la extracción de biogás en caso de instalarlos solo en áreas clausuradas.	No necesita equipos especializados para la construcción.	Más propensos a fallar por inundación y taponamiento o producto de asentamientos del terreno.
Adecuados para rellenos sanitarios profundos, mayores a 10 [m].		Adecuado para rellenos sanitarios poco profundos.	

Fuente: [11].

Se sugiere considerar los siguientes criterios:

- Diámetros de perforación entre 200 [mm] a 900 [mm]. La evidencia empírica sugiere que diámetros pequeños presentan un buen desempeño para los pozos, sin aumentar mucho el costo en excavación [11]. Se recomienda un diámetro mínimo de 250 [mm] [12].
- Tubería colectora de diámetro entre 50 [mm] a 150 [mm]. Se recomienda un mínimo de 100 [mm] para evitar taponamiento por condensado de biogás o ingreso de lixiviado a la tubería. Considerar aumentar diámetro solo en caso de rellenos sanitarios con altos niveles de lixiviado [38]. La tubería debe ir al centro del pozo. Los materiales más usados son PVC y HDPE, siendo este último el más común [15].
- La profundidad de la perforación debe ser aproximadamente el 80% de la profundidad del relleno sanitario. Se debe verificar que exista una distancia de al menos 3 [m] desde el final de la perforación hasta la base de esta, de forma que los pozos no intervengan con el sistema de impermeabilización de la base del relleno [12]. Perforaciones mayores a 20 [m] no son eficientes en términos de costos, por lo que no suele superarse dicha profundidad.
- La tubería idealmente debe tener una región perforada de 2/3 del largo total, pero debe verificarse que la distancia desde la superficie hasta el área perforada sea al menos de 3 [m], siendo recomendable 5 [m], para poder minimizar la probabilidad de ingreso de aire al interior del relleno sanitario [39].
- La región perforada puede tener un diámetro de 10 [mm] a 15 [mm] [11]. Debe incluir un área de apertura de 10% a 12% del total del tubo [39]. También en lugar de perforaciones circulares, se emplean ranuras, sin embargo, tuberías con perforaciones circulares presentan el doble de resistencia frente a cargas verticales [39].
- Las tuberías deben poseer acoples telescópicos, para acomodarse a asentamientos del terreno y poseer un margen de ajuste. Esto con respecto a la base de la perforación frente a variaciones en la profundidad del relleno, como consecuencia de asentamientos del terreno.
- En la región no perforada del tubo se rellena con material de cobertura y se utilizan dos sellos de bentonita (material arcilloso que se expande con la humedad), de las dimensiones ilustradas en la Figura 6.5 en cada extremo [12].

- En la región perforada se usa grava como material de relleno, con una granulometría de 25 [mm] a 50[mm].

En caso de los colectores horizontales los diseños más corrientes se observan en la Figura 6.6. Se sugiere adoptar los siguientes criterios de diseño:

- Las tuberías colectoras van montadas sobre trincheras, directamente encima de los residuos, y son rodeadas por grava de granulometría de 25 [mm] a 50[mm]. Sobre la tubería debe existir al menos 200 [mm] de espesor de grava. En caso de cercanía a la superficie superior del relleno sanitario, se debe usar un geotextil para evitar el ingreso de aire.
- Las dimensiones de la trinchera van de 600 [mm] a 900 [mm] de ancho, y 1200 [mm] de profundidad [8].
- Se debe considerar una inclinación del 5% para facilitar el flujo de condensado o lixiviado dentro de la tubería [12].
- Las tuberías suelen ser de 100 [mm] a 200[mm] de diámetro, y se recomienda que tenga como mínimo 150 [mm]. Este tipo de sistemas requiere operar con bajo nivel de vacío para evitar la inmigración de aire al relleno sanitario, por lo que es usado 200 [mm] de diámetro en la mayoría de los casos para evitar grandes pérdidas de carga, lo que permite en forma adicional, dar paso al flujo de líquidos sin bloquear el paso del biogás [38].
- El material de la tubería colectora es PVC o HDPE, siendo este último el más usual [11].
- La tubería colectora debe estar formada por tuberías de 6 [m] a 12 [m] de largo, de distinto diámetro y solapadas para otorgar flexibilidad frente al asentamiento del terreno, como se observa en la Figura 6.7 [12].
- La trinchera más alta debe tener al menos 3 [m] a 4 [m] de distancia de la superficie superior del relleno, para prevenir el ingreso de aire [12].

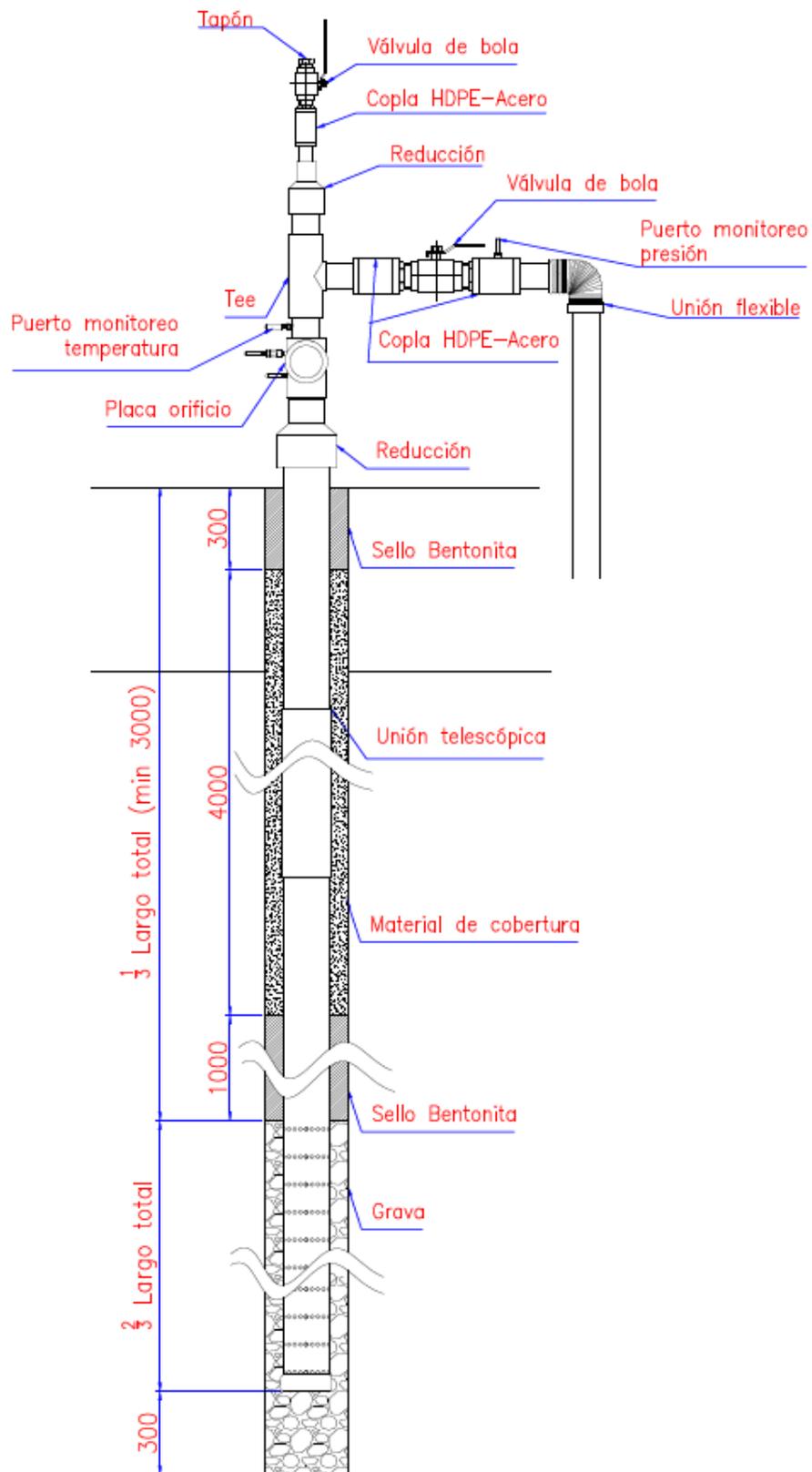


Figura 6.5 Diseño típico de pozo de extracción vertical.
Fuente: Elaboración propia.

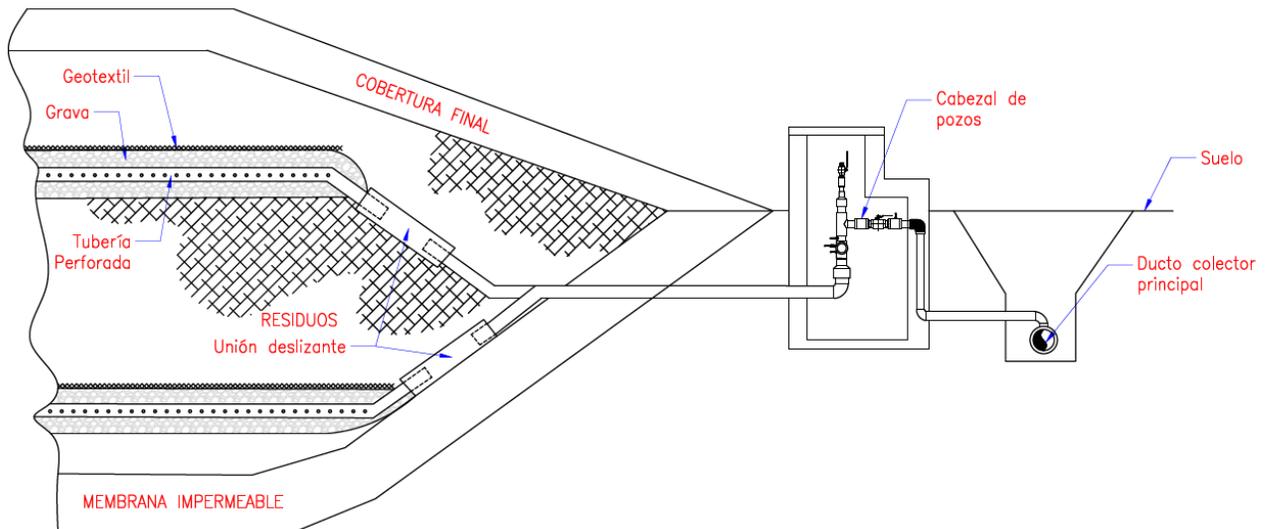


Figura 6.6 Esquema de sistemas de colectores horizontales
Fuente: Elaboración propia.

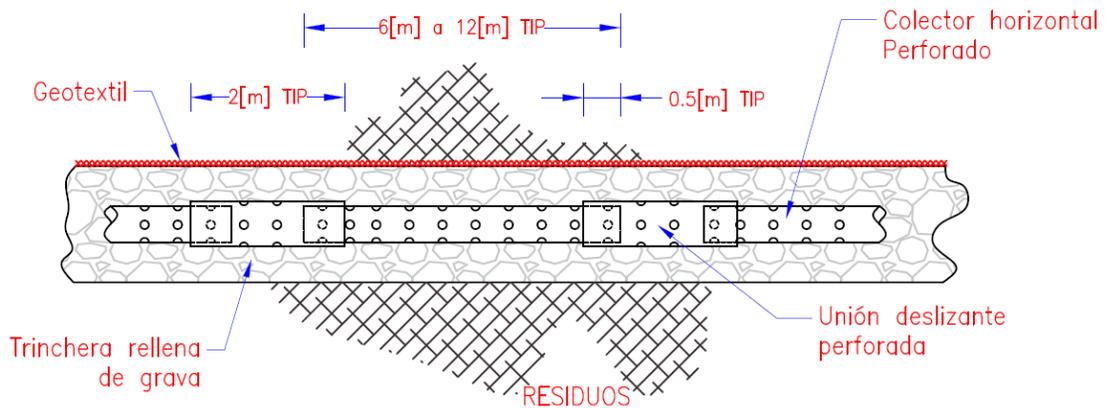


Figura 6.7 Esquema unión de tuberías colectoras horizontales
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los cabezales para los pozos la instrumentación típica es:

- Medidor de Flujo: Tubo de Pitot o Placa orificio.
- Medidor de presión: Manómetro o puerto de monitoreo.
- Medidor de temperatura: Termocupla o puerto de monitoreo.
- Regulación de vacío: Válvulas Mariposa o válvula de bola son las más utilizadas (opcional).

Además se debe considerar una unión flexible para la conexión a los ductos colectores. Con esto se permite el movimiento, debido al asentamiento el terreno y dilaciones térmicas de los ductos. Es habitual también considerar una tapa removible para inspección.

6.3.2 Determinación del radio de influencia de pozos y vacío requerido en cabezal de succión

El radio de influencia de un pozo está directamente relacionada con la presión de vacío que se aplica en el cabezal y la permeabilidad del residuo. Para el caso de pozos verticales existe la Ecuación (6.5). La diferencia entre la presión al interior del relleno sanitario y el cabezal determina el vacío que debe inducirse para mantener un radio de influencia.

$$\frac{P_{\text{relleno}}^2 - P_{\text{vac}}^2}{P_{\text{vac}}} = \frac{R^2 \cdot \mu_{\text{gas}} \cdot \rho \cdot Q}{M \cdot K_{\text{res}} \cdot \left(\frac{L}{t}\right)} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (6.5)$$

Donde:

P_{relleno} : Presión interna permisible en el relleno sanitario [Pa].

P_{vac} : Presión en el cabezal de pozo de extracción [Pa].

μ_{gas} : Viscosidad dinámica del biogás [Pa·s].

Q : Flujo biogás total del relleno sanitario [m³/s].

M : Capacidad del relleno sanitario [ton].

K_{res} : Permeabilidad intrínseca de los residuos [m²].

L : Largo del pozo [m].

R : Radio de influencia [m].

r : Radio de pozo de extracción [m].

ρ : Densidad de los residuos [ton/m³].

t : Espesor capa de residuo [m].

La permeabilidad intrínseca se determina con la Ecuación (6.6).

$$K_{\text{res}} = k \cdot \frac{\mu}{\lambda} \quad (6.6)$$

En que:

k : Conductividad hidráulica horizontal de los residuos [m/s].

μ : Viscosidad dinámica del agua [Pa·s].

λ : Peso específico del agua [N/m³].

El valor promedio de la conductividad hidráulica para residuos fuertemente compactados se encuentra en el intervalo de $2,5 \cdot 10^{-6}$ [cm/s] a $5,9 \cdot 10^{-7}$ [cm/s], mientras que para residuos compactados moderadamente el valor está comprendido entre $2,5 \cdot 10^{-5}$ [cm/s] a $2,0 \cdot 10^{-5}$.

El radio de influencia también depende de:

- La cantidad y profundidad que tenga el nivel de lixiviado.
- Tipo y espesor de coberturas.
- Configuración del sitio.

El vacío inducido en el cabezal de pozo debe estar comprendido entre 20 [mbar] a 60 [mbar], con fin de maximizar el radio de influencia, sin permitir el ingreso de aire al relleno.

Los residuos más antiguos suelen tener menor permeabilidad, en consecuencia para el mismo nivel de vacío en el cabezal de los pozos los radios de influencia son menores. Los radios de influencia se escogen de acuerdo a las condiciones del sitio, la antigüedad de los residuos y a la localización de los pozos. Es común que se elijan en los siguientes rangos [8]:

- Pozos en el interior del relleno sanitario tiene un radio entre 35 [m] a 80 [m].
- Pozos en el perímetro del relleno sanitario tienen un radio entre 18 [m] a 45 [m].
- Pozos en relleno sanitarios poco profundos o con mucha humedad tienen un radio entre 18 [m] a 50 [m].
- Pozos en rellenos sanitarios profundos o con poca humedad tienen un radio de influencia entre 35 [m] y 100 [m].

Por otro lado los colectores horizontales se espacian de 30 [m] a 60 [m] horizontalmente. Debido a que la conductividad hidráulica horizontal suele ser de 3 a 10 veces mayor que la vertical, el espaciamiento vertical debe ser menor, siendo típico valores entre 10 [m] a 25 [m].

6.3.3 Localización de los pozos

Para los pozos verticales, una vez que se definen los radios de influencia, el espaciado se realiza de tal forma que las zonas de influencia se traslapen, de forma de asegurar la máxima extracción de biogás posible. El distanciamiento de pozos debe ser como se muestra en la Figura 6.8.

Un valor referencial es considerar que exista una densidad de pozos entre 1,9 a 3,7 pozos por cada hectárea de terreno.

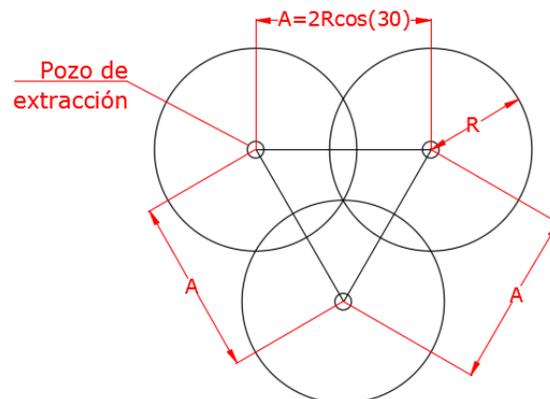


Figura 6.8 Posicionamiento de pozos de extracción.

Fuente: Elaboración propia

Para los colectores horizontales el espaciado fue definido antes, solo debe considerarse que las trincheras estén orientadas en la misma dirección que las operaciones de disposición, todo para facilitar el funcionamiento del relleno sanitario.

6.3.4 Estimación del flujo de biogás por pozo

Para calcular el biogás extraído desde este cada pozo, se emplea el método del cilindro. Este considera que el volumen de influencia de un pozo es un cilindro definido por el radio de influencia escogido y la profundidad del pozo.

Este método asume que todo el biogás que se genera dentro del cilindro es extraído por el pozo y no existen fugas a la atmósfera.

El flujo de biogás en cada pozo se aproxima por la Ecuación (6.7):

$$Q_{\text{pozo}} = \pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot t \cdot \rho \cdot G \quad (6.7)$$

Donde:

Q_{pozo} : Flujo de biogás de un pozo [$\text{m}^3/\text{año}$].

R: Radio de influencia [m].

r: Radio de pozo de extracción [m].

ρ : Densidad de los residuos [ton/m^3].

G: Generación de biogás por unidad de residuos [$\text{m}^3/(\text{ton}\cdot\text{año})$].

Si bien el flujo de biogás depende de las condiciones específicas del sitio, en el caso de pozos verticales los valores típicos del flujo extraído están entre 15 [ft^3/min] a 45 [ft^3/min] y para colectores horizontales entre 7 [ft^3/min] a 10 [ft^3/min] por cada 100 [m] de tubería.

6.3.5 Layout ductos colectores

Luego de definir la posición de los pozos de extracción, se debe tener en cuenta la forma en que estos se interconectaran y trasladan el biogás hacia la estación de bombeo y aprovechamiento.

El trazado del layout de ductos debe considerar que el sistema debe permitir la creación de suficiente vacío en cada pozo de extracción, para facilitar el traslado del biogás, y así tratar de minimizar los costos de operación e inversión del sistema.

Para lograr dicho objetivo, existen diversas configuraciones básicas:

- **Sistema ramificado múltiple:** Consiste en conexiones laterales individuales para cada pozo, que conducen el biogás a ductos principales conectados directamente al sistema de extracción. Son adecuados para rellenos sanitarios pequeños donde no existen muchos pozos de extracción. Su principal ventaja radica en que esta configuración reduce al mínimo el largo de tubería a utilizar.
- **Sistema en circuito cerrado o anillo:** Consiste en un ducto que forma un circuito cerrado en torno al área de disposición en forma de anillo. Cada pozo posee ductos laterales que conectan directamente con el ducto principal, que tiene forma de anillo. Esta configuración es común en grandes rellenos sanitarios, aunque requiere mayor longitud de tubería, otorga redundancia al sistema al proveer más de un camino para el flujo de biogás, pero esto facilita las mantenciones y la solución de problemas en las líneas.

En la Figura 6.9 se observan esquemas de cada tipo de configuración.

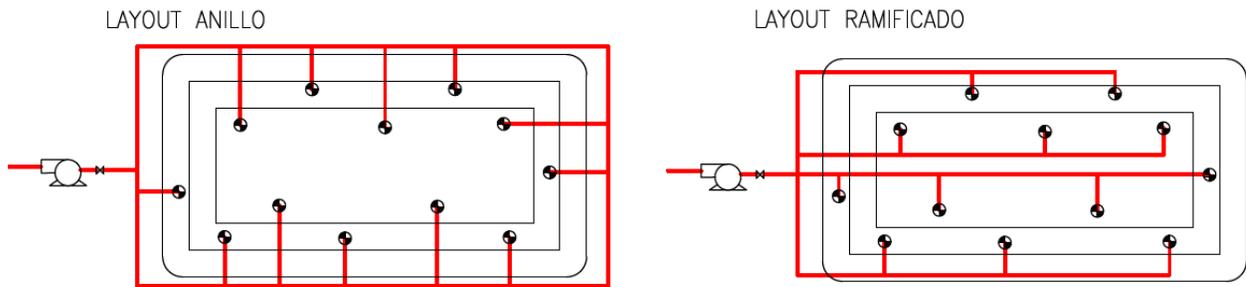


Figura 6.9 Tipos de layout para ductos colectores.

Fuente: Elaboración propia.

Independiente de la configuración, el diseño del sistema de ductos colectores debe permitir:

- Tener puntos de monitoreo del gas.
- Prevenir taponamientos de flujo de biogás por agua, lixiviados o condensado.
- Permitir fácil mantenimiento del sistema, por lo que debe poder ser aislado en segmentos que permitan intervenir el sistema, sin tener que detenerlo por completo.

Se recomienda que todos los ductos tengan una inclinación del 5%, para permitir el flujo del condensado al interior de las tuberías. Es preferible que los ductos principales estén montados sobre terreno sin perturbación (que no presenten asentamiento).

La selección de qué tipo de configuración utilizar depende de:

- Disponibilidad de terreno.
- Geometría del sitio.
- La topografía local.
- Localización de la estación de bombeo y la planta de incineración o aprovechamiento energético.

Por la naturaleza heterogénea de los residuos en un relleno sanitario, la producción de biogás puede ser distinta en diferentes secciones de este, y poseer distintos radios de influencia o requerir distintos niveles de succión. La regulación se realiza mediante válvulas. Es esencial el control individual de cada pozo, por lo que existen dos alternativas de control:

- **Sistemas con Manifold:** Cada pozo es conectado a un manifold con una válvula de regulación para el flujo de salida. Cada conexión proveniente de un pozo tiene además su propia válvula de regulación. Este sistema permite un rápido y fácil control de la succión y flujo de biogás, y la posibilidad de aislar el sistema de ductos colectores en secciones. La desventaja radica en que la regulación se realiza remotamente, lo que reduce la inspección visual para la localización de problemas puntuales. En la Figura 6.10, se observa un sistema de control mediante válvulas con Manifold.



Figura 6.10 Esquema de control con valvulas en Manifold.

- **Sistemas de “espina de pescado”:** Conecta un determinado número de pozos, mediante ductos laterales que convergen en uno intermedio, que transporta el biogás hasta un ducto principal. La succión es controlada por válvulas en el cabezal de cada pozo. La ventaja es que cualquier problema puede ser detectado inmediatamente, ya que permite acercarse a cada pozo para balancear el sistema. La desventaja de esto último es que el control de varios pozos requiere mucho tiempo.

Cada esquema de control se observan esquemáticamente en la Figura 6.11

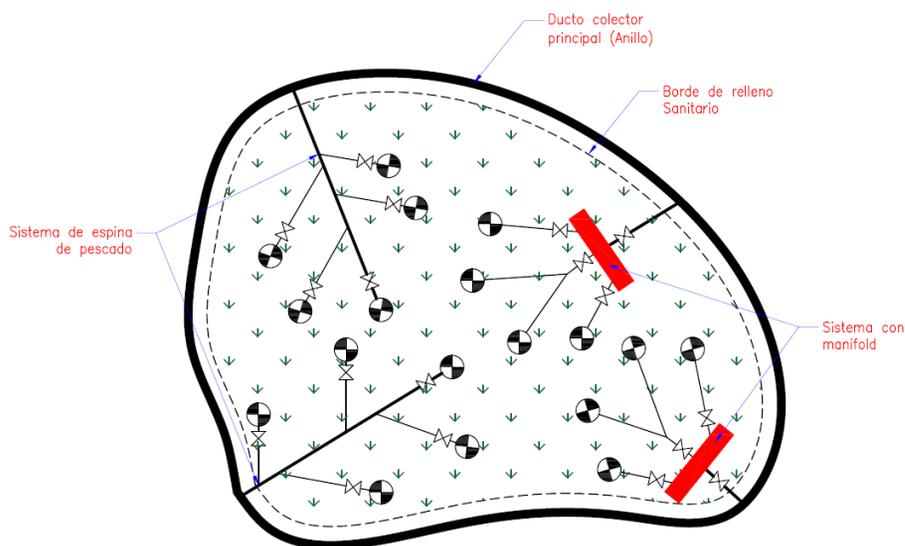


Figura 6.11 Esquemas de control de presión de vacío en pozos.

Fuente: Elaboración propia.

También debe definirse si los ductos se montan sobre el nivel del suelo o enterrados, las ventajas y desventajas de cada alternativa se observan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Comparación entre ductos enterrados o sobre el suelo.

Ductos enterrados		Ductos sobre el suelo	
Ventajas	Desventajas	Ventaja	Desventaja
Es efectiva para costos operacionales más bajos.	Tiene mayores costos de instalación.	Tiene bajo costos de instalación.	Expuesto a degradación por radiación UV u otros efectos ambientales.
Ductos protegidos de las actividades en superficie y efectos ambientales.	Dificultad para inspeccionar y mantener los ductos y controlar la inclinación por asentamientos.	Es fácil de inspeccionar, mantener y reparar ductos.	Minimiza el acceso vehicular.
Mejor aspecto visual.	Requiere bóvedas de acceso.	Es sencillo expandir el sistema.	Posición puede alterarse por flujos de agua superficial por lluvias.

Fuente: [11].

6.3.6 Dimensionamiento de los diámetros de ductos

El diámetro de los ductos escogidos determinarán los límites de cantidad de biogás que el sistema es capaz de transportar. Como existe una incertidumbre en los flujos, se adopta como estándar de diseño las dimensiones de los ductos para el flujo máximo esperado de biogás, para así evitar problemas en la operación, provocados por taponamiento de tubos o excesiva pérdida de carga. Para la elección de los diámetros de los ductos, se aplican los siguientes criterios [38]:

- La velocidad del flujo de biogás debe ser limitada a 12 [m/s] cuando el condensado fluye en la misma dirección, de manera que el vapor de agua pueda condensar en las paredes de la tubería.
- La velocidad del flujo de biogás debe ser limitada a 6 [m/s] cuando el condensado fluye en dirección opuesta, para poder evitar el bloqueo del flujo.
- La pérdida de carga de 2,5 [mbar] por cada 30 [m] otorga un buen balance entre costos de bombeo e instalación del sistema.
- La pérdida de carga promedio no debe superar 25 [mbar].

Para la elección preliminar de los diámetros de ductos, la experiencia a práctica sugiere los siguientes valores [40]:

- 50 [mm] a 100 [mm] de diámetro nominal para ductos laterales de pozos individuales.
- 300 [mm] de diámetro nominal para ductos que agrupan flujo de varios pozos.
- Más de 450 [mm] de diámetro nominal para ductos principales o anillos.

6.3.7 Sistemas de manejo de condensado

Un factor importante, en el diseño de un sistema de extracción, es considerar elementos para controlar y extraer el condensado. Este se produce por el enfriamiento del biogás durante su transporte a la estación de bombeo. Durante la extracción el biogás suele estar a la temperatura interior del relleno y saturado en humedad. Como consecuencia del enfriamiento, la presión de vapor disminuye y comienza a condensar el agua en las paredes de las tuberías.

La cantidad de condensado depende de la cantidad de biogás extraído, la presión de vacío y la magnitud del cambio de temperatura. Para prevenir que el agua bloquee los ductos, en los puntos bajos del sistema colector se usan trampas o cárcamos de condensado (Figura 6.12). El condensado puede ser dispersado dentro del relleno sanitario o ser transportado a los sistemas de tratamiento de lixiviados.

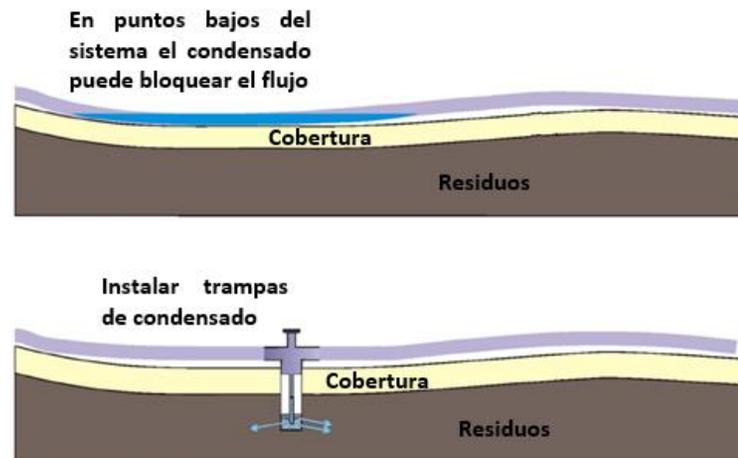


Figura 6.12 Esquema extracción de condensado en puntos bajos del sistema.
Fuente: Adaptado de [16].

En grandes rellenos sanitarios se utilizan cárcamos de condensado para automáticamente transportar el condensado a los sistemas de control y tratamiento de lixiviados. La bomba sumergible puede ser eléctrica o neumática (Figura 6.13), siendo esta última opción la preferida, para evitar riesgos al momento de instalar equipos eléctricos en atmósferas explosivas. Para determinar los equipos de extracción de condensado, es necesario estimar el flujo de este. Los cárcamos en general se dimensionan para el almacenamiento diario de lixiviado producido.

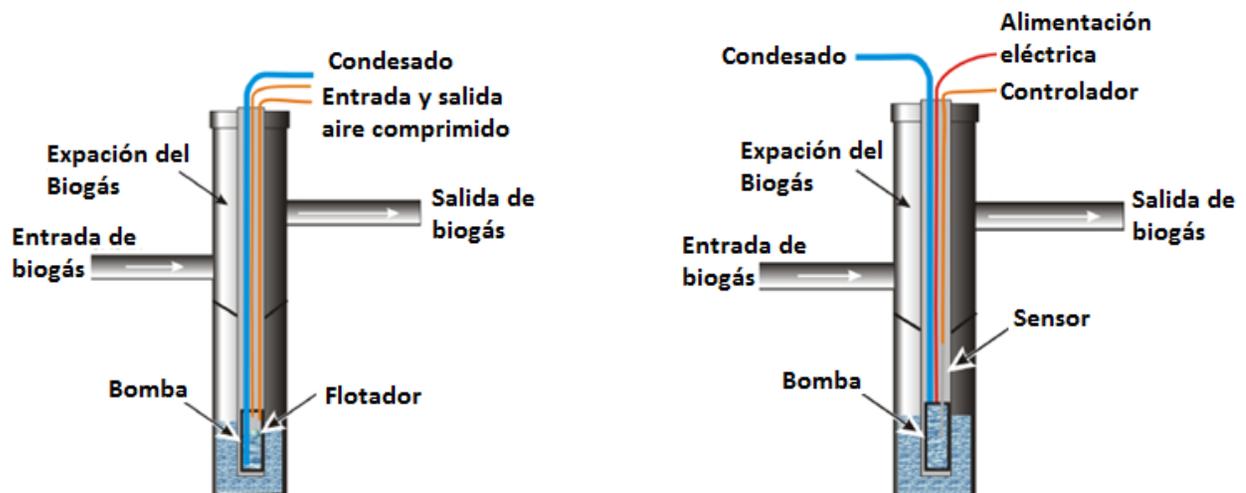


Figura 6.13 Tipos de cárcamos de condensado.
Fuente: Adaptado de [16].

Para calcular el flujo de condensado, se adoptan los siguientes supuestos:

- La temperatura del biogás es máxima en el cabezal del pozo e igual a la temperatura del interior del relleno sanitario.
- La humedad relativa del biogás es 100%.
- No hay congelamiento.

La cantidad de condensado varía durante el año, siendo en invierno el periodo de mayor producción. El potencial de producción de condensado se estima con la Ecuación (6.8).

$$C_{\text{pot}} = \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{biogás}}} \cdot \left(\frac{P_s(T_e)}{P_T - P_s(T_e)} - \frac{P_s(T_s)}{P_T - P_s(T_s)} \right) \quad (6.8)$$

Donde:

C_{pot} : Condensado potencial [kg agua/ kg biogás].

M_{agua} : Peso molecular del agua [kg/kmol].

$M_{\text{biogás}}$: Peso molecular del biogás [kg/kmol].

$P_s(T)$: Presión de saturación de vapor de agua [mbar].

T_e : Temperatura de entrada del biogás a ducto colector [°C].

T_s : Temperatura de biogás antes de la trampa o cárcamo de condensado [°C].

P_T : Presión de aspiración inducida por soplador o compresor [mbar].

El peso molecular del biogás se estima con la Ecuación (6.9)

$$M_{\text{biogás}} = f_{\text{CH}_4} \cdot 16 + f_{\text{CO}_2} \cdot 44 \quad (6.9)$$

En que:

f_{CH_4} : Fracción en volumen de metano en el biogás [%].

f_{CO_2} : Fracción en volumen de dióxido de carbono en el biogás [%].

La tasa de condensado suele estar entre 30 [ml] a 50 [ml] por metro cúbico de biogás.

Los ductos de transporte de condensado son de diámetros de 32 [mm], 50 [mm], 63 [mm] o 90 [mm] de MDPE SDR1 y suelen tener una inclinación de al menos 3%. Las bombas de condensado deben tener dimensiones en función de la máxima pérdida de carga hasta la estación de tratamiento o almacenamiento del condensado. Las bombas que suelen usarse manejan entre 0,5 [m³/h] a 2,5 [m³/h] y tienen velocidades de descarga entre 0,5 [m/s] y 2,5 [m/s].

Se puede utilizar Ecuación (6.10), denominada ecuación de Hazen-Williams para cuantificar las pérdidas de carga. Esta ecuación es válida para temperatura dentro del rango de 5°C a 25°C.

$$h_f = 10,674 \cdot \left(\frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,871}} \right) \cdot L \quad (6.10)$$

Donde:

h_f : Pérdida de carga [m].

Q : Caudal de condensado [m³/s].

C : Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.

D: Diámetro interior de tubería [m].

L: Longitud de tubería [m].

El coeficiente de Hazen-Williams toma un valor de 140 para tuberías de PVC y de 150 para tuberías de HDPE o MDPE.

Para el cálculo de la pérdida de carga total se puede aproximar que existe un 20% adicional de pérdidas de cargas localizadas. La pérdida de carga total debe ser aproximadamente 10% de la presión que suministra la bomba [38].

6.3.8 Cálculo pérdidas de carga y construcción de la curva H-Q de la red

Para comprobar que la elección de los diámetros del sistema de ductos colectores sea la correcta, debe verificarse que las pérdidas de carga estén dentro de los límites permisibles, y que balanceen adecuadamente los costos de inversión de los ductos y los costos de operación en bombeo o extracción. Las pérdidas de carga deben calcularse para el peak de generación de biogás proyectado y para el camino “más largo”, es decir, el que oponga mayor resistencia al flujo. Se deben realizar cálculos iterativos hasta seleccionar diámetros de tuberías mínimos para la pérdida de carga admisible.

Para el cálculo de pérdidas de carga en un flujo de gas se sugiere la ecuación de Pole, por la sencillez de su aplicación y por considerar el deterioro al interior de las tuberías, debido a que entrega valores levemente sobreestimados de las pérdidas de carga; esta se observa en la Ecuación (6.11):

$$Q = C \cdot \left(\frac{(P_1 - P_2) \cdot D^5}{\rho \cdot L_e} \right)^{0,5} \quad (6.11)$$

En que:

Q: Flujo de gas [ft³/h].

P₁: Presión absoluta inicial [psi].

P₂: Presión absoluta de salida [psi].

ρ: Densidad de biogás [kg/m³].

L_e: Largo equivalente de la tubería [ft].

D: Diámetro interno de la tubería [in].

C: Constante de ajuste por diámetro de tubería, dado por Tabla 6.3.

Tabla 6.4 Valor constante de C ecuación de Pole.

Diámetro nominal de tubo	Valor
¾" a 1"	4,78
1 ¼" a 1 ½"	5,255
2"	5,735
3"	6,215
4"	6,450

Fuente: [41]

Para determinar el largo equivalente es necesario, considerar las pérdidas de presión en válvulas y accesorios, como referencia de algunos accesorios se observan valores en la Tabla 6.5. Para mayor información de otros accesorios, incluyendo diferentes tipos de válvulas revisar Anexo B.

Tabla 6.5 Relación Longitud/Diámetro por accesorio.

Accesorio	Relación Longitud/Diámetro
Codo a 45°	16
Codo a 90°	30
Tee a flujo directo	60
Tee a flujo a 90°	20

Fuente: [5].

Luego de seleccionado los diámetros de ductos, se debe derivar la curva característica de la red o instalación. Esta se construye graficando las pérdidas de carga en función del caudal.

Además de la Ecuación de Pole, es habitual dimensionar los ductos usando la Ecuación (6.12), que corresponde a la fórmula de Darcy-Weisbach. Si bien la Ecuación (6.12) es para flujo incompresible, un flujo de gas se puede aproximar a flujo incompresible si la caída de presión es menor al 40% de la presión inicial.

$$h_f = f \cdot \left(\frac{L_e}{D} \right) \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (6.12)$$

En que:

h_f : Pérdida de carga [m].

f : Factor de fricción de Darcy.

v : Velocidad promedio del flujo [m/s].

g : Aceleración de gravedad [m/s^2].

En el caso de las grandes instalaciones de extracción de biogás, puede ser muy laborioso el cálculo de pérdidas de carga y determinación de la curva característica de la instalación. Para este tipo de situaciones es recomendable el uso de un software de simulación de redes. En particular, se puede utilizar el software gratuito de simulación de redes hidráulicas EPANET, sin embargo, debe verificarse la validez de la aproximación del flujo de biogás a un flujo incompresible.

6.3.9 Selección equipos de tratamiento primario

Antes de los equipos de extracción es necesario filtrar y deshumidificar el biogás, para que se minimicen los efectos corrosivos que el biogás sin tratar podría causar en dichos equipos.

No toda la humedad del biogás se retira mediante las trampas o cárcamos de condensado, razón por la que se emplean en general separadores de humedad centrífugos, como el que se observa en la Figura 6.14. Un desnebulizador se puede emplear para proporcionar una mayor eficiencia de remoción.

Además del separador de humedad, se puede considerar una “trampa-p”, instalada antes junto con un estanque y una bomba sumergible que transporte el condensado al sistema de tratamiento de lixiviado.

En la Figura 6.15 se observa un diagrama de procesos de una estación de tratamiento primario típica.

En instalaciones cuyo uso requiera biogás a alta presión, se necesitan equipos más complejos y de mayor eficiencia para eliminar la humedad de este. Para este proceso suelen usarse enfriadores para bajar la temperatura del biogás entre -4°C a 10°C , también se lo puede comprimir antes del enfriamiento para deshidratarlo aún más. Aquí la presión por lo general oscila desde 100 [kPa] a 700 [kPa], y puede variar dependiendo del uso final del biogás. El ejemplo de un sistema más sofisticado para eliminar la humedad se observa en la Figura 6.16

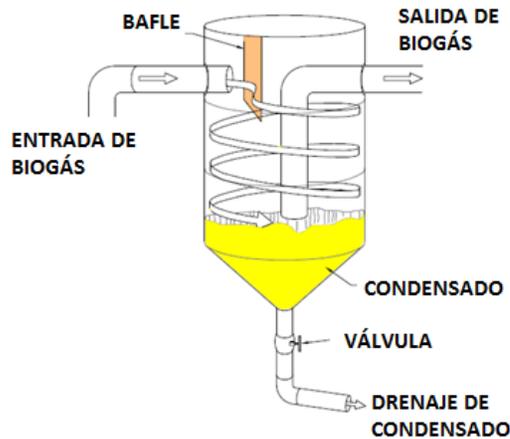


Figura 6.14 Esquema de separador de humedad centrífugo.
Fuente: Adaptado de [12].

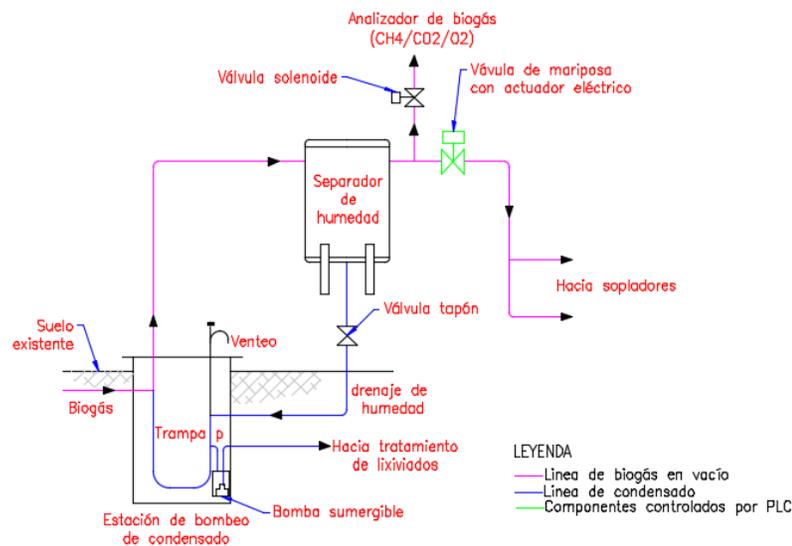


Figura 6.15 Diagrama de proceso de estación de tratamiento primario.
Fuente: Elaboración propia.

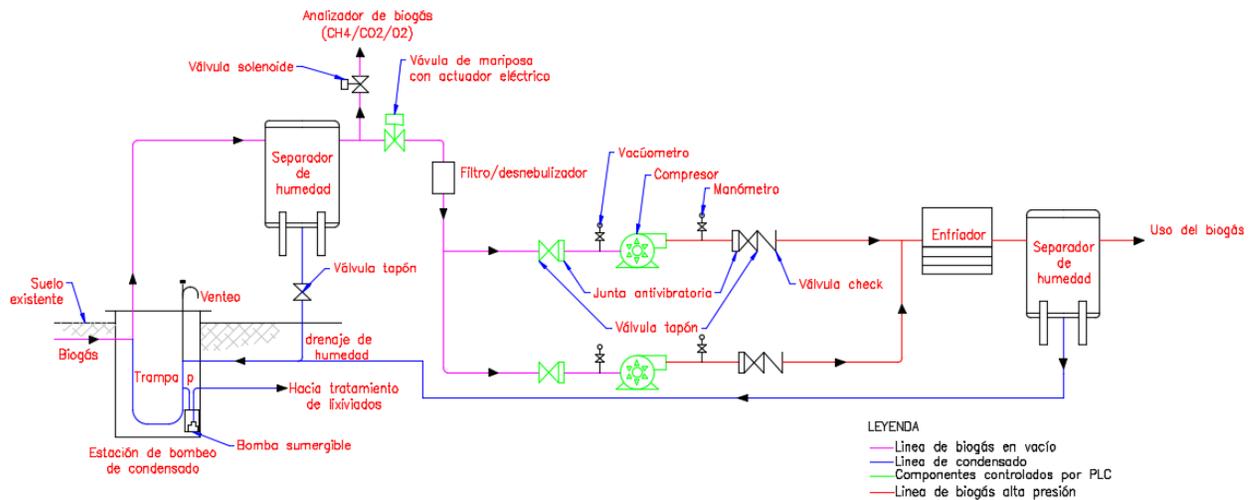


Figura 6.16 Diagrama de proceso de tratamiento primario para sistemas de alta presión.
Fuente: Elaboración propia.

6.3.10 Selección de equipos de extracción y componentes auxiliares

Además de las pérdidas de presión en los ductos colectores y la requerida para mantener un determinado radio de influencia, se deben calcular las pérdidas de presión luego de los sopladores o compresores, y establecer una presión de salida requerida para los equipos de incineración o aprovechamiento energético.

A diferencia del dimensionado del sistema de ductos colectores, en que se consideraba el flujo máximo esperado de biogás, el de los equipos de extracción debe considerar la variación del flujo de biogás, para poder expandir el sistema cuando sea requerido.

La selección debe realizarse buscando un equipo de extracción, que tenga una curva característica y adecuada para operar en el punto deseado. El sistema debe tener como mínimo cierto nivel de redundancia, por lo que se recomienda tener por lo menos dos sopladores o compresores.

Como consecuencia de las grandes variaciones en el flujo de biogás, se deben considerar variadores de frecuencia, para otorgar flexibilidad al sistema y adaptar en forma eficiente los equipos de extracción a los requerimientos de flujo.

En la Figura 6.17 se observa un diagrama de proceso con los componentes típicos de una estación de extracción. La selección de equipos de extracción depende del caudal y presión requerida, en la Tabla 6.6 se muestran los equipos comúnmente utilizados.

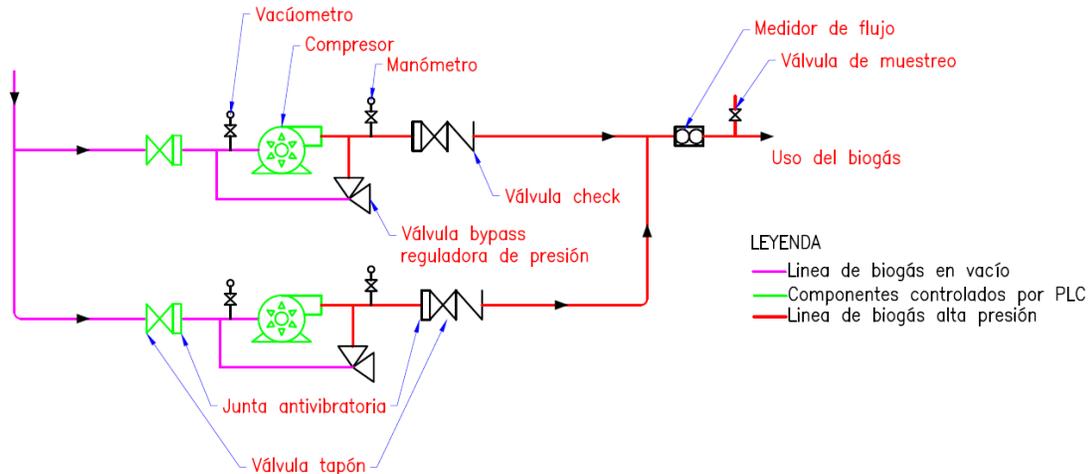


Figura 6.17 Diagrama de proceso de estación de extracción.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.6 Tipos de sopladores y compresores utilizados.

Tipo	Caudal típico [Nm ³ /h]	Aumento de presión [mbar]	Comentarios
Soplador centrifugo de 1 etapa	2.000	130	Adecuado para extracción de biogás de relleno sanitario, máquina más común. Es de bajo costo y requiere poca mantención.
Soplador centrifugo de 2 etapas	2.000	200	Adecuado para extracción de biogás de relleno sanitario, usado para transportar biogás a un cliente o para propósitos de generación de electricidad.
Soplador de lóbulos	1.000	1.500	Adecuado para impulsar biogás para equipos de generación eléctrica, no admite humedad en el gas.
Compresor rotativo de paletas	1.000	1.000	Adecuado para impulsar biogás para equipos de generación eléctrica, altos costos de operación y mantenimiento.
Compresor alternativo	1.000	>50.000	Capaz de elevar grandes presiones, se utiliza para abastecer de biogás a una industria de procesos. Altos costos de operación y mantenimiento.

Fuente: [16].

6.4 Estimación de la eficiencia de extracción y del potencial energético de un relleno sanitario.

En la Figura 6.18 se resumen las etapas para calcular la eficiencia de extracción y potencial energético de un relleno sanitario.

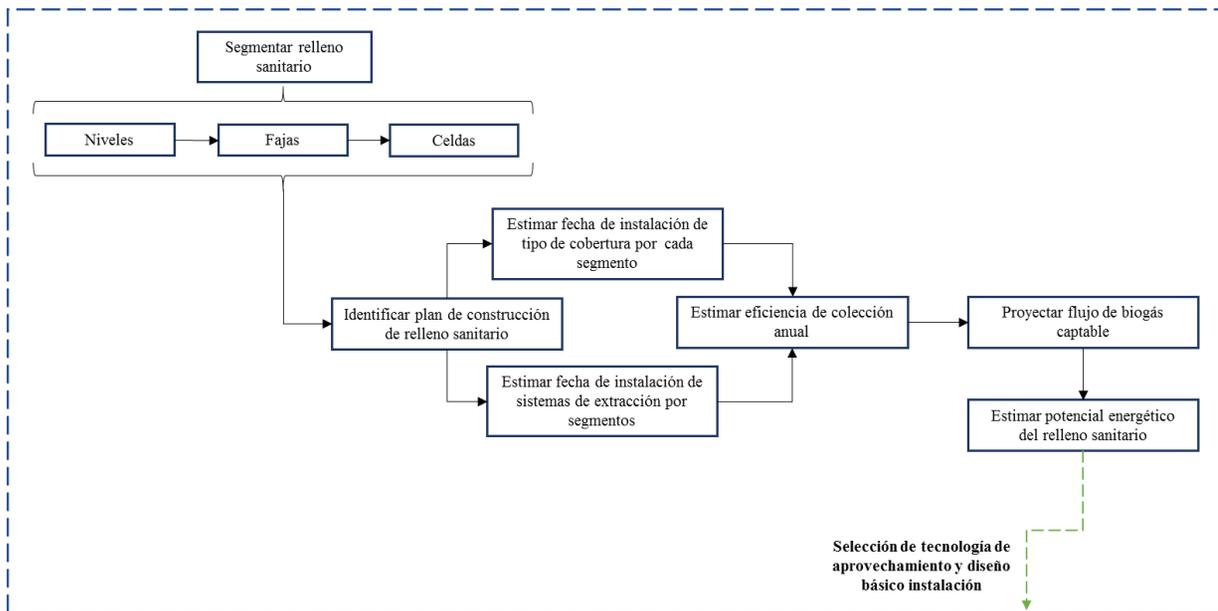


Figura 6.18 Diagrama etapa de estimación de eficiencia de extracción y potencial energético.

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de un sistema de extracción depende de varios factores, los más destacados son el diseño del sistema de extracción y el espesor e integridad del material de cobertura.

En la Tabla 6.7 se observan valores empíricos de promedios de eficiencias de extracción, según el tipo de sistema instalado y las características de las coberturas.

Tabla 6.7 Eficiencias promedio de extracción.

Tipo de cobertura	Tipo de sistema de activo de extracción	Eficiencia de extracción promedio [%]
-	Sin sistema de extracción activo	0
Cobertura diaria	Pozos verticales	67
Cobertura diaria	Trincheras horizontales	75
Cobertura intermedia	Pozos verticales	75
Cobertura intermedia	Trincheras horizontales y pozos verticales	87
Cobertura final	Pozos verticales	87
Cobertura final y geo membrana	Trincheras horizontales o pozos verticales	90

Fuente: [42].

A partir del modelo LandGEM y los valores de la Tabla 6.7, se puede estimar el biogás potencialmente extraíble, mediante el uso de la Ecuación (6.13).

$$Q_{BG_c} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 \eta_{ij} \cdot k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) (e^{-kt_{ij}}) \quad (6.13)$$

En que:

Q_{BG_c} : Caudal de biogás captable [$m^3/año$].

η_{ij} : Eficiencia de extracción de porción de residuos “j” depositadas año “i” según tipo de cobertura y sistema de extracción.

Para estimar η_{ij} , mediante los valores de la Tabla 6.7, se debe tener previamente el plan de construcción del relleno sanitario, para poder proyectar las fechas en que se dispondrán la instalación de los sistemas de extracción y los tipos de cobertura.

El plan de construcción, en general, incluye la construcción de celdas diarias que unidas conforman zanjas, y que a su vez forman niveles o terrazas. El avance en construcción e instalación de sistemas de extracción y uso de coberturas, debe ser planificado para predecir la eficiencia del sistema en el tiempo. Las celdas corresponden a la estructura básica del relleno, y están formadas por los residuos que se depositan en un día. Por normativa, las celdas deben ser tapadas diariamente con material de cobertura. Las coberturas intermedias se usan para cubrir franjas o niveles de residuos, y las porciones de estos que vayan a estar más de 180 días inactivos.

Una vez finalizada la operación de disposición, se tapa la totalidad de los desechos con una cobertura final. Para disminuir la migración de biogás, se pueden usar junto con la cobertura final, membranas sintéticas impermeables, las que permiten incrementar la eficiencia de los sistemas de extracción.

En la Figura 6.19 se observa esquemáticamente un plan de construcción de un relleno sanitario.

Para regiones inactivas del relleno sanitario, pueden instalarse sistemas de extracción activa con pozos verticales. Para las regiones operativas, se pueden instalar sistemas de extracción activa mediante colectores o trincheras horizontales. Una vez que se determina el flujo potencial de biogás captable, se calcula el poder calorífico del biogás, para estimar la potencia térmica máxima disponible.

Para obtener el valor del poder calorífico inferior del biogás, se calcula primero el poder calorífico del metano, ya que este se encuentra en mayor proporción en el biogás y es el compuesto de mayor liberación de energía cuando se requiere quemar combustible para su aplicación. El poder calorífico inferior del metano es $35.846,071 [kJ/Sm^3]$, el poder calorífico del biogás se estima con la Ecuación (6.14).

$$PCI_{BG} = f_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \quad (6.14)$$

Donde:

PCI_{BG} : Poder calorífico inferior del biogás [kJ/m^3].

f_{CH_4} : Fracción en volumen de metano contenido en biogás.

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano [kJ/m^3].

La potencia térmica máxima disponible se calcula con la Ecuación (6.15).

$$P_t = Q_{BG_c} \cdot PCI_{BG} \quad (6.15)$$

En que:

P_t : Potencia térmica disponible [kJ/año].

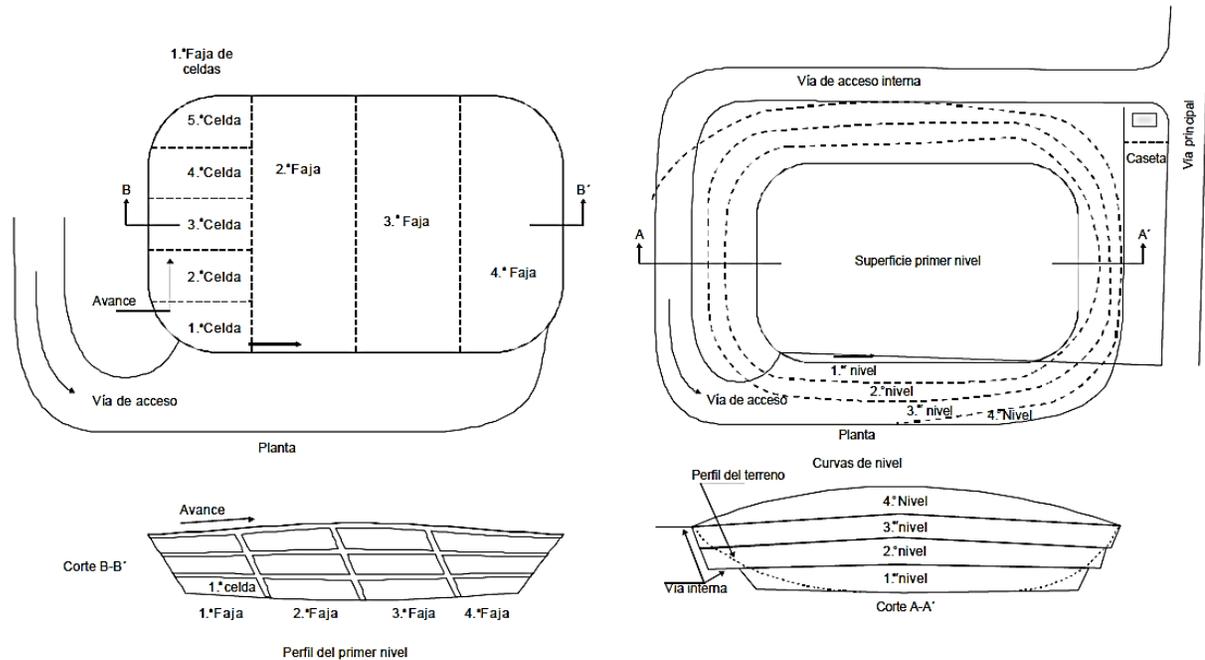


Figura 6.19 Planificación de construcción de un relleno sanitario.

Fuente: [6].

Dependiendo de la potencia térmica disponible, será conveniente un proyecto de generación eléctrica. Un valor referencial en Chile sugiere que los proyectos eléctricos son factibles económicamente sobre los 4 [MWe] [37].

6.5 Selección de tecnologías de aprovechamiento

La elección del tipo de aprovechamiento energético depende del tamaño del relleno sanitario y la tasa de producción de biogás. Sin embargo, también depende de otras condiciones específicas del sitio, que pueden llegar a favorecer a un determinado proyecto. Entre estos factores se destacan:

- Distancia de puntos de conexión a la red eléctrica.
- Certidumbre en la disposición de residuos.
- Normas y regulaciones locales.
- Cantidad, calidad y duración de la recuperación de biogás.
- Presencia de un potencial usuario de biogás para uso directo.
- Costos de inversión y operación, incluyendo costos de transporte.
- Disponibilidad de provisión de equipos o tecnologías.
- Habilidad para conseguir contratos de venta de energía o venta de biogás.
- Precios de mercado para productos finales.

Un aspecto clave en la selección de la tecnología de aprovechamiento es determinar el tamaño óptimo de un proyecto de biogás. Esto es fundamental y requiere un cuidadoso balance entre la máxima capacidad de utilización del biogás y su tasa de extracción, con el fin de minimizar el riesgo de sobredimensionar los equipos o desperdiciar el biogás potencialmente extraíble. Este problema surge por la variación en la producción de biogás en el tiempo y la incertidumbre en su

estimación, lo que adiciona un elemento más al inherente riesgo de un proyecto. Es importante considerar que la tecnología seleccionada tenga los mecanismos para abordar esta dificultad.

En proyectos térmicos se puede diversificar el consumo de biogás en varios clientes pequeños, para minimizar el riesgo de desperdicio de biogás. Pero esto eleva los costos de inversión para la impulsión y transporte de biogás a cada consumidor final.

En proyectos eléctricos, para minimizar el riesgo, se adopta un criterio de diseño modular en el que se instalan pequeñas unidades de producción, las que permiten adaptarse de forma precisa a la tasa de generación de biogás en el tiempo. Esto último maximiza el aprovechamiento del biogás y la generación eléctrica. Pero puede conducir a costos de instalación demasiado elevados. Los proyectos eléctricos suelen rentabilizarse sobre los 4 [MWe].

A partir de los criterios anteriores, se debe seleccionar una tecnología de aprovechamiento a partir de las cuatro tecnologías seleccionadas:

- Motores a combustión interna (Proyectos de 4 [MWe] a 12 [MWe]).
- Microturbinas (Proyectos de 30 [kWe] a 2.000 [KWe]).
- Calderas para uso directo del biogás en calefacción mediante suministro de agua caliente o vapor. (Proyectos desde 300 [kWt]).
- Evaporación de lixiviados (Proyectos para tratar desde 5.000 galones por día).

A continuación se describe cada tecnología con mayor detalle.

6.5.1 Generación eléctrica a gran escala con motores a combustión interna.

Una instalación de generación eléctrica con motores de combustión suele realizarse para proyectos entre los 4 [MWe] a 12 [MWe]. La implementación es por etapas, para que puedan adaptarse al aumento del flujo de biogás esperado. La eficiencia eléctrica de una de estas máquinas está entre 32% a 40%.

Los motores de producción eléctrica con biogás están disponibles comercialmente en unidades completas, junto a las de generación eléctrica con potencial que están entre 0.5 [MWe] a 3 [MWe]. Motores que operan con gas natural o biogás suelen ser motores encendidos por chispa que operan con el ciclo Otto.

Además de los motores, se requieren una serie de equipos o componentes auxiliares como:

- Sistemas de refrigeración para los motores, los que habitualmente se componen de circuitos cerrados, enfriados por aero-enfriadores o radiadores, por los que circula el líquido refrigerante.
- Sistemas de escape de gases para los motores.
- Estanques de aceite para lubricación.
- Switchgear para funciones de protección, control, medición y sincronización de los generadores con la red.
- Sistema de acondicionamiento de biogás.
- Sistema de antorchas para combustionar excesos de biogás.

El sistema de acondicionamiento de biogás debe incluir tratamientos primarios y secundarios. Los tratamientos primarios fueron descritos como parte del sistema de extracción. Los tratamientos secundarios se encargan de la eliminación de contaminantes, como siloxanos y sulfuro de hidrógeno. La tendencia es usar medios absorbentes como carbón activado o sílica gel. Existen sistemas de tratamiento completos disponibles en el comercio.

El dimensionamiento de todos los sistemas anteriores está directamente relacionado con la tasa de producción de biogás, en la Figura 6.20 se observa una curva típica de cómo se expande la capacidad instalada del sistema de acuerdo a la producción de biogás.

Los motores pueden ser equipados con módulos de cogeneración, para aprovechar energía térmica de gases de escape, del sistema de enfriamiento, para ofrecer típicamente:

- Vapor de hasta 15 [bar] mediante utilización de energía de gases de escape y producción de agua caliente a 90 [°C] dado por el sistema de enfriamiento del motor.
- Producción de agua caliente a 100 [°C], suplementando temperatura de gases de escape y sistema de enfriamiento del motor.
- Generación de aire caliente mediante intercambiadores de calor.

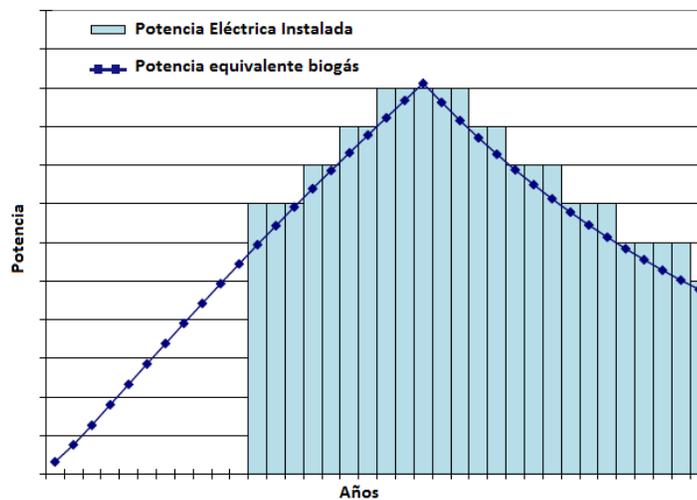


Figura 6.20 Dimensionamiento y expansión sistema de generación eléctrica.

Fuente: [19].

Dependiendo de la normativa, pueden requerirse tratamientos para los gases de escape para disminuir emisiones de NO_x y CO , y así dar cumplimiento de los límites de emisión, en particular para el Plan de prevención y descontaminación de la Región Metropolitana.

En Figura 6.21 se observa un diagrama de procesos tipo de una instalación de generación eléctrica con biogás.

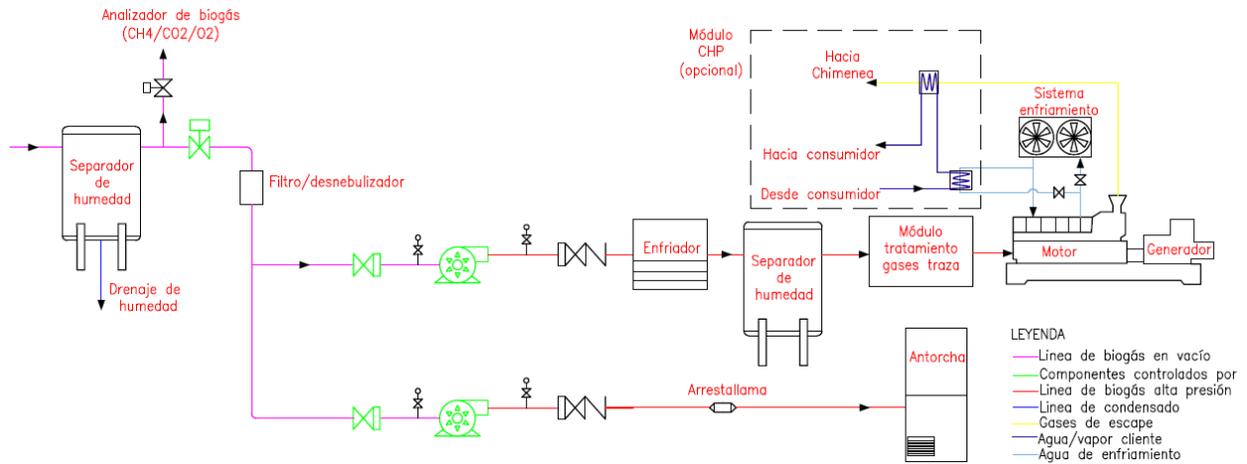


Figura 6.21 Diagrama de procesos instalación con motores a combustión interna.
Fuente: Elaboración propia.

6.5.2 Generación eléctrica y cogeneración a pequeña escala con microturbinas

Las microturbinas tienen potencias que van desde los 30 [kW] a 300 [kW]. Existen paquetes con múltiples microturbinas que alcanzan potencias de hasta 1 [MW]. Estas pueden operar con varios combustibles tales como: gas natural, biogás, diésel, gasolina, entre otros.

Las microturbinas operan mediante el ciclo termodinámico de Brayton, al igual que las turbinas a gas convencionales. Tienen una eficiencia eléctrica en torno a 15% a 30%. En la Tabla 6.8 están las principales características de estos equipos. En la Figura 6.22 se observa un diagrama de proceso con los componentes básicos de una microturbina.

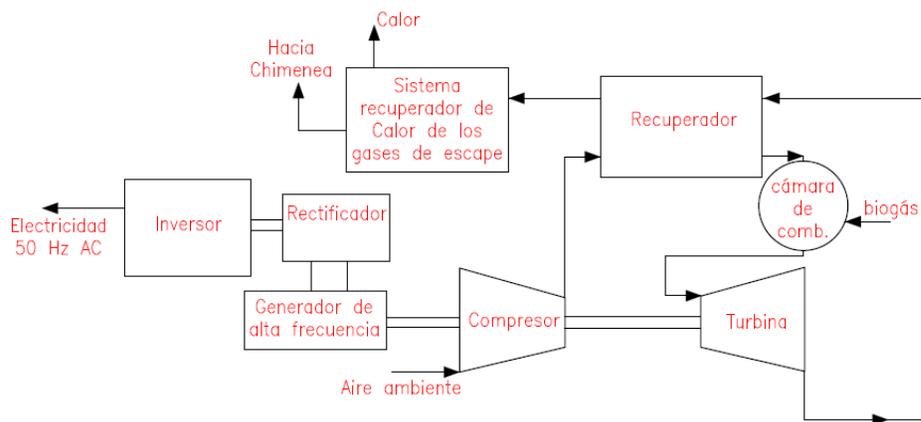


Figura 6.22 Diagrama de proceso de funcionamiento de una microturbina.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.8 Principales características de las microturbinas.

Potencia eléctrica	Disponibles de 30 [kW] a 330 [kW]
Calor residual	Temperatura de gases de escape de 260°C a 320°C, aprovechable para necesidades térmicas como, generación de agua caliente, vapor o refrigeración por absorción.
Flexibilidad del uso de combustibles	Pueden utilizar diversos tipos de combustibles como: gas natural, biogás, diésel, gasolina. Permite operar con biogás de bajo poder calorífico (en torno a 30% metano).
Confiabilidad y vida útil	Su vida útil se estima de 40.000 a 80.000 horas con overhaul.
Emisiones atmosféricas	Bajas emisiones de NO _x y compuestos orgánicos volátiles, en comparación con los motores de combustión interna.
Modularidad	Múltiples unidades pueden ser conectadas en paralelo para proveer grandes potencias en forma confiable.
Operación a media carga	Equipos pueden operar a media carga sin pérdidas tan grandes de eficiencia.
Dimensiones y peso	Ocupan un volumen aproximado de 0,7 [m ³] y 20[kg] por kilowatt de potencia.

Fuente: [8].

Los tratamientos previos al biogás, para operar una microturbina, incluyen la remoción de humedad, siloxanos y compuestos sulfurados. Los requerimientos específicos varían dependiendo del fabricante de la microturbina. Los tratamientos más comunes consisten en el enfriamiento para eliminar humedad, y tratamientos de carbón activado para remover componentes trazas del biogás.

6.5.3 Uso directo del biogás para producción de vapor o agua caliente

Para generar vapor o agua caliente se usan sistemas de caldera con quemadores de gas. Prácticamente cualquier caldera comercial sirve, pero deben tomarse algunas consideraciones para operar con biogás.

Producto del menor poder calorífico del biogás, comparado con el gas natural, se crea la necesidad de un sistema que pueda manejar mayores volúmenes de gas, con caídas de presiones mínimas. Se debe escoger adecuadamente el quemador para proveer la velocidad correcta al gas, y para una mezcla eficiente con combustible. Producto de elementos sulfurados contenidos en el biogás, es preferible componentes cuyos materiales sean resistentes a la corrosión.

Otro aspecto a considerar son las variaciones en el flujo de biogás. Es habitual pensar en un sistema de combustible dual (biogás- gas natural), en que el gas natural actúa de combustible de respaldo para proveer un suministro continuo. Lo anterior debe ir acompañado de un sistema de control adecuado.

Los principales componentes para operar una caldera con biogás son:

Línea o Tren de gas: Se debe tener un tren de gas separado para el gas natural y el biogás. Los trenes de gas para biogás tienen componentes (válvulas e interruptores) con mayor resistencia a la corrosión. Los trenes de biogás tienen dos válvulas automáticas de seguridad, para impedir la

filtración de compuestos corrosivos a la caldera cuando no esté en uso. En la Figura 6.23 se observa un esquema de tren de gas para biogás y gas natural.

Regulador de presión: El biogás se suministra a presión relativamente baja (15 [mbar] a 40[mbar]), y el regulador de presión permite trabajar con grandes flujos de biogás con caídas de presión mínimas. Debe considerarse un factor de seguridad en la elección del regulador de presión, ya que los fabricantes dimensionan en base al flujo de gas natural.

Quemador dual: Quemador con combustible de respaldo al biogás, habitualmente de gas natural.

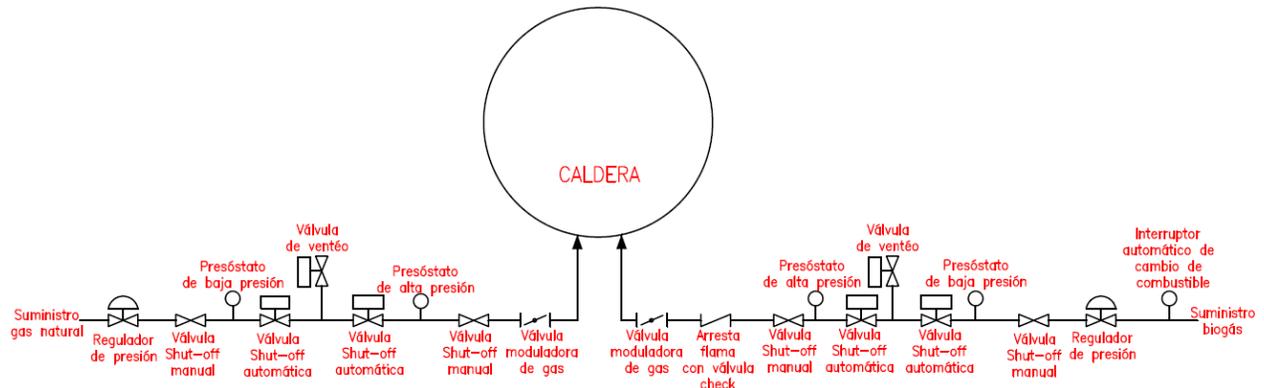


Figura 6.23 Tren de gas para calderas de biogás.

Fuente: Elaboración propia.

6.5.4 Evaporación de lixiviados

El biogás puede ser usado directamente para evaporar los lixiviados, de forma de reducir la cantidad de este que debe ser tratado y trasladado. Es adecuado cuando el tratamiento de lixiviados es caro o el lixiviado exige gran volumen y el espacio es limitado, en efecto, es posible reducir a menos del 5% del volumen original de lixiviado [43]. Los gases generados deben tratarse y eliminarse en forma segura. Los evaporadores de descarga directa operan con bajos requerimientos de biogás, los diseños modernos emplean aproximadamente 0,15 [m³/h] de biogás para tratar 1 [l/h] de lixiviado [11].

Existen distintas alternativas comerciales de evaporadores, que se diferencian en la forma en que se transmite el calor de los gases de combustión al lixiviado, existen de contacto directo e indirecto.

Los equipos más instalados en este tipo de proyecto emplean contacto directo para la transferencia de calor entre gases de escape de la combustión y el lixiviado, lo habitual es un estanque con un volumen de lixiviado en el cual los gases son inyectados, burbujando el lixiviado. Dependiendo del fabricante, la unidad de combustión del biogás puede estar en la parte superior o inferior del estanque.

Los gases producidos de la evaporación del lixiviado esta compuestos por cantidades trazas de variados gases orgánicos. Los gases son tratados con un desnebulizador (demister) que condensa y retorna gotas de agua y partículas al evaporador, los gases pueden ser descargados directamente por chimeneas. Para controlar problemas de olor debido a los compuestos orgánicos volátiles, los gases pueden ser oxidados y aprovechados inyectándolos en los anillos de inyección de vapor de las antorchas (cerradas) de quema de biogás para prevenir la formación de humos, la combustión

permite reducir en un 98% los compuestos orgánicos volátiles, en este caso los requerimientos de biogás son mayores, requiriéndose aproximadamente 0,53 [m³/h] de biogás para tratar 1 [l/h] de lixiviado.

El lixiviado concentrado puede ser dispuesto nuevamente en el relleno sanitario en una sección dedicada específicamente para este propósito.

En la Figura 6.24 se observa un esquema de este tipo de instalación.

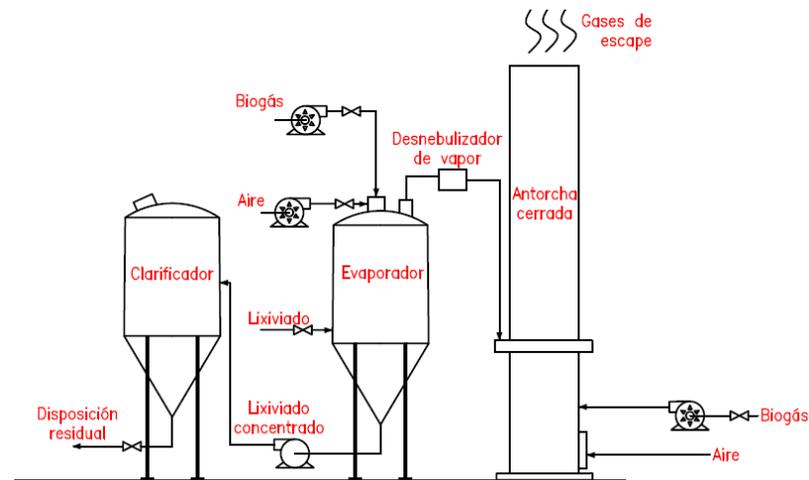


Figura 6.24 Diagrama de proceso de evaporación de lixiviado.

Fuente: Elaboración propia.

6.6 Selección de equipos

A la hora de seleccionar un tipo de tecnología de aprovechamiento energético, se debe analizar la disponibilidad comercial de cada tecnología. En esta sección se hace una pequeña revisión de equipos disponibles y fabricantes especializados.

6.6.1 Equipos de compresión, limpieza y secado de biogás.

Pioneer Air Systems

Pioneer Air Systems es una empresa que provee productos y soluciones de ingeniería en el área de compresión, filtración y secado de gases, en particular, posee una línea de productos para sistemas de tratamiento para sistemas de biogás. Esta empresa provee soluciones integrales o equipos por separado.

Para tratamiento de biogás de relleno, dependiendo de la eficiencia requerida en el tratamiento, algunas de las alternativas disponibles son:

- R Economy:
 - Compresión.
 - Tratamiento primarios previo a compresión.
 - Enfriamiento con intercambiador de calor refrigerante-gas.

- Filtración.
- Secado.
- Remoción de 60% de contaminantes, para operación en calderas o motores.
- R Series:
 - Elementos de R Economy.
 - Evaporación de humedad.
 - Pre enfriamiento gas-gas y recalentador.
 - Remoción de 75% de contaminantes, para operación en motores y turbinas.
- R Series plus:
 - Elementos de R Series.
 - Adsorción con carbón activo.
 - Filtración final.
 - Remoción de 99% de contaminantes, para operación con motores y turbinas.

Los sistemas anteriores, existen en unidades comerciales que van desde 170 [m³/h] a 5100 [m³/h] de biogás, la selección se cada sistema depende de la tecnología de aprovechamiento que se utilice y características específicas de los equipos de combustión.

6.6.2 Motores de combustión interna

Caterpillar

Desde la década de 1920, Caterpillar ha diseñado y construido motores para la producción de energía. Actualmente Caterpillar proporciona soluciones completas de gas, desde sistemas mecánicos tales como sistemas del tren de combustible a gas y de recuperación térmica, hasta el post-tratamiento del escape que cumple con las normas más exigentes de emisiones en el mundo.

En la Tabla 6.9 están las especificaciones de motores de la Serie G3500 CAT.

Tabla 6.9 Especificaciones Motores Serie G3500 CAT

Modelo	G33508A	G3512A	G3516A	G3516A+	G3520C
Potencia eléctrica [kW]	457	777	1.041	1.105	1.991
Eficiencia eléctrica [%]	30,1	30,8	32,1	36,8	39,3
Eficiencia térmica [%]	49,3	52,7	47,0	41,5	44,7
Eficiencia Total [%]	79,4	83,5	79,1	78,3	84,0

Waukesha

Waukesha es una empresa americana comercializadora de grandes motores alternativos producidos por GE Energy. Motores Waukesha provee de grandes motores de combustión interna para usos industriales.

En la Tabla 6.10 se observa las especificaciones técnicas del modelo APG1000 apta para generar electricidad mediante combustión de biogás.

Tabla 6.10 Especificaciones Motor APG1000 Waukesha

Modelo	APG1000 Standard	APG1000 CHP
Potencia eléctrica [kW]	1000	1000
Eficiencia eléctrica [%]	42,0	42,0
Eficiencia térmica [%]	35,0	42,1
Eficiencia Total [%]	77,0	84,1

MWM

MWM es una empresa que tiene más de 135 años de experiencia en el desarrollo y optimización de los motores de combustión para gas natural, gases especiales y combustibles diesel. MWM desarrolla y fabrica soluciones personalizadas para los requisitos individuales mediante su experiencia en el área de ingeniería.

En la Tabla 6.11 se observan las especificaciones técnicas de la serie TCG 2020.

Tabla 6.11 Especificaciones Motores serie TCG 2020 MWM

Modelo	TCG 2020 V12	TCG 2020 V16	TCG 2020 V20
Potencia eléctrica [kW]	1235	1605	2056
Eficiencia eléctrica [%]	42,0	41,7	42,0
Eficiencia térmica [%]	43,9	44,2	43,8
Eficiencia Total [%]	85,9	85,9	85,8

6.6.3 Microturbinas

Capstone Turbina Corporation

Capstone es una empresa internacional que desarrolla y fabrica microturbinas para sistemas de generación, esta empresa ha despachado miles de microturbinas a clientes en todos los continentes, otorgando proyectos desde 30 [kW] a 30 [MW]. Capstone tiene 95 distribuidores en todo el mundo.

Capstone posee una línea de microturbinas que operan con combustibles alternativos renovables, en los cuales está incluido el biogás, en la Tabla 6.12 se observan las especificaciones de estos modelos.

Tabla 6.12 Especificaciones Microturbinas CR Capstone

Modelo	CR30	CR65	CR200
Potencia eléctrica [kW]	30	65	200
Eficiencia eléctrica [%]	26	29	33
Temperatura gases de escape [°C]	275	309	280
Caudal gases de escape [kg/s]	0,31	0,49	1,33

Ingersoll Rand

Ingersoll Rand es una empresa industrial diversificada mundialmente, con más de 100 años de experiencia en productos, servicios y soluciones que mejoran la eficiencia energética, entre otros desarrollos. Entre sus líneas de productos se encuentran microturbinas para generación eléctrica

En la Tabla 6.13 se observan las especificaciones de los 2 modelos de microturbinas que disponen.

Tabla 6.13 Especificaciones Microturbinas Ingersoll Rand

Modelo	MT70	MT250
Potencia eléctrica [kW]	70	250
Eficiencia eléctrica [%]	28	29
Temperatura gases de escape [°C]	248	242
Caudal gases de escape [kg/s]	0,61	2,13

6.6.4 Tren de gas y quemadores para calderas.

Cleaver Brooks

Cleaver Brooks es una empresa especialista en soluciones de calderería, desarrolla diversos productos de generación de agua caliente y vapor.

Esta empresa posee líneas de productos para la aplicación de calderas con combustibles alternativos, entre los que se incluye biogás de relleno sanitario. Entre algunos de sus productos se encuentran quemadores de biogás, quemadores de combustible dual gas natural/biogás, sistemas de control para la combustión y tren de gas para biogás.

6.6.5 Evaporadores de lixiviado

Existen empresas que prestan soluciones de ingeniería a la medida de los requerimientos del cliente, como también hay fabricantes que cuentan con modelos estandarizados de diversas capacidades, se destacan las siguientes empresas:

CB&I, LFG Specialties

CB&I es un gran conglomerado multinacional de ingeniería y construcción, especializado en proyecto de gas y petróleo. LFG Specialties es una división dedicada al suministro de equipos dedicados a la recuperación, control y aprovechamiento del biogás. LFG Specialties posee la patente del modelo E-VAP, que consiste en un evaporador de lixiviado de intercambio directo entre gases de combustión y lixiviado. LFG Specialties provee de soluciones de ingeniería y construcción de acuerdo a los requerimientos del cliente. En la Figura 6.25 se ve el sistema E-VAP.

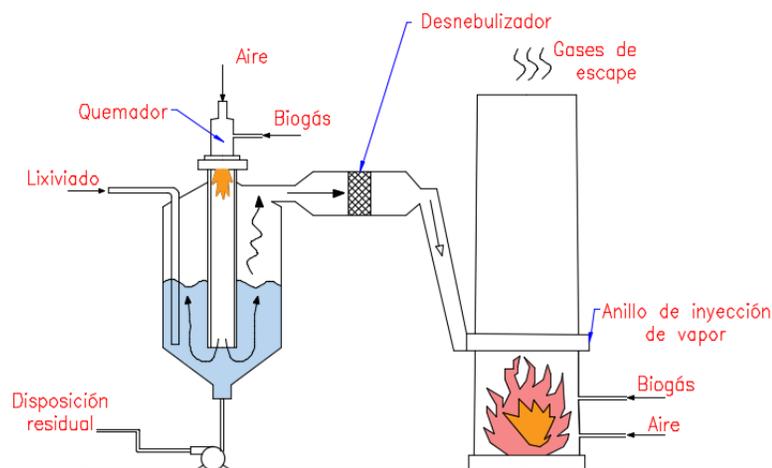


Figura 6.25 Sistema E-VAP para evaporación de lixiviados con biogás.

Fuente: Elaboración propia

Instalaciones actuales permiten reducir hasta 9,8% del volumen original de lixiviados, que utilizan aproximadamente 500 [ft³/min] para tratar 30.000 [gpd].

ENCON Evaporators

Esta empresa dispone de evaporadores de lixiviado comerciales, entre ellos un modelo denominado Thermal Encon evaporator permite el uso del biogás como fuente de energía para la evaporación, este modelo de evaporador está disponible en las siguientes capacidades: 10, 18, 28, 35, 58, 60, 72, 96, 126, 165, 192, 260 y 400 galones por hora.

Heat transfer international (HTI)

HTI es una empresa especialista en diseñar, fabricar e instalar plantas de energía renovable con biocombustible y conversión de residuos a energía.

HTI ha desarrollado un sistema que aprovecha la combustión del biogás para calentar aire indirectamente mediante un intercambiador de calor cerámico, para luego evaporar el lixiviado mediante intercambio de calor indirecto con aire caliente.

6.7 Estimación de Inversiones (CAPEX)

A continuación se presentan valores unitarios para estimar las inversiones de cada tipo de proyecto.

Los valores se obtienen de la herramienta “LFGcost-Web – Landfil Gas Energy Cost Model” [44], herramienta provista por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), dichas estimaciones tienen una precisión del $\pm 30\%$.

Los valores son ajustados con la inflación de E.E.U.U al año 2015 y un valor del dólar de 705 [CLP].

En caso de activos comprados en el extranjero (motores, microturbinas, compresores, etc) se agrega un 20% de sobrecargo como aproximación de costos de internación.

Se considera al igual que los otros proyectos un sobrecargo de 5% por concepto de desarrollo de ingeniería y gestión del proyecto, y un 25% de margen adicional sobre el total por la ejecución del proyecto.

6.7.1 Sistema de extracción de biogás

La estructura de costos de construcción y montaje para el sistema de extracción se observa en la Tabla 6.14:

Tabla 6.14 Costos sistema de extracción de biogás.

Componentes	Costo	Unidad
Gestión y transporte de materiales	14.000.000	[CLP]
Excavación	2.950.000	[CLP/pozo]
Pozos de extracción vertical	200.000	[CLP/m]
Trincheras horizontales	105.000	[CLP/m]
Cabezales de pozo	500.000	[CLP/pozo]
Ductos laterales	30.000	[CLP/m]
Ductos intermedios o principales	75.000	[CLP/m]
Sopladores 500 [m ³ /h] a 1.000 [m ³ /h]	30.000	[CLP/(m ³ /h)]
Sopladores mayor a 5.000 [m ³ /h] (sopladores multi-etapa)	19.000	[CLP/(m ³ /h)]
Trampas de condensado	6.000.000	[CLP/unidad]
Cárcamos de condensado con bombeo	16.800.000	[CLP/unidad]
Ingeniería y administración	500.000	[CLP/pozo]
Antorchas de llama cerrada de 1000 [m ³ /h] (opcional)	135.000.000	[CLP/unidad]
Antorchas de llama abierta de 30 a 1500 [m ³ /h] (opcional)	23.000.000	[CLP/unidad]

Fuente: Adaptado de [44], [45], [46] y [12].

6.7.2 Proyecto de generación eléctrica con motores a combustión interna

La estructura de costos de construcción y montaje de un proyecto de generación eléctrica con motores de combustión interna se ve en la Tabla 6.15:

Tabla 6.15 Costos proyecto generación eléctrica con motores a combustión interna.

Componentes	Costo	Unidad
Equipos de compresión, tratamiento de biogás y obras civiles	790.000.000	[CLP]
Motor de combustión interna	936.000	[CLP/kW]
Subestación eléctrica	213.000.000	[CLP]
Interconexión eléctrica	388.000.000	[CLP/km]
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería	5% de la inversión	[CLP]

Fuente: Adaptado de [44] y [46].

6.7.3 Proyecto de cogeneración con microturbinas

La estructura de costos de construcción y montaje de un proyecto de cogeneración con microturbinas está en la Tabla 6.16:

Tabla 6.16 Costos proyecto cogeneración con microturbinas.

Componentes	Costo	Unidad
Microturbina, sistema de tratamiento y recuperador de calor.	Ecuación (6.16)	[CLP]
Ductos de gas	150.000	[CLP/m]
Trincheras y ductos de agua	250.000	[CLP/m]
Bomba de circulación	14.400.000	[CLP]
Líneas de transmisión	167.000	[CLP/m]
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería.	5% de la inversión	[CLP]

Fuente: Adaptado de [44] y [45].

El costo de la microturbina y sistemas de tratamiento depende de la potencia eléctrica instalada, su valor se puede estimar de acuerdo a la Ecuación (6.16), la cual permite cuantificar las economías de escala, se agrega un sobrecargo del 6% para considerar el sistema de recuperación de calor.

$$C_{MT} = (14.440.000 \cdot P_{MT}^{0,6207}) \cdot (1 + 0,06) \quad (6.16)$$

Donde:

C_{MT} : Costo microturbina junto con recuperador de calor [CLP].

P_{MT} : Potencia eléctrica instalada [kW].

6.7.4 Proyecto uso directo de biogás para producción de ACS y/o vapor.

La estructura de costos de construcción y montaje de este tipo de proyecto está en la Tabla 6.17:

Tabla 6.17 Costos proyecto de generación de vapor y/o agua caliente.

Componentes	Costo	Unidad
Caldera	52.000	[CLP/kW]
Instalación de estación de regulación y medición de biogás	^(*) 57.000.000	[CLP]
Modificación de quemador y control automático	Ecuación (6.17)	[CLP]
Estación de filtración, compresión y deshidratación	Ecuación (6.18)	[CLP]
Ducto caldera a usuario final	^(*) Ecuación (6.19)	[CLP]
Ducto de relleno sanitario a caldera	^(*) Ecuación (6.20)	[CLP]
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería.	5% de la inversión	[CLP]

^(*) Costos para sistemas de menos de 1000 [ft³/min] de biogás.

Fuente: Adaptado de [44].

El costo de resintonizar una caldera, incluyendo las modificaciones en su sistema de control se aproxima mediante la Ecuación (6.17):

$$C_{RC} = 51.550 \cdot Q_{\max \text{ biogás}} + 60.566.000 \quad (6.17)$$

Donde:

C_{RC} : Costo de resintonizar caldera [CLP].

$Q_{\max \text{ biogás}}$: Flujo de biogás de diseño [m³/h].

El costo de la estación de tratamientos previos a la caldera se estima con la Ecuación (6.18):

$$C_{ST} = 152.000 \cdot Q_{\max \text{ biogás}} + 598.000.000 \quad (6.18)$$

En que:

C_{ST} : Costo sistema de tratamiento y compresión [CLP].

Los costos del ducto desde la caldera hasta el cliente final y del ducto desde el relleno sanitario a la caldera se estiman con las Ecuación (6.19) y la Ecuación (6.20) respectivamente:

$$C_D = 177.000 \cdot L_D + 63.343.000 \quad (6.19)$$

Donde:

C_D : Costo ducto entre caldera y cliente final [CLP].

L_D : Largo ducto desde caldera hasta usuario final [m].

$$C_{DRS} = 189.000 \cdot L_{DRS} + 128.125.000 \quad (6.20)$$

Donde:

C_{DRS} : Costo ducto entre relleno sanitario y caldera [CLP].

L_{DRS} : Largo ducto desde relleno sanitario y caldera [CLP].

En caso de considerar proyectos de calefacción o agua caliente distrital, las inversiones estimadas están en la Tabla 6.18, estos valores son para zonas de alta densidad poblacional (en torno a 42 viviendas por hectárea), pudiendo resultar mayores en comunidades dispersas.

Tabla 6.18 Inversiones de redes distritales.

Componentes	Costo	Unidad
Red de distribución	870.000	[CLP/vivienda]
Sistema de distribución interior de viviendas solo ACS	1.638.500	[CLP/vivienda]
Sistema de distribución interior de viviendas solo ACS y calefacción	2.230.000	[CLP/vivienda]

Fuente: Elaboración propia a partir de [47].

6.7.5 Proyecto de evaporación de lixiviados

En el caso de este tipo de proyectos, los costos principales corresponden a: la unidad de evaporación, estanques de almacenamiento de lixiviado, sistema de control y costos de ingeniería y gestión de proyecto. Los costos estimados de inversión de un proyecto de evaporación de lixiviado son: 6.000.000 [CLP/(m³ de lixiviados/día)] [16].

6.8 Estimación de costos de operación y mantenimiento (OPEX)

Algunos valores referenciales de costos de operación y mantenimiento se observan en la Tabla 6.19, además de los consumos eléctricos de los equipos auxiliares (bombas, sopladores, compresores, ventiladores, etc.) los cuales deben ser valorizados como costos en proyectos que no sean de generación eléctrica.

Tabla 6.19 Costos de operación y mantenimiento por tipo de proyecto.

Componente	Costo	Unidad
Sistema de extracción de biogás		
Operación y mantenimiento ductos y pozos	1.880.000	[CLP/(pozo·año)]
Operación y mantenimiento antorcha	3.670.000	[CLP/(antorcha·año)]
Consumo eléctrico sopladores	0,07	[kWh/m ³ de biogás]
Proyecto generación eléctrica con motores a combustión interna		
Operación y mantenimiento de motores	18	[CLP/(kWh)]
Consumo eléctrico compresión y tratamiento	0,07	[kWh/kWh generado]
Proyecto de cogeneración con microturbinas		
Operación y mantenimiento microturbinas	Ecuación (6.21)	[CLP/kWh]
Consumo eléctrico equipos auxiliares.	0,17	[kWh/kWh generado]
Proyecto uso directo de biogás para producción de agua caliente y/o vapor		
Operación y mantenimiento unidad tratamiento y tuberías.	Ecuación (6.22)	[CLP/año]
Mantenimiento caldera	4% de la inversión	[CLP/año]
Consumo eléctrico	0,07	[kWh/m ³]
Proyecto de evaporación de lixiviados		
Operación y mantenimiento	5.000	[CLP/m ³ de lixiviado]
Consumo eléctrico	14,6	[kWh/m ³ de lixiviado]
Red distrital de agua caliente y vapor		
Operación y mantenimiento	120.000	[CLP/vivienda]

Fuente: Adaptado de [16] y [44].

El costo anual de operación y mantenimiento de un proyecto de cogeneración con microturbinas se estima con la Ecuación (6.21).

$$C_{MT\ O\&M} = 55,64 - 7,10 \cdot \ln(P_{MT}) \quad (6.21)$$

Donde:

$C_{MT\ O\&M}$: Costo de operación y mantenimiento microturbina [CLP/kWh].

P_{MT} : Potencia instalada en proyecto de microturbinas [kW].

Para el caso de un proyecto de uso directo del biogás para generar vapor o agua caliente, los costos de operación y mantenimiento se estiman con la Ecuación (6.22).

$$C_{UD\ O\&M} = 41.000.000 \cdot \left(\frac{Q_{biogás}}{1.190} \right)^{0,2} \quad (6.22)$$

En que:

$C_{UD\ O\&M}$: Costo operación y mantenimiento en proyecto de uso directo de biogás [CLP/año].

$Q_{biogás}$: Flujo anual promedio de biogás [ft³/min].

6.9 Análisis de factibilidad económica

El esquema para realizar la evaluación económica se observa en la Figura 6.26. Dependiendo de la naturaleza del proyecto, será necesario realizar una evaluación de la rentabilidad privada o

rentabilidad social, en efecto, dependiendo del proyecto, pueden reconocerse algunos beneficios sociales de su implementación, y por tanto puede ser explorada la oportunidad de optar a subsidios.

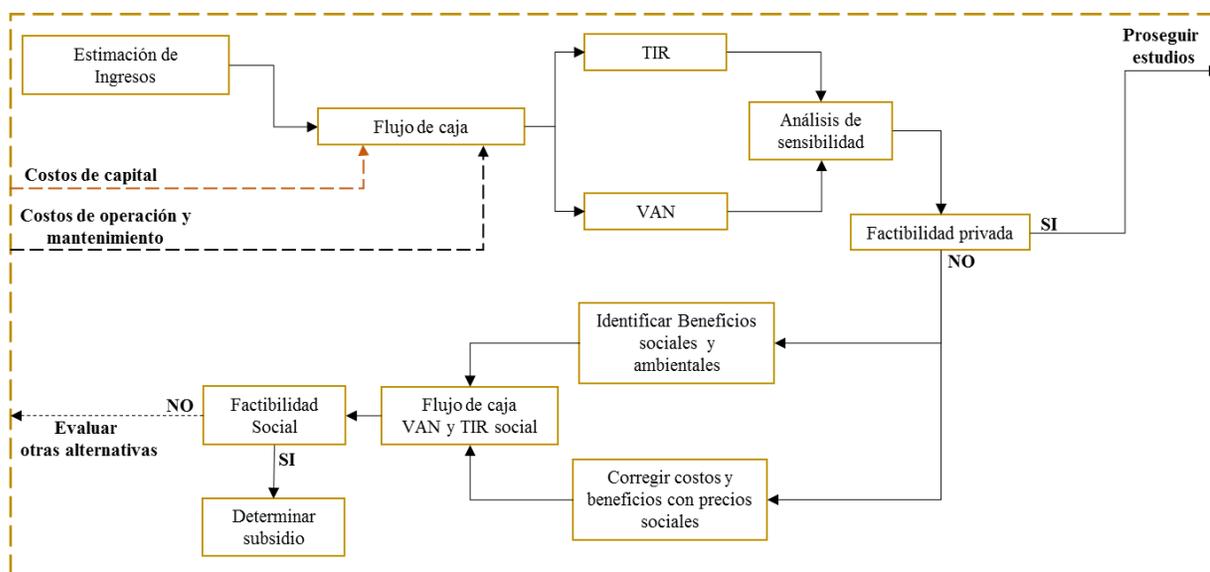


Figura 6.26 Diagrama etapa de análisis de factibilidad económica.

Fuente: Elaboración propia.

6.9.1 Estimación de ingresos

Los proyectos de biogás tienen diversas fuentes de ingreso, las cuales corresponden a:

Ingresos por venta de energía eléctrica

Principal fuente de ingreso de un proyecto de generación eléctrica. En el caso inyección de energía en la red, el precio de la energía puede estimarse mediante el precio medio de mercado (PMM), el cual corresponde al precio medio de los contratados de las empresas generadoras informados a la Comisión Nacional de Energía.

El PMM base del año 2015 en el Sistema interconectado central (SIC) y sistema interconectado del norte grande (SING) fue de 62,228 [CLP/kWh] y 57,006 [CLP/kWh] respectivamente. En la Figura 6.27 y Figura 6.28 se observa la evolución del PMM para ambos sistemas desde el año 2006 al 2015.

Un proyecto de generación eléctrica para inyección de energía a la red, también puede comercializar su energía en el mercado Spot (transacciones de energía entre generadores). En este mercado la energía es valorizada a costo marginal instantáneo. Como referencia el costo marginal promedio de la barra alto Jahuel 220 (en zona central del país) del año 2015 es de 117,9 [USD/MWh], que tienen en promedio a ser levemente mayor que PMM. El costo marginal varía mucho cada hora, y por lo tanto las transacciones en el mercado Spot son de mucho riesgo. La evolución de los costos marginales en la barra Alto Jahuel 220 se ve en la Figura 6.29.

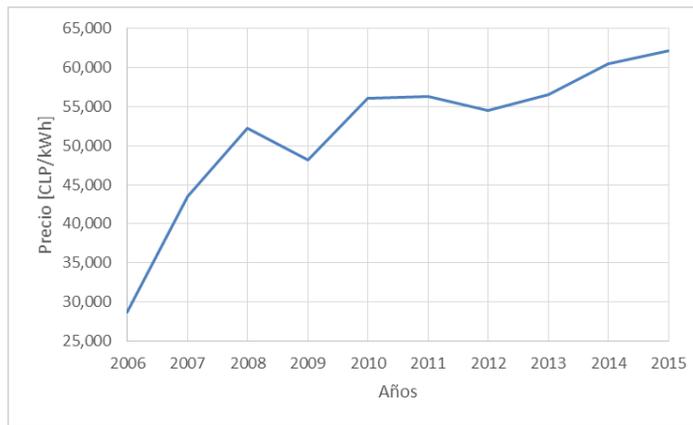


Figura 6.27 Evolución PMM SIC.

Fuente: Elaboración propia con datos de la CNE.

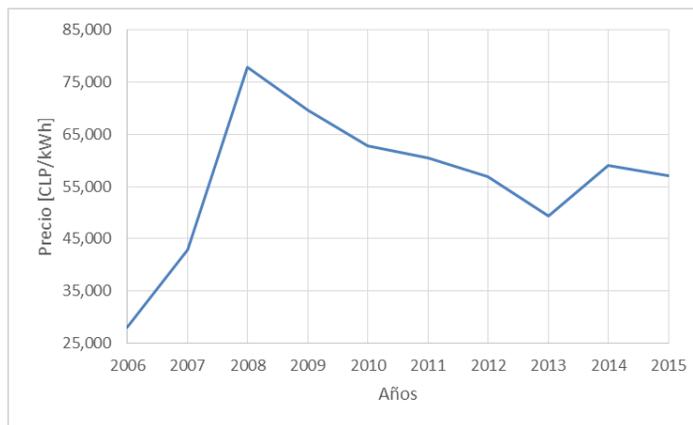


Figura 6.28 Evolución PMM SING.

Fuente: Elaboración propia con datos de la CNE.

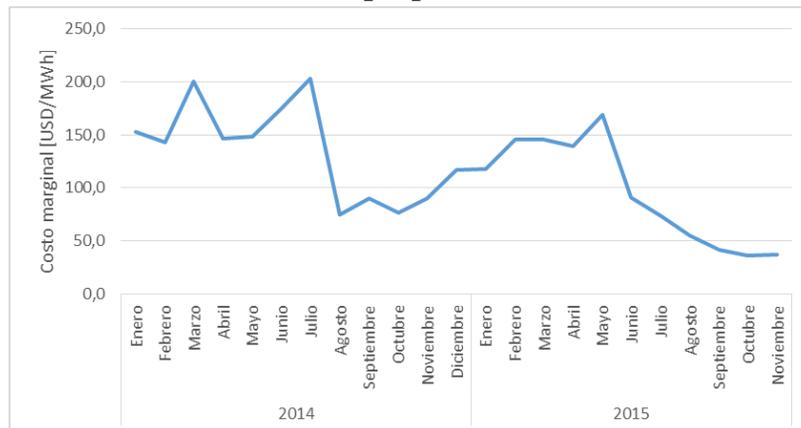


Figura 6.29 Evolución costo marginal barra Alto Jahuel 220.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CDEC-SIC.

En caso de proyectos eléctricos pequeños, que proveen electricidad directamente a una comunidad los ingresos por venta de energía se determinan con la tarifa BT1.

El precio de comercialización para inyección de un pequeño consumidor industrial puede valorizarse también al PMM.

Ingreso por venta de energía térmica

En caso de proyecto de cogeneración o de uso directo del biogás, la energía térmica generada puede ser comercializada a terceros para diversos procesos (calefacción, secado, etc.), suministrando productos como agua caliente, vapor o aire caliente. En Chile este tipo de producto es poco convencional, por lo cual no existe mercado ni precios relacionados.

Para evaluar un precio de venta de la energía térmica, puede realizarse estudios comparativos con los costos de producción de calor con combustibles fósiles. Para tener un valor referencial, se tiene que el costo aproximado que paga un usuario por energía térmica para agua caliente es de aproximadamente 56 [CLP/kWh] para gas natural y 78 [CLP/kWh] para gas licuado. Para el caso de calefacción se tiene el costo referencial de 63 [CLP/kWh] mediante el uso de parafina y 25 [CLP/kWh] para leña.

Ingreso por potencia firme

Las centrales generadoras de electricidad conectada a la red reciben un pago por capacidad o potencia, la valorización de para las transferencias de potencia corresponde al precio nudo de la potencia, este es fijado por el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC) del SIC y SING. La potencia firme la determina el CDEC, pero para efectos de estudios de perfil se puede aproximar como la potencia neta por el factor de planta de la instalación.

El promedio del valor del precio nudo de la potencia para el SIC de los últimos 5 años es de 5.079 [CLP/kW/mes] y de SING 4.327 [CLP/kW/mes].

Ingreso por comercialización de atributo ERNC o atributo verde

Según la legislación chilena, las empresas generadoras deben cumplir con un 5% del total de su generación eléctrica mediante fuentes ERNC. En casos en que las empresas no tengan capacidad propia para generar, pueden pactar cuotas de producción con otras empresas que utilicen ERNC. Debido al aumento de la matriz ERNC en Chile, el precio de las transacciones por atributo verde ha ido a la baja, lo que se puede observar en la Figura 6.30, el precio promedio de la traspasos de energía del año 2014 fue de 4.630 [CLP/MWh].

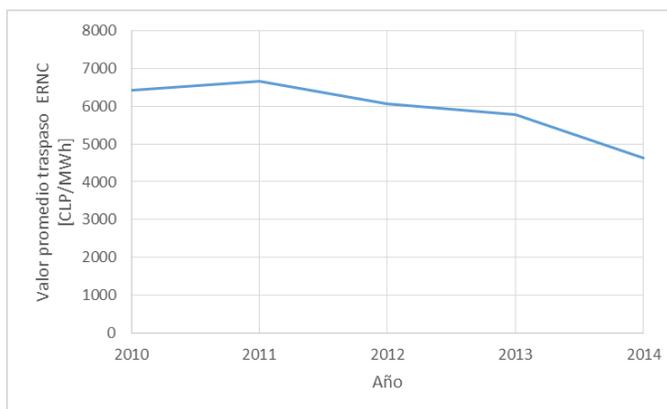


Figura 6.30 Evolución del valor promedio de traspaso de excedentes de energía ERNC.
Fuente: Elaboración propia a partir de balance anual ERNC CDEC.

Ingreso por comercialización de bonos de carbono

Los bonos de carbono o certificados de reducciones de emisiones (CER) se comercializan por concepto de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales se cuantifican mediante toneladas de CO₂ equivalentes. Una tonelada de metano emitido corresponde a 25 toneladas de CO₂ equivalente, por esta razón los proyectos de biogás generan reducciones en las emisiones de efecto invernadero, debido a la conversión de metano a CO₂ en el proceso de combustión. El cálculo de las reducciones de emisiones anuales se realiza con la Ecuación (6.23).

$$R_e = MD_p \cdot GWP - E_c \cdot CEF \quad (6.23)$$

Donde:

R_e : Reducción de emisiones [ton CO₂e].

MD_p : Metano destruido por el proyecto [ton].

GWP: Potencial de calentamiento global del metano = 25.

E_c : Energía eléctrica consumida por el proyecto [kWh].

CEF: Emisiones de CO₂ por unidad de energía eléctrica consumida [ton/kWh].

Las emisiones de CO₂ por el contenido propio del biogás y como resultado de la combustión de metano no se contabilizan en el balance, debido a que se consideran parte del ciclo natural del carbono.

El valor de los bonos de carbono ha tenido una drástica disminución en los últimos años. ProChile estima que los precios promedios de los bonos entre el año 2013 y 2020 será de 3,3 [€/ton CO₂e].

Los valores de CEF se pueden obtener de la Tabla 6.20.

Tabla 6.20 Emisiones de CO₂ equivalentes del sistema eléctrico por región.

Región	Emisión de CO ₂ por consumo eléctrico [kg CO ₂ e/kWh]
I	0,895
II	0,895
III	0,355
IV	0,355
V	0,355
VI	0,355
VII	0,355
VIII	0,355
IX	0,355
X	0,355
XI	0,160
XII	0,818
XIII	0,355
XIV	0,355
XV	0,895
RM	0,355

Fuente: [48].

Ahorro en tratamiento de lixiviado por evaporación.

En caso de proyectos de evaporación de lixiviados, pueden valorizarse los ahorros en costos de operación en contraste con otro medio de tratamiento de lixiviado. En la Tabla 6.21 se ven costos referenciales de diferentes alternativas de tratamiento.

Tabla 6.21 Rangos de costos de tratamientos de lixiviado

Tratamiento	Rango de Costo [USD/m³]
Proceso aeróbico con remoción de nitrógeno	20
Osmosis Inversa en dos etapas	7 - 10
Procesos biológico, carbón activado y precipitación	25 - 35
Transporte y tratamiento en planta química externa	27
Evaporación de lixiviado	5

Fuente: [49] y [50].

6.9.2 Flujo de caja

Los modelos generales empleados para el flujo de caja se observan en la Tabla 6.22 y Tabla 6.23, para la evaluación social y privada respectivamente. El flujo de caja permite determinar los indicadores de: Valor actual neto (VAN) y Tasa interna de retorno (TIR). El horizonte de evaluación depende de cada proyecto, es importante abarcar un periodo lo suficientemente amplio para abarcar el periodo de mayor generación de biogás en el relleno sanitario.

Tabla 6.22 Modelo de flujo de caja social.

Años	0	1
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		
Capacidad Bruta de Planta (kW)		
Capacidad Neta de la Planta (kW)		
Factor de planta(%)		
Potencia firme (kW)		
Energía eléctrica vendida (kWhe/año)		
Vapor vendido (kWht/año)		
Agua caliente vendida (kWht/año)		
Reducción de emisión de metano (ton/año)		
Reducción GEI por combustión de metano (ton CO2e/año)		
Reducción GEI por reemplazo otros combustibles (ton CO2e/año)		
Reducción GEI por reemplazo matriz eléctrica (ton CO2e/año)		
Reducción de MP(ton)		
Precio social del carbono (CLP/ton CO2e)		
Beneficio unitario salud por reducción de MP2,5 (CLP/ton MP2,5)		
Beneficio reducción de GEI por destrucción de metano(CLP/año)		
Beneficio reducción de GEI reemplazo combustibles fósiles (CLP/año)		
Beneficio reducción de GEI reemplazo electricidad de matriz (CLP/año)		
Beneficio disminución MP2,5		
Beneficios totales		
Costo O&M Red distrital		
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		
Beneficios netos		
Inversión (CLP/año)		
Valor Residual activos (CLP/año)		
Flujo no operacional		
Flujo de Caja		
Tasa de descuento (%)		
TIR		
VAN (CLP)		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.23 Modelo de flujo de caja privado.

Años	0	1
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		
Capacidad Bruta de Planta (kW)		
Capacidad Neta de la Planta (kW)		
Factor de planta(%)		
Potencia firme (kW)		
Energía eléctrica vendida (kWh/año)		
Precio de la energía (CLP/MWh)		
Precio nudo de potencia (CLP/kW)		
Reducción de emisión de metano (ton/año)		
CERs (ton CO2e/año)		
Precio CER (CLP/ton CO2e)		
Precio atributo verde (CLP/kWh)		
Vapor vendido (kWh)		
Agua caliente vendida (kWh)		
Precio vapor (CLP/kWh)		
Precio agua caliente (CLP/kWh)		
Ingreso por CER (CLP/año)		
Ingreso por venta de energía eléctrica (CLP/año)		
Ingreso por venta de vapor (CLP/año)		
Ingreso por venta de agua caliente (CLP/año)		
Ingreso por pago potencia (CLP/año)		
Ingreso por atributo verde (CLP/año)		
Ahorro por evaporación de lixiviado (CLP/año)		
Ingresos totales		
Consumo electrico equipos auxiliares (kWh/año)		
Precio electricidad (CLP/kWh)		
Costos electricidad (CLP/año)		
Costos O&M ductos y pozos (CLP/año)		
Costos O&M antorcha (CLP/año)		
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		
Costo O&M Red distrital (CLP/año)		
Gasto financiero (CLP/año)		
- Depreciación (CLP/año)		
Ganancia o pérdida de capital (CLP/año)		
-Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		
Utilidades antes de impuesto		
Impuesto a las utilidades(25%)		
Utilidad despues de impuesto		
+ Depreciación		
+Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		
Flujo operacional		
Inversión (CLP/año)		
Capital de trabajo (CLP/año)		
Prestamo (CLP/año)		
Amortización (CLP/año)		
Valor residual (CLP)		
Flujo no operacional		
Flujo de Caja		
Recuperació de la inversión		
Tasa de descuento (%)		
TIR		
VAN (CLP)		

Fuente: Elaboración propia.

6.9.3 Valor Actual Neto (VAN)

El indicador VAN viene dado por la Ecuación (6.24), representa el total de flujos de dinero actualizados al periodo de realización de la inversión.

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{I_t - E_t}{(1 + i_d)^t} \quad (6.24)$$

t: Periodo [año].

T: Horizonte de evaluación [año].

I_t : Ingreso periodo "t" [CLP].

E_t : Egreso periodo "t" [CLP].

i_d : Tasa de descuento [%].

La tasa de descuento " i_d " o rentabilidad exigida, normalmente para evaluar privadamente es de 10%, el proyecto es rentable en caso de que $VAN > 0$.

6.9.4 Tasa interna de retorno (TIR)

El indicador TIR se obtiene al resolver la Ecuación (6.25).

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{I_t - E_t}{(1 + TIR)^t} \quad (6.25)$$

Es un indicador complementario al VAN, que representa un valor promedio de rentabilidad del proyecto, un proyecto es rentable si $TIR > i_d$.

6.9.5 Análisis de sensibilidad

Debido a la incertidumbre en muchas variables del análisis factibilidad económica, es necesario evaluar la sensibilidad a los cambios de los indicadores económicos (TIR y VAN). Las variables más importantes a considerar son variaciones en el flujo de biogás y distintos escenarios de precios de venta de los distintos productos (energía eléctrica, potencia eléctrica, vapor, agua caliente, CER y atributo verde).

6.9.6 Factibilidad privada

Si de este análisis se obtiene que el proyecto no presenta rentabilidad privada, o presenta mucho riesgo debido a la sensibilidad de los indicadores a cambios de variables, debe evaluarse la posibilidad de reducir el riesgo mediante la alternativa de evaluar socialmente el proyecto, para considerar la posibilidad de un subsidio.

6.9.7 Identificación de beneficios sociales y ambientales

Para evaluar un proyecto socialmente deben identificarse los beneficios sociales de implementar, cada una de las alternativas.

En primer lugar, uno de los beneficios inherentes a un proyecto de biogás, es la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, evitando la liberación del metano a la atmosfera y en la sustitución de otros combustibles fósiles. Para incorporar los beneficios en el análisis, se valorizan las emisiones al precio Social del carbono, publicado anualmente por el Ministerio de desarrollo social. El precio social vigente para el año 2015 es de 2.213 [CLP/ton CO₂e].

También pueden valorizarse los efectos en la sustitución de otros combustibles en calefacción (leña especialmente) y las disminuciones en las emisiones MP2.5, mejorando la calidad del aire y disminuyendo enfermedades asociadas a contaminación.

Dependiendo del tipo de proyecto, pueden identificarse otros beneficios como:

- Potencialidades de desarrollo y mejora en condiciones domésticas, en proyectos de electrificación de comunidades o provisión de agua caliente y vapor, mejorando condiciones de vida y productivas de la localidad.
- Desarrollo productivo y comercial, por disponibilidad energética para procesos como riego, refrigeración, calefacción, etc.

6.9.8 Corrección de costos por precios sociales

Para una correcta evaluación social de proyectos es necesario utilizar precios sociales, cuyo objetivo es estimar valores que reflejen el verdadero beneficio o costo para la sociedad de utilizar unidades adicionales de recursos durante la ejecución y operación de un proyecto de inversión.

Los precios sociales son publicados anualmente por el Ministerio de Desarrollo Social. Los precios sociales vigentes para el año 2015 relevante para este tipo de proyecto están en la Tabla 6.24:

Tabla 6.24 Precios sociales 2015.

Variable	Valor Vigente
Tasa Social de descuento	6% anual
Factor de Corrección de la Mano de Obra	
• No calificada	0,62
• Semi-calificada	0,68
• Calificada	0,98
Factor de Corrección de la Divisa	1,01
Precio Social del Carbono	2.213 [CLP/ton CO ₂ e]

Fuente: [51].

Además de los factores de corrección anteriores, a los costos debe descontársele el IVA y las tasas arancelarias en caso de importaciones.

6.9.9 Flujo de caja, VAN y TIR Social.

Luego de realizar la corrección por precios sociales, y de valorizar los beneficios en términos monetarios, se debe realizar nuevamente un flujo de caja, para determinar nuevamente los indicadores VAN y TIR. Debe usarse la tasa Social de descuento publicada.

Además en el flujo de caja social no debe considerarse impuestos a las utilidades, prestamos, amortización ni intereses, pues representan simplemente transferencia de riqueza entre agentes económicos pertenecientes en su conjunto a la sociedad.

Es importante distinguir entre los flujos de beneficios y costos sociales con el presupuesto del proyecto, pues si bien en la evaluación social se descuentan impuestos y aranceles, la institución ejecutora debe cubrir las inversiones y costos de operación a precios de mercado.

6.9.10 Factibilidad Social

La evaluación social se realiza para determinar la conveniencia para el país de ejecutar o no un proyecto. Esto conlleva que las decisiones de inversiones deben trascender la conveniencia institucional, en función del bienestar del país. Con el cálculo del VAN y TIR social se puede saber si el proyecto es rentable socialmente.

Si el VAN social de un proyecto es positivo pero el VAN privado es negativo, el Estado debería entregar un subsidio para su ejecución, esto permitirá que el privado obtenga una rentabilidad suficiente para tener el incentivo de ejecutar el proyecto.

6.9.11 Determinación de subsidio aplicable

El subsidio estatal deberá considerarse como un subsidio a la inversión y, por lo tanto, la Empresa Servidora no deberá pagar impuestos adicionales por este concepto.

La inversión total del proyecto se financiará con la suma de los diferentes aportes. El primero a considerar en un esquema de co-financiamiento es el aporte de la comunidad, luego el aporte de la empresa y finalmente el Subsidio. El aporte mínimo de la empresa está dado por la Ecuación (6.26).

$$AE_{\min} = \sum_{t=1}^T \frac{Iop_t - Cop_t - Imp_t}{(1 + i_{dp})^t} + \frac{VR}{(1 + i_{dp})^T} \quad (6.26)$$

Donde:

AE_{\min} : Aporte mínimo de la empresa ejecutora [CLP].

Iop_t : Ingresos operaciones de la empresa [CLP].

Cop_t : Costos operacionales de la empresa [CLP].

Imp_t : Impuestos a las utilidades [CLP]

i_{dp} : Tasa de descuento privada [%].

VR: Valor residual de la inversión [CLP].

Además debe cumplirse la Ecuación (6.27).

$$S \leq I_t - AE_{\min} - AC \quad (6.27)$$

En que:

I_t : Inversión total del proyecto [CLP].

AC: Aporte de la comunidad [CLP].

S: Subsidio [CLP].

7 Análisis de casos

7.1 Relleno sanitario de Osorno

El proyecto relleno sanitario de Osorno, presentado por la Ilustre Municipalidad de Osorno, considera la construcción y operación de un Relleno Sanitario para la Provincia de Osorno, que pretende lograr que el manejo integrado de los residuos sólidos en sistemas intercomunales garantice que la disposición final de estos se efectúe de manera adecuada preservando la salud pública, el medio ambiente y los recursos naturales.

El relleno sanitario prestara servicio a la Provincia de Osorno, tendrá un área útil de 12,4 hectáreas y servirá a una población de 221.509 habitantes, se estima que la población servida al final del periodo de operación se incrementará a 325.000 habitantes de 7 comunas. Se estima una vida útil 20 años. El relleno sanitario está ubicado a 6,5 kilómetros al oeste de la ciudad de Osorno, y comenzara a operar a partir del 2016.

En la Figura 7.1 se observa la localización del relleno sanitario, a 3 [km] aproximadamente se encuentra el sector de Rahue, en la ciudad de Osorno, en que existe un amplio conjunto habitacional (más de 1500 viviendas) y los aserraderos Madesur y Madexpo, este sector es ideal para un proyecto distrital o de abastecimiento eléctrico debido al consumo industrial y residencial permanente durante todo el año.

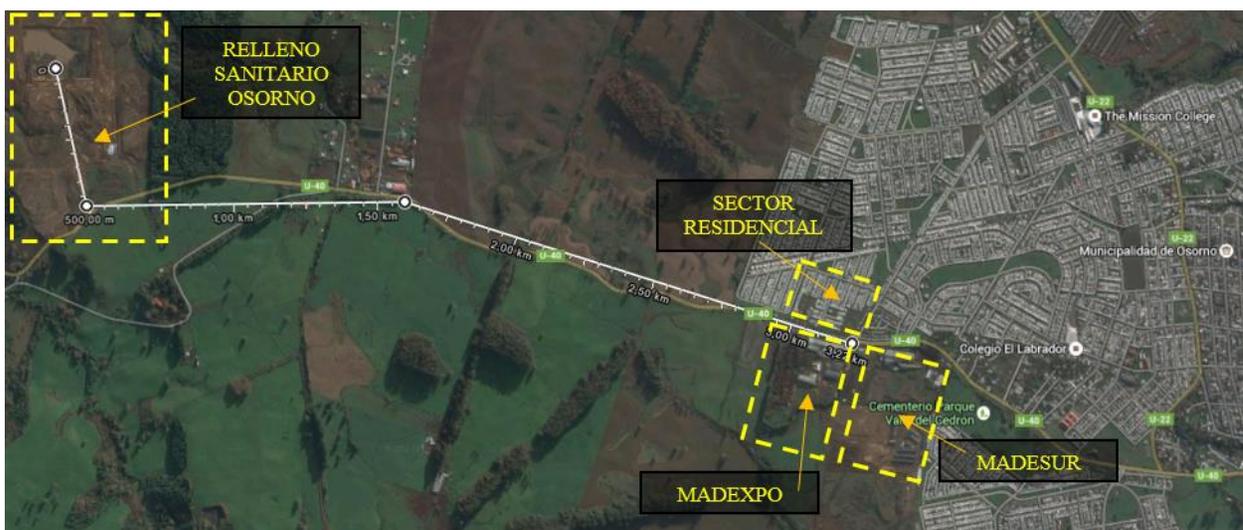


Figura 7.1 Localización de relleno sanitario de Osorno.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps.

El proyecto solo considera la incineración controlada de biogás, a continuación se aplica la metodología desarrollada, para tener un diseño básico preliminar de las instalaciones de extracción y control de biogás, además se evalúa formas de aprovechamiento energético de acuerdo a las alternativas descritas. De acuerdo a las tipologías definidas, se decide analizar proyectos de producción de vapor y/o agua caliente, y cogeneración con microturbinas.

7.1.1 Caracterización del relleno sanitario y sus condiciones.

En la Figura 7.2 se tiene un esquema con las principales dimensiones del relleno sanitario de Osorno. El volumen disponible para disposición aproximado es de 2.690.800 [m³]. Los valores supuestos y principales resultados de la caracterización geométrica están la Tabla 7.1.

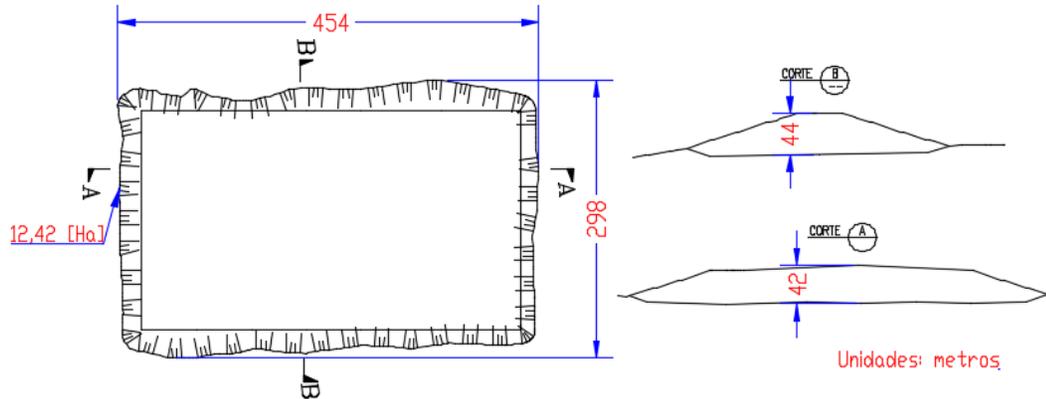


Figura 7.2 Dimensiones generales relleno sanitario de Osorno.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.1 Caracterización geométrica y capacidad de relleno sanitario de Osorno.

Volumen de disposición [m³]	2.690.800
Fracción de volumen cobertura [%]	20
Área de disposición [m²]	124.200
Densidad de residuos estabilizados [ton/m³]	0,9
Volumen de material de cobertura [m³]	538.160
Volumen disponible para residuos [m³]	2.152.640
Masa total de residuos [ton]	1.937.376
Altura promedio Relleno sanitario [m]	22

Fuente: Elaboración propia.

Luego de determinar la capacidad del relleno sanitario se estima la disposición de residuos en el tiempo, en la Tabla 7.2 esta los principales supuestos, en la Tabla 7.3 están la estimación de deposición de residuos en el tiempo, la vida útil se determina mediante estas proyecciones de cantidad de residuos.

Tabla 7.2 Datos para estimación de generación de residuos.

Año inicial	2016
Población inicial [habitantes]	256.927
Tasa de crecimiento poblacional [%]	1,87
PPC [kg/habitantes/día]	0,77
Población final [habitantes]	365.334
Vida útil [Años]	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.3 Estimaciones de residuos.

Año	Residuos anuales [ton]	Residuos acumulados [ton]
2016	72.209	72.209
2017	73.560	145.769
2018	74.935	220.704
2019	76.337	297.041
2020	77.764	374.805
2021	79.218	454.023
2022	80.700	534.722
2023	82.209	616.931
2024	83.746	700.677
2025	85.312	785.989
2026	86.907	872.896
2027	88.532	961.429
2028	90.188	1.051.617
2029	91.875	1.143.491
2030	93.593	1.237.084
2031	95.343	1.332.427
2032	97.126	1.429.553
2033	98.942	1.528.495
2034	100.792	1.629.287
2035	102.677	1.731.964
2036	104.597	1.836.561
2037	106.553	1.943.114 ^(*)
2038	108.546	2.051.659 ^(*)
2039	110.575	2.162.235 ^(*)
2040	112.643	2.274.878 ^(*)

(*) Residuos superan capacidad del relleno sanitario

Fuente: Elaboración propia.

Además de la estimación de la cantidad de residuos, se debe estimar su composición promedio, en el caso del relleno sanitario de Osorno se asume la composición de la Tabla 7.4.

Tabla 7.4 Caracterización de residuos estimada para Osorno.

Componentes orgánicos totales [%]	65,1%
Desechos de jardín [%]	0,0%
Desechos de alimento [%]	57,8%
Desechos de papel, cartón y textiles [%]	7,3%
Desechos de madera y paja [%]	0,0%

Fuente: Elaboración propia.

También es necesario caracterizar climáticamente la zona, tanto la temperatura como la precipitación promedio es requerido para estimar la producción de biogás. Mediante un modelo de

evaluación difusa (Ver Anexo A) se estima la temperatura al interior del relleno sanitario, los valores obtenidos están en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 Características climáticas zona de emplazamiento de relleno sanitario de Osorno.

Precipitación anual [mm]	1181
Temperatura promedio anual [°C]	10,8
Temperatura al interior del Relleno sanitario [°C]	24,0

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2 Estimación producción de biogás

Para estimar la producción de biogás se emplea el modelo LandGEM, pero antes se debe estimar los valores para las constantes k y L₀; y además estimar la composición del biogás.

Mediante el modelo estequiométrico se obtiene la Ecuación (7.1), con lo que se estima la composición del biogás de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 7.6.

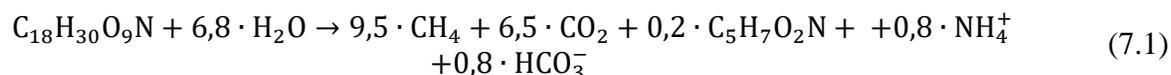


Tabla 7.6 Estimación composición de biogás de relleno sanitario de Osorno.

Componente	Fracción en volumen [%]
CH4	54
CO2	37
Otros	9

Fuente: Elaboración propia.

Para k se emplea modelo de evaluación difusa en Anexo A, mientras que para L₀ se usa la metodología de IPCC. Los valores para ambas constantes están en la Tabla 7.7, con dichos valores y la composición del biogás se obtiene las estimaciones de producción de este, cuyos resultados principales están en la Tabla 7.8. En la Figura 7.3 se observa la curva de generación de biogás y metano.

Tabla 7.7 Constantes cinéticas para modelo LandGEM para relleno sanitario de Osorno.

Tasa anual de generación de metano k [1/año]	0,068
Potencial de generación de metano L₀ [m³/ton]	62,62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.8 Estimación de biogás relleno sanitario de Osorno.

Componente	Biogás	Metano
Generación máxima [dam ³ /año]	6591,1	3546,3
Promedio generación [ft ³ /min] ^(*)	336,1	180,8
Razón capacidad/generación [dam ³ /año/ton]	0,0034	0,0018

(*) Promedio 21 años en torno a la generación máxima.

Fuente: Elaboración propia.

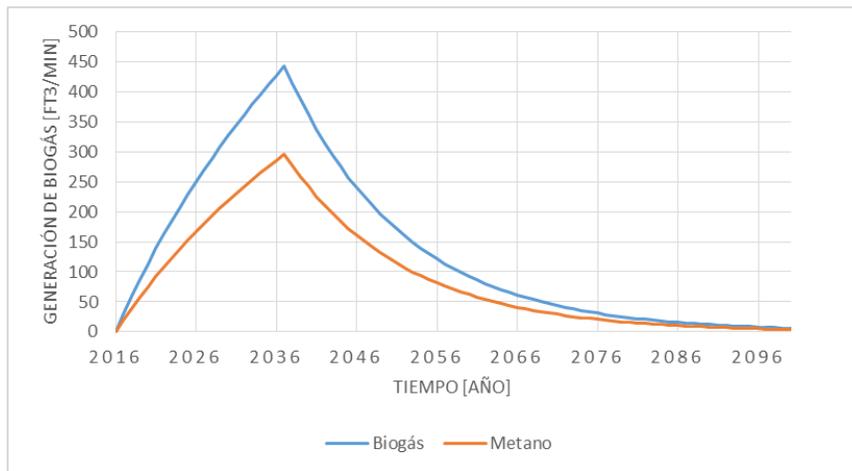


Figura 7.3 Curva de generación de biogás relleno sanitario de Osorno.
Fuente: Elaboración propia.

7.1.3 Diseño de sistema de extracción de biogás

Primero hay que definir qué tipo de colector de biogás se empleará en el sistema de extracción, debido a que se trata de un relleno sanitario de profundidad mayor de 10 [m] se emplean pozos verticales para el diseño. Los sistemas con pozos verticales son los más comunes.

Para determinar el número y posición de los pozos verticales debe escogerse un radio de influencia, de acuerdo a las recomendaciones se escoge 35 [m], para dicho radio se calcula que se requiere 24,34 [mbar] de presión de vacío en el cabezal de cada pozo, lo que está dentro de los límites admisibles para impedir infiltración de aire al relleno sanitario. Los valores utilizados para realizar dicha estimación están en la Tabla 7.9.

Tabla 7.9 Datos para cálculo de requerimientos de vacío en cabezal de pozo.

Radio de influencia [m]	35
Radio de pozo [m]	0,125
Largo del Pozo [m]	20
Espesor de residuos [m]	22
Capacidad relleno RS [ton]	1.937.376
Presión interna Relleno sanitario [Pa]	100.000
Densidad de residuos [ton/m³]	0,9
Viscosidad dinámica biogás [Pa·s]	$1,38 \cdot 10^{-5}$
Permeabilidad intrínseca de residuos [m²]	$2,04 \cdot 10^{-12}$
Conductividad hidráulica horizontal residuos [m/s]	$2,50 \cdot 10^{-5}$
Viscosidad dinámica del agua [Pa·s]	$7,98 \cdot 10^{-4}$
Peso específico del agua [N/m³]	9.800
Presión de vacío [Pa]	97.566
Vacío inducido [Pa]	2.434

Fuente: Elaboración propia

Luego de que se escoge el radio de influencia, es posible posicionar los pozos y trazar el layout de los ductos colectores de biogás. Debido a que se trata de un relleno sanitario pequeño, es posible utilizar un layout del tipo ramificado y control de vacío con válvulas individuales en cada cabezal de pozo. En la Figura 7.4 se observa el sistema de extracción.

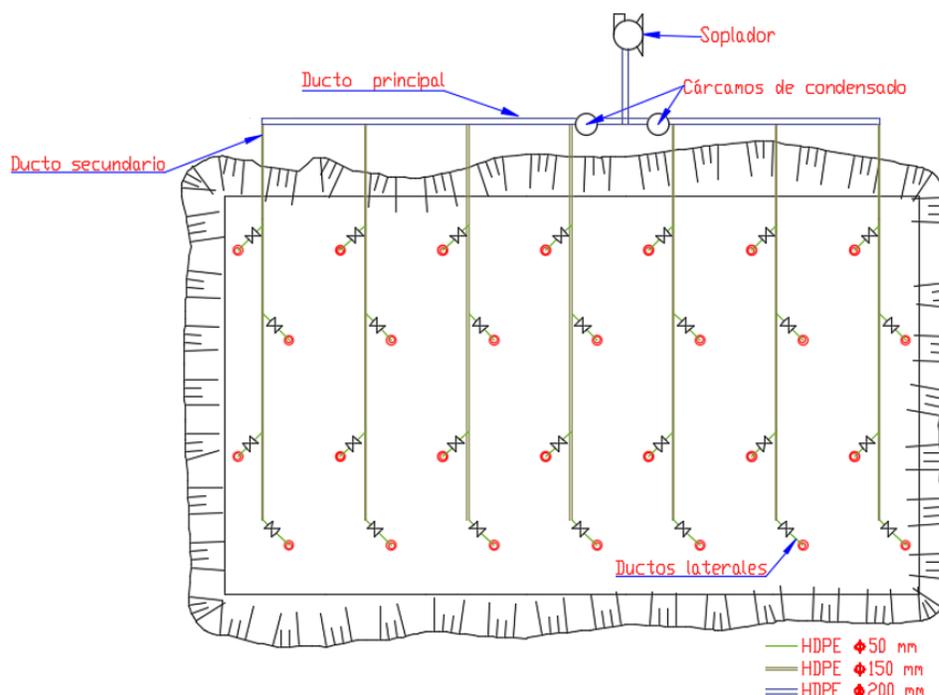


Figura 7.4 Esquema sistema de extracción propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Para escoger el diámetro de los ductos se utilizan los valores referenciales dados en la metodología, y se verifica que cumpla con los criterios de máxima velocidad (6 [m/s]) y máxima pérdida de carga (25 [mbar]), para el mayor flujo de biogás esperado. En la Tabla 7.10 están los valores de velocidad máxima, mientras que en la Figura 7.5 y la Tabla 7.11 se presentan el cálculo de la máxima pérdida de carga, en los cálculos se consideran pérdidas de carga por codos y válvulas, se desprecian pérdidas por expansiones y por el cárcamo de condensado. Se determina que se requiere equipo de extracción para impulsar aproximadamente un máximo de 1.000 [m³/h] y una presión de más de 3.106 [Pa], por lo que resulta adecuada la selección de un soplador centrífugo de 1 etapa.

Tabla 7.10 Cálculo de velocidad máxima en ductos de biogás.

Diámetro ductos laterales [m]	0,050
Diámetro ductos intermedios [m]	0,150
Diámetro ductos principales [m]	0,200
Caudal por pozo [m³/s]	0,008
Caudal máx. ducto intermedio [m³/s]	0,032
Caudal máx. ducto principal [m³/s]	0,130
Velocidad ducto lateral [m/s]	4,129
Velocidad ducto intermedio [m/s]	1,835
Velocidad ducto principal [m/s]	4,129

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.11 Cálculos de máxima pérdidas de carga.

Región del ducto	Caudal [m ³ /s]	Diámetro [m]	Largo Equivalente [m]	Pérdida de carga [Pa]
I	0,01	0,05	22,1	258
II	0,01	0,15	52,0	1
III	0,02	0,15	69,0	7
IV	0,02	0,15	52,0	12
V	0,03	0,15	64,5	27
VI	0,03	0,2	61,0	6
VII	0,06	0,2	61,0	24
VIII	0,10	0,2	61,0	55
IX	0,13	0,2	40,0	64
X	0,23	0,2	44,0	216
Total				672

Fuente: Elaboración propia.

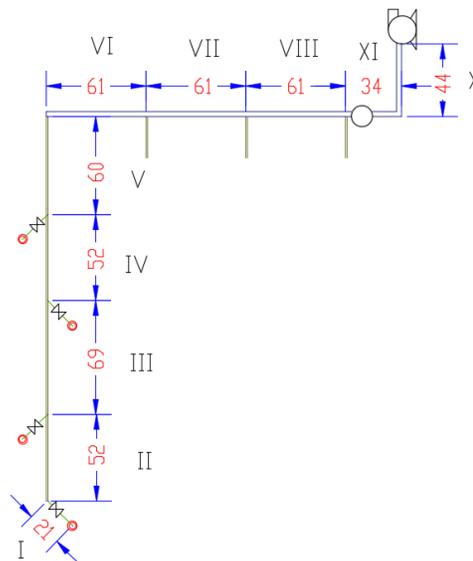


Figura 7.5 Dimensiones circuito de biogás de mayor largo equivalente.

Fuente: Elaboración propia.

7.1.4 Estimación eficiencia de extracción y potencial energético

Para estimar la eficiencia de extracción, es necesario conocer el plan de construcción del relleno sanitario, pues la eficiencia depende fuertemente del tipo de cobertura que tengan los residuos. Para simplificar el análisis se toman los siguientes supuestos:

- Los residuos con más de 1 año de antigüedad están con cobertura intermedia.
- Luego del cierre del relleno sanitario se instala la cobertura final para todos los residuos.
- No se considera uso de geomembrana.

Con los supuestos anteriores el flujo de biogás capturado se observa en las Figura 7.6.

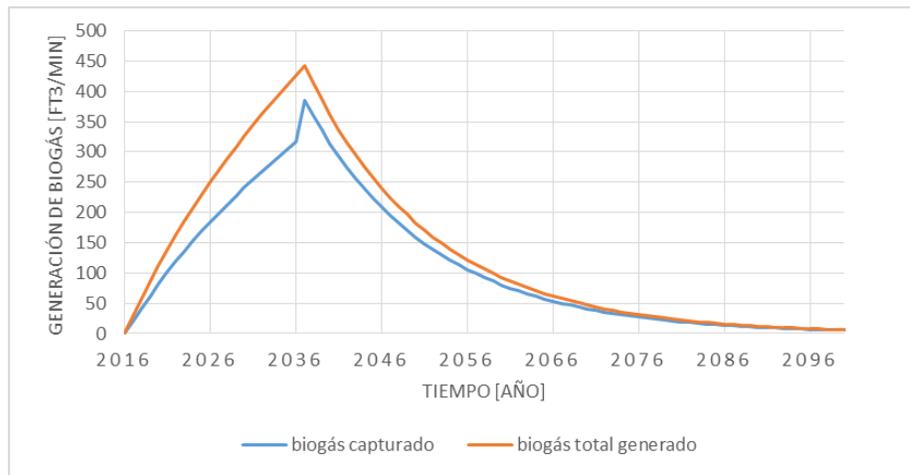


Figura 7.6 Curva de biogás captable relleno sanitario de Osorno.
Fuente: Elaboración propia.

Con el flujo de biogás captable, se estima la potencia térmica disponible, los principales resultados están en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12 Estimaciones de máximo flujo de biogás captable.

Flujo máximo de biogás captable [ft³/min]	385
Flujo promedio de biogás captable [ft³/min]^(*)	270
Poder calorífico inferior biogás [kJ/m³]	19.287
Potencia térmica promedio [kW]	2.454
Potencia térmica máxima [kW]	3.502

(*) Flujo promedio 21 años en torno a la máxima generación de biogás

Fuente: Elaboración propia.

7.1.5 Selección de tecnología

De acuerdo a lo enunciado inicialmente, y considerando los rangos de potencias de cada tipo de proyecto, se estudiara la factibilidad económica de las siguientes tipologías de proyectos definidas antes:

- **Cogeneración con micro turbinas:** Instalación de micro turbinas con sistemas de recuperación de calor de los gases de escape para proveer electricidad y agua caliente a comunidades cercanas al relleno sanitario.
- **Uso directo de biogás para generar vapor y agua caliente:** Instalación de calderas de agua caliente y vapor para distribuir en redes distritales en comunidades cercanas.

7.1.6 Selección de equipos

Cogeneración con microturbinas

Debido a las variaciones de flujo de biogás, las instalaciones de aprovechamiento energético se expanden durante el tiempo, de forma de acomodarse a la generación de biogás, y no tener capacidad instalada ociosa.

Para este proyecto en particular, se estima que seleccionar unidades de 200 [kW] Capstone permite adaptarse a la curva de biogás sin sacrificar demasiado en eficiencia eléctrica en unidades de menor potencia. En las Figura 7.7 y Figura 7.8 se ven dos estrategias para expandir el sistema.

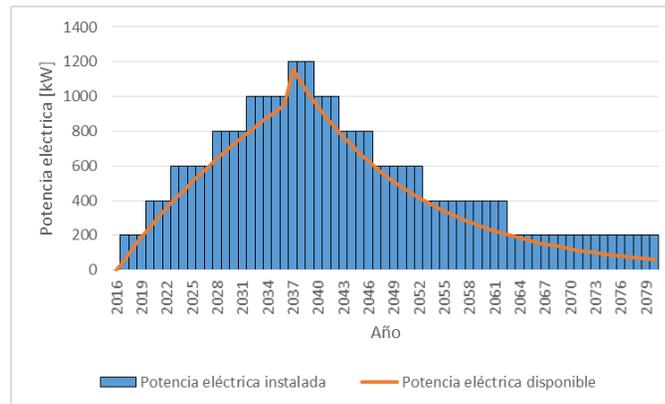


Figura 7.7 Estrategia de expansión de capacidad instalada máxima.
Fuente: Elaboración propia.

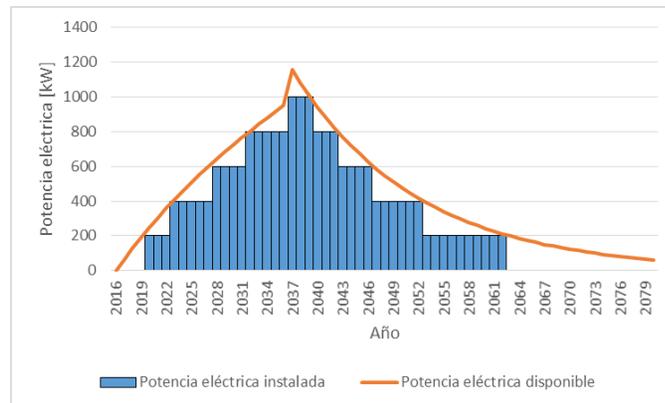


Figura 7.8 Estrategia de expansión de capacidad instalada mínima.
Fuente: Elaboración propia.

Se escoge la segunda alternativa, porque representan menores costos de inversión y permite operar todas las microturbinas a plena carga, los excedentes de biogás deben quemarse en antorcha.

El proyecto consiste en un ducto de 3 [km] para transportar el biogás hacia a las zonas industriales y urbanas, instalar en la zona un set de microturbinas para proveer de energía eléctrica y vapor a los aserraderos cercanos, y distribución de agua caliente sanitaria en red distrital de 500 viviendas, mediante energía térmica cogenerada.

Debido a la altas demanda térmica y las grandes fluctuaciones durante el año del consumo en calefacción, se considera que la caldera de vapor debe equiparse con un quemador dual para suplir en momentos de escasas con gas licuado.

Generación de agua caliente y vapor

Esta alternativa consiste en un ducto de 3 [km] hasta la zona residencial, en la que se instalará calderas para proveer de agua caliente y vapor en red distrital para 350 viviendas.

Se escoge 2 calderas, una para agua caliente y otra para vapor. De acuerdo a la distribución típica de consumo en hogares de Osorno, se estima que el 93% de la demanda de potencia térmica es en calefacción, en este caso mediante vapor, y el 7% restante para agua caliente. Se considera hasta 2.800 [kW] de energía térmica aprovechable (80% de eficiencia de las calderas), por lo que se escoge una caldera de vapor saturado de baja presión de 2.600 [kW] y una caldera de agua caliente de 200 [kW]. Los excedentes de vapor durante meses de menor consumo de calefacción pueden ser vendidos a los aserraderos.

7.1.7 Estimación de inversiones

Los costos totales de inversión del sistema de extracción se estiman en 572 millones de pesos, el detalle está en la Tabla 7.13.

En caso de aprovechamiento energético mediante cogeneración con microturbinas, se estima una inversión aproximada de 2.072 millones de pesos. Es importante señalar que esta inversión no se realiza toda en el primer periodo, el detalle de la de inversión está en la Tabla 7.14.

Para el proyecto de generación de vapor y agua caliente se estima una inversión aproximada de 2.243 millones de pesos, en la Tabla 7.15 se observa el detalle de la estimación.

Tabla 7.13 Inversiones del sistema de extracción relleno sanitario Osorno.

Componentes	Inversión [CLP]
Gestión y transporte de materiales	14.000.000
Excavación	82.600.000
Pozos de extracción vertical	121.520.000
Cabezales de pozo	14.000.000
Ductos laterales	17.640.000
Ductos intermedios o principales	153.075.000
Sopladores 500 [m ³ /h] a 1.000 [m ³ /h]	22.572.347
Cárcamos de condensado con bombeo	33.600.000
Ingeniería y administración	14.000.000
Antorchas de llama abierta (opcional)	23.000.000
Margen (25%)	124.001.837
TOTAL	572.519.119
TOTAL [USD]	812.084

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.14 Inversiones del proyecto de microturbinas.

Componentes	Inversión [CLP]
Microturbina, sistema de tratamiento y recuperador de calor.	1.114.225.410
Ductos de gas	450.000.000
Bomba de circulación	14.396.000
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería.	78.931.071
Margen	414.388.120
TOTAL	2.071.940.601
TOTAL [USD]	2.938.923

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.15 Inversiones del proyecto generación de agua caliente y vapor.

Componentes	Inversión [CLP]
Calderas	145.600.000
Instalación de estación de regulación y medición de biogás	57.000.000
Modificación de quemador y control automático	99.352.817
Estación de filtración, compresión y deshidratación	712.366.559
Ducto de relleno sanitario a caldera	695.125.000
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería.	85.472.219
Margen	448.729.149
TOTAL	2.243.645.743
TOTAL [USD]	3.182.476

Fuente: Elaboración propia.

Las inversiones estimadas para las redes distritales se observan en la Tabla 7.16.

Tabla 7.16 Inversiones estimadas para redes distritales.

Componentes	Inversión [CLP]
350 viviendas	
Red de distribución	304.500.000
Distribución interior viviendas	780.500.000
Total	1.085.000.000
500 viviendas	
Red de distribución	435.000.000
Distribución interior viviendas	819.250.000
Total	1.254.000.000

Fuente: Elaboración propia.

7.1.8 Estimación costos de operación y mantenimiento

La estimación de los costos de operación y mantenimiento máximos para el sistema de extracción y para cada proyecto de aprovechamiento energético se ven en la Tabla 7.17, los valores no incluyen los costos de electricidad. Se asume un factor de planta de 90% para el proyecto de generación de vapor y agua caliente; y 93% para el proyecto de microturbinas.

Tabla 7.17 Costos de operación y mantenimiento de proyectos para relleno sanitario Osorno.

Componentes	Costo [CLP/año]
Sistema de extracción	
Operación y mantenimiento ductos y pozos	52.640.000
Operación y mantenimiento antorcha	3.670.000
Proyecto cogeneración microturbinas	
Operación y mantenimiento unidades de generación.	142.085.028
Proyecto generación agua caliente y vapor	
Operación y mantenimiento unidad tratamiento y tuberías.	36.366.512
Operación y mantención caldera	6.656.000

Fuente: Elaboración propia.

7.1.9 Análisis de factibilidad económica

Primero se analiza el proyecto de cogeneración con microturbina, para el análisis inicial se toman las siguientes consideraciones:

- Precio de venta de energía eléctrica: 62,2 [CLP/kWh] y un aumento conservador de 1% anual.
- Precio Certificado de reducción de emisiones (CER): 2.278 [CLP/ton CO₂e].
- Impuesto a las utilidades de 25%.
- Depreciación normal para microturbinas considerando vida útil de 10 años.⁵
- Financiamiento 30% de la inversión con capital propio y 70% con crédito bancario de tasa de interés 6% anual a 20 años.
- Horizonte de evaluación de 30 años.

Como se menciona, en Chile no existe mercado para definir un precio por las transacciones de vapor o agua caliente, sin embargo, es posible comprar los costos de otras fuentes energéticas.

Puesto que los aserraderos emplean sus propios residuos de madera para generar energía térmica, el precio de comercialización de vapor debe ser menor al costo de oportunidad de no aprovechar los residuos de madera en forma de energía. El precio de venta del vapor debe ser menor a 25 [CLP/kWh], para que resulte atractivo para el aserradero, pues dicho valor representa el potencial precio de comercialización de los residuos de madera. Se fija un precio de 20 [CLP/kWh].

Para definir la tarifa de venta del agua caliente sanitaria, se busca el valor que rentabilice el proyecto, para luego comparar con el costo de otros combustibles. El valor obtenido para la venta del agua caliente sanitaria es de 108 [CLP/kWh], el principal combustible empleado para calentar agua es gas licuado, el cual tiene un costo promedio de 78 [CLP/kWh], luego no existen incentivos para la población para migrar a un sistema de agua caliente distrital con dicha tarifa.

Si se fija un valor de 78 [CLP/kWh] se obtiene los resultados de la Tabla 7.18.

⁵ Vida útil normal para efectos financieros para Equipos de generación y eléctricos utilizados en la generación según Servicio de Impuestos Internos.

Tabla 7.18 Indicadores económicos privados proyecto microturbinas.

Indicador	Valor
TIR privado [%]	8
VAN privado (CLP)	-393.189.850

Fuente: Elaboración propia.

Se realiza el análisis de sensibilidad del VAN para las variaciones de precios de comercialización de ACS y vapor. En la Figura 7.9 se observa como varía el VAN frente a los cambios en la tarifa por unidad de vapor considerando fijo el del ACS, mientras que en la Figura 7.10 se tiene la variación del VAN con respecto al precio del ACS considerando fijo el precio del vapor.

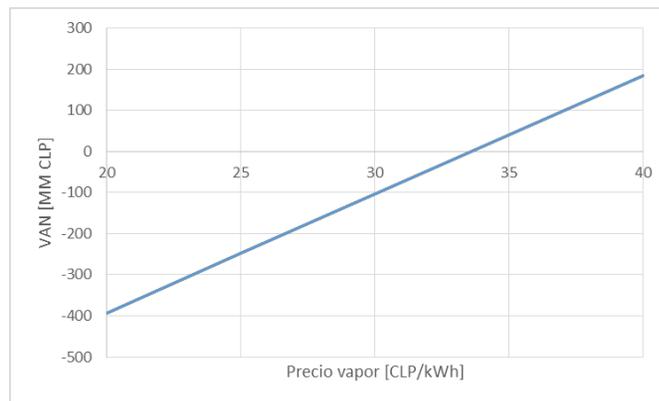


Figura 7.9 Análisis sensibilidad precio del vapor para aserraderos.

Fuente: Elaboración propia.

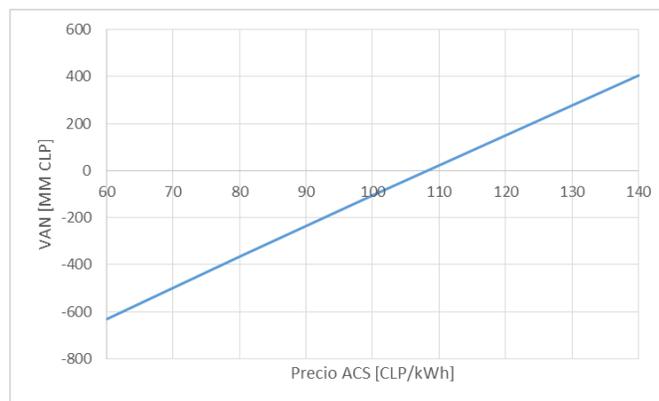


Figura 7.10 Análisis de sensibilidad precio del ACS para red distrital 500 viviendas.

Fuente: Elaboración propia.

Para asegurar la rentabilidad privada, es posible determinar un eventual subsidio para financiar parte de los costos de la red distrital, sin embargo, antes debe evaluarse el proyecto socialmente. Para realizar la evaluación social se considera:

- Beneficio social disminución de gases de efecto invernadero valorizado a precio social vigente del carbono. Estos incluye disminución de emisiones por destrucción de metano, reemplazo emisiones de CO₂ gas licuado para agua caliente residencial, reemplazo biomasa

en procesos térmicos de aserradero y reducción de emisiones por reemplazo de consumo eléctrico de la red.

- Beneficio social en salud por disminución de material particulado (MP) por reemplazo de biomasa húmeda consumida en aserraderos por biogás.
- Factor de emisión de CO₂ del gas licuado de 0,234 [kg CO₂e/kWh].
- Factor de emisión de CO₂ de la biomasa de 0,370 [kg CO₂e/kWh].
- Emisión equivalente de 0,355 [kg CO₂e/kWh] por uso de energía eléctrica de la red.
- Factores de emisión de MP de $8,4 \cdot 10^{-5}$ [kg MP/kWh] para el biogás y $1,7 \cdot 10^{-3}$ [kg MP/kWh] para la biomasa.
- Beneficios de salud por reducción de MP2.5 se valorizan en 18.380.000 [CLP/ton MP2.5].
- 20% de los costos de inversión, de operación y mantenimiento se considera que corresponde a costo en mano de obra semi-calificada.

Los resultados se observan en la Tabla 7.19. Se determina que el proyecto no es socialmente rentable, por lo que tampoco puede optarse a un subsidio estatal.

Tabla 7.19 Indicadores sociales proyecto microturbinas.

Indicador	Valor
TIR Social [%]	0
VAN Social (CLP)	-1.961.197.277

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se analiza el segundo proyecto planteado, de generación de agua caliente sanitaria y vapor para distribuir en red distrital y excedentes de vapor para vender a los aserraderos.

A partir de las discusiones de las tarifas antes realizadas, se definen los siguientes precios para la comercialización de los productos térmicos:

- Vapor para aserradero a 20 [CLP/kWh].
- Vapor para red distrital 25 [CLP/kWh].
- Agua caliente sanitaria a 78 [CLP/kWh].

Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 7.20, se observa que el proyecto no es rentable. Si se considera fijo el precio del vapor para aserraderos y agua caliente sanitario, y se busca el precio del vapor para la red distrital que rentabilice el proyecto, se obtiene 50 [CLP/kWh], valor que no puede competir con los 25 [CLP/kWh] de la leña, pero si con el valor de 63 [CLP/kWh].

Tabla 7.20 Indicadores económicos privados proyecto caldera para generación de agua caliente y vapor.

Indicador	Valor
TIR privado [%]	2,65
VAN privado (CLP)	-1.336.494.308

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el proyecto anterior, se realiza el análisis de sensibilidad del VAN frente a cambios en las tarifas de ACS y vapor. En la Figura 7.13 se observa como varía el VAN frente a los cambios

en la tarifa por unidad de vapor considerando fijo el del ACS, mientras que en la Figura 7.12 se tiene la variación del VAN con respecto al precio del ACS considerando fijo el precio del vapor.

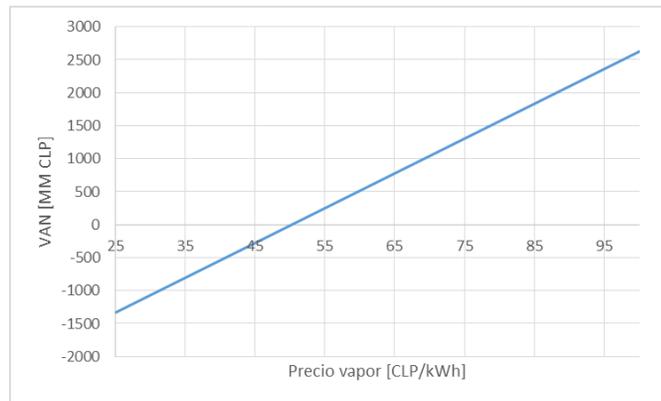


Figura 7.11 Análisis sensibilidad precio del vapor en red distrital 350 viviendas.
Fuente: Elaboración propia.

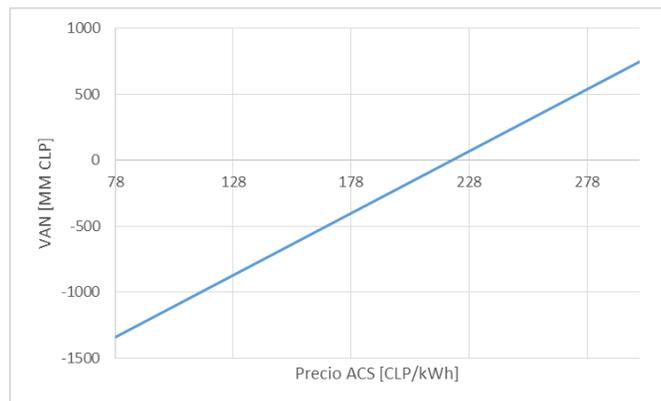


Figura 7.12 Análisis de sensibilidad precio del ACS para red distrital 350 viviendas.
Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la posibilidad de subsidio estatal se realiza la evaluación social de este proyecto, se considera que el factor de emisión de MP2.5 producto de la calefacción con leña es de 0,0115 [kg PM2.5/kWh], para efectos de cuantificar las reducciones de material particulado por reemplazo de este combustible en calefacción. Además se toman las consideraciones realizadas en la evaluación social anterior.

Los resultados están en la Tabla 7.21. Se obtiene que el proyecto es muy rentable socialmente, especialmente por la sustitución de la leña como principal beneficio social.

Tabla 7.21 Indicadores sociales proyecto caldera para generación de agua caliente y vapor.

Indicador	Valor
TIR Social [%]	26,04
VAN Social (CLP)	9.268.240.588

Fuente: Elaboración propia.

Se verifica que el aporte mínimo de la empresa ejecutora del proyecto corresponde 821.473.873 [CLP], con lo que el subsidio máximo es de 3.079.690.989 [CLP].

El subsidio que permite rebajar la tarifa de calefacción a 25 [CLP/kWh] es de 1.711.936.842 [CLP], que es menor al subsidio máximo permisible.

Los flujos de caja completos de los 2 proyectos anteriores se encuentran en el Anexo C.

7.2 Relleno sanitario El Molle

El relleno sanitario el Molle está ubicado en el Camino La Pólvara en la ciudad de Valparaíso, comenzó su funcionamiento en Octubre de 2013 como respuesta al término de la vida útil del Vertedero el Molle localizado contiguo al Relleno sanitario de igual nombre. El relleno sanitario recibe residuos domiciliarios de las ciudades de Valparaíso, Viña del mar, Concón y Quilpué.

En la actualidad el Vertedero el Molle cuenta con una planta de quema de biogás, la cual fue diseñada con el propósito de comercializar bonos de carbono, además está en ejecución un proyecto de construcción de una central de generación eléctrica con motores de combustión interna, para aprovechar biogás producido por el Vertedero, y en el futuro aprovechar el biogás del relleno sanitario también, se espera una instalación de 4 [MW] tanto para el relleno sanitario como para el vertedero.

A modo de comparación se emplea la metodología desarrollada para realizar el diseño del sistema de extracción de biogás y estudiar la factibilidad económica de implementar un proyecto de generación eléctrica en el relleno sanitario el Molle. Además se plantea el estudio de factibilidad económica de un proyecto de evaporación de biogás, para evaluar otros mecanismos de aprovechamiento del biogás.

En la Figura 7.13 se observa la localización del predio en el que se encuentra el relleno sanitario. En la Figura 7.14 se observa un esquema de la distribución espacial del relleno sanitario y el vertedero del Molle y algunas instalaciones existentes como piscinas de lixiviado, estación de quema de biogás y el espacio destinado para la futura central de generación eléctrica.



**Figura 7.13 Localización de relleno sanitario y vertedero El Molle.
Elaboración propia a partir de Google Maps.**

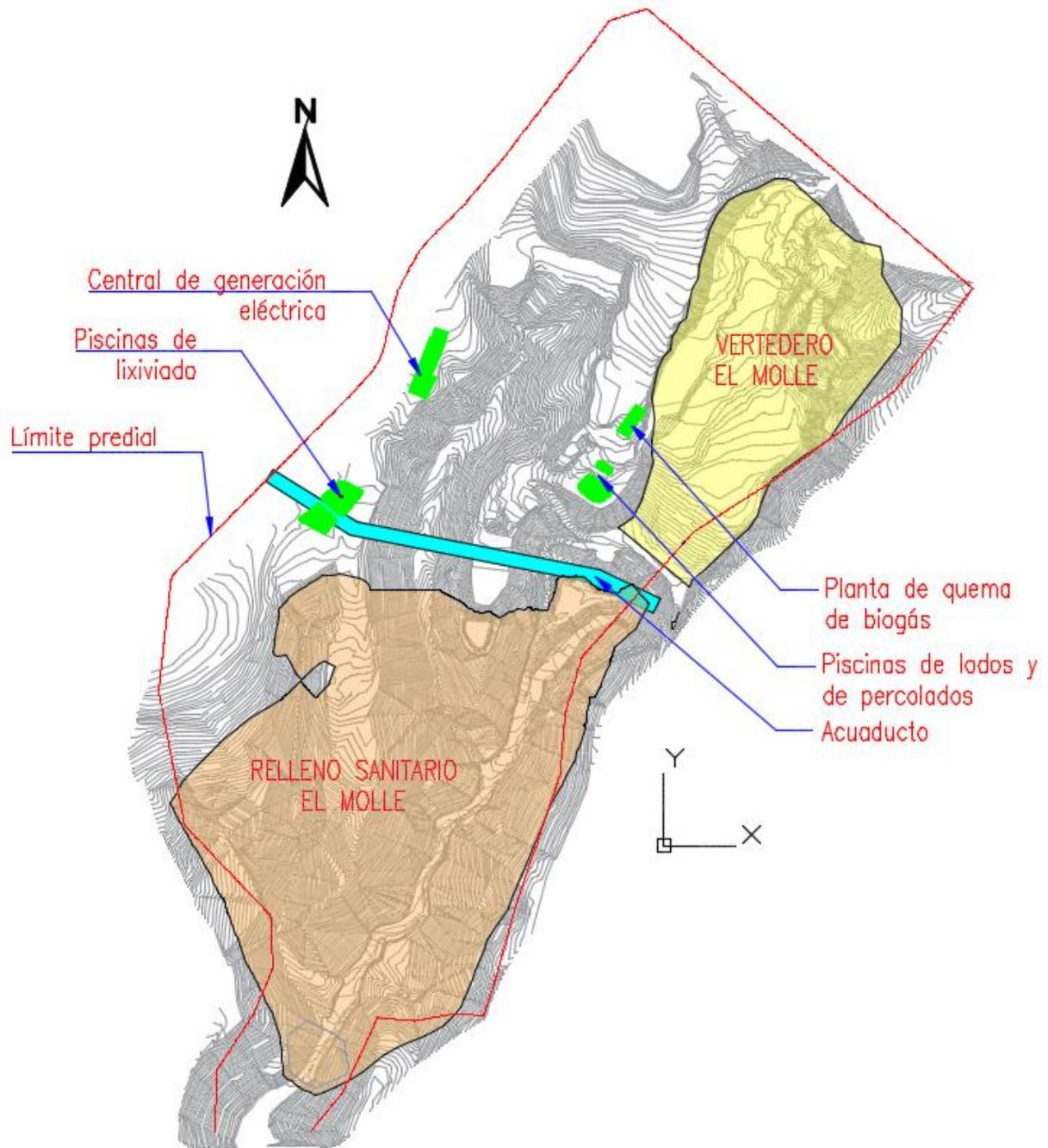


Figura 7.14 Predio de emplazamiento de relleno sanitario y vertedero El Molle.
Fuente: Elaboración propia a partir de [25].

7.2.1 Caracterización del relleno sanitario y sus condiciones

En la Figura 7.15 se observa el diseño final esperado del relleno sanitario, con una capacidad estimada de 8.600.689 [m³], ocupando una superficie de 29,49 [Ha].

Los principales resultados de la caracterización geométrica del relleno sanitario están en la Tabla 7.22.

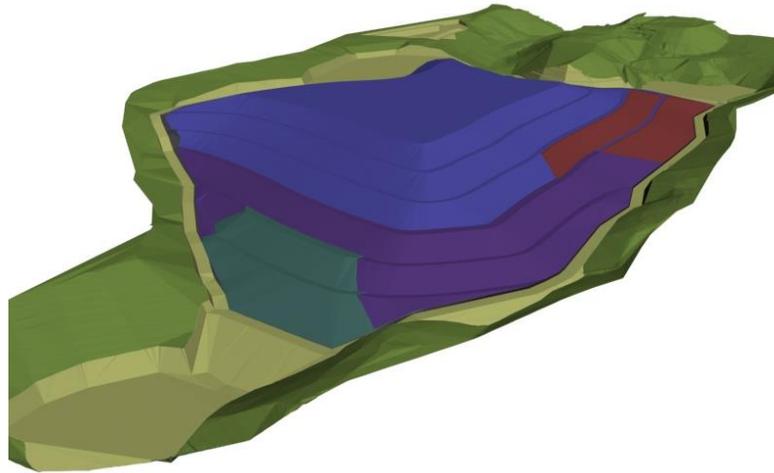


Figura 7.15 Diseño final relleno sanitario de El Molle.

Fuente: [25].

Tabla 7.22 Caracterización geométrica y capacidad de relleno sanitario de El Molle.

Volumen de disposición [m³]	8.600.689
Fracción de volumen cobertura [%]	25
Área de disposición [m²]	294.943
Densidad de residuos estabilizados [ton/m³]	1
Volumen de material de cobertura [m³]	2.150.172
Volumen disponible para residuos [m³]	6.450.517
Masa total de residuos [ton]	6.450.517
Altura promedio Relleno sanitario [m]	29

Fuente: Elaboración propia.

La estimación de la disposición de residuo a lo largo de los años se observa en la Tabla 7.24, de la cual se deriva la vida útil del relleno sanitario. Los datos empleados para las proyecciones están en la Tabla 7.23.

Tabla 7.23 Datos para estimación de generación de residuos.

Año inicial	2014
Población inicial [habitantes]	829.566
Tasa de crecimiento poblacional [%]	0,68
PPC [kg/habitante/día]	0,90
Población final [habitantes]	949.981
Vida útil [años]	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.24 Estimación de residuos.

Año	Residuos anuales [ton]	Residuos acumulados [ton]
2014	272.512	272.512
2015	277.109	549.622
2016	281.783	831.405
2017	286.537	1.117.942
2018	291.370	1.409.311
2019	296.285	1.705.596
2020	301.282	2.006.879
2021	306.364	2.313.243
2022	311.532	2.624.775
2023	316.787	2.941.562
2024	322.131	3.263.693
2025	327.564	3.591.258
2026	333.090	3.924.347
2027	338.708	4.263.056
2028	344.422	4.607.477
2029	350.231	4.957.709
2030	356.139	5.313.848
2031	362.146	5.675.994
2032	368.255	6.044.249
2033	374.467	6.418.716
2034	380.783	6.799.499 ^(*)
2035	387.206	7.186.706 ^(*)
2036	393.738	7.580.444 ^(*)
2037	400.379	7.980.823 ^(*)
2038	407.133	8.387.956 ^(*)

(*) Residuos superan capacidad del relleno.

Fuente: Elaboración propia.

La composición promedio de los residuos está en la Tabla 7.25.

Tabla 7.25 Caracterización de residuos estimada para relleno sanitario El Molle.

Componentes orgánicos totales [%]	78,8
Desechos de jardín [%]	2,0
Desechos de alimento [%]	58,7
Desechos de papel, cartón y textiles [%]	15,6
Desechos de madera y paja [%]	2,5

Fuente: [25].

Las principales características climáticas necesarias para estimar la producción de biogás, que además permiten estimar la temperatura al interior del relleno sanitario se observan en la Tabla 7.26.

Tabla 7.26 Características climáticas zona de emplazamiento relleno sanitario El Molle.

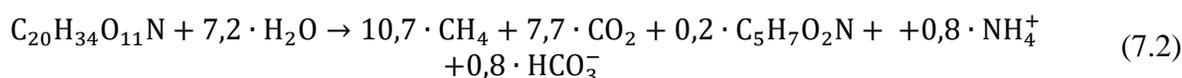
Precipitación anual [mm]	413
Temperatura promedio anual [°C]	13,2
Temperatura al interior del RS [°C]	28

Fuente: Elaboración propia.

7.2.2 Estimación de la producción de biogás

De acuerdo a la metodología desarrollada, la estimación de producción de biogás requiere estimar los valores de las constantes k , l_0 y la composición del biogás, para emplear esa información luego en el modelo LandGEM.

La composición del biogás se estima mediante un balance estequiométrico, el cual se ve en la Ecuación (7.2). La composición estimada está en la Tabla 7.27.

**Tabla 7.27 Estimación composición biogás de relleno sanitario de El Molle.**

Componente	Fracción en volumen [%]
CH ₄	53
CO ₂	39
Otros	8

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar k se emplea el modelo de evaluación difusa descrito en el Anexo A, para L_0 se utiliza la metodología de IPCC. Los valores estimados de cada constante están en la Tabla 7.28.

Tabla 7.28 Constantes cinéticas para modelo LandGEM para relleno sanitario de El Molle.

Tasa anual de generación de metano k [1/año]	0,026
Potencial de generación de metano L_0 [m³/ton]	77,1

Fuente: Elaboración propia.

Luego, con el modelo LandGEM los principales resultados de la estimación de producción de biogás están en la Tabla 7.29. En la Figura 7.16 se observa las curvas de generación de biogás y metano.

Tabla 7.29 Estimación de biogás relleno sanitario El Molle.

Componente	Biogás	Metano
Generación máxima [dam ³ /año]	19.954,3	10.655,8
Promedio generación [ft ³ /min] ^(*)	1.095	585
Razón capacidad/generación [dam ³ /año/ton]	0,0031	0,0017

(*) Flujo promedio 21 años en torno a la máxima generación de biogás

Fuente: Elaboración propia.

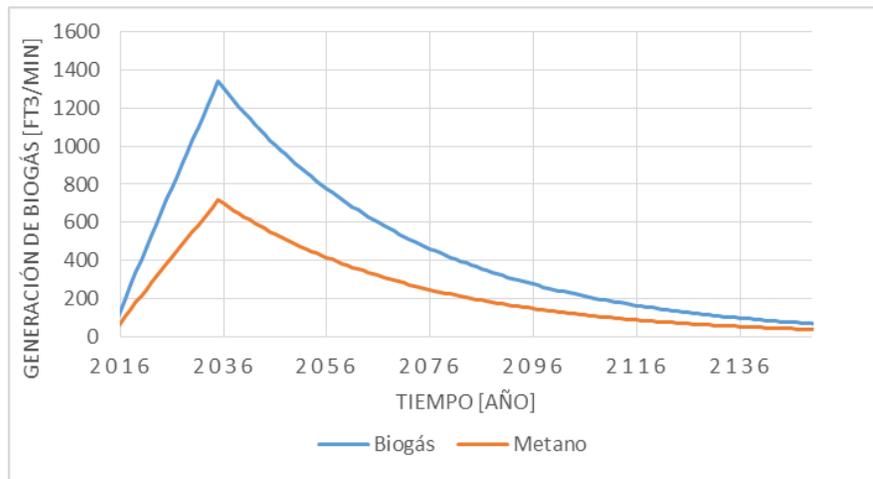


Figura 7.16 Curva de generación de biogás relleno sanitario El Molle.
Fuente: Elaboración propia.

7.2.3 Diseño del sistema de extracción de biogás

Como se trata de un relleno sanitario profundo, se emplea preferentemente pozos verticales, pues además son los tipos de colectores más utilizados.

Para determinar el número de pozos a utilizar y la localización de ellos, se escoge un radio de influencia de 30 [m]. El vacío que es necesario inducir en el cabezal de pozo para ese radio de influencia es de 23,6 [mbar], que está dentro de los límites admisibles. Los valores empleados para dicho cálculo están en la Tabla 7.30.

Escogido el radio de influencia, se localiza los pozos en el relleno sanitario, y se traza el layout de los ductos colectores, dado que se trata de un relleno sanitario de gran tamaño, es recomendable considerar un ducto en forma de anillo alrededor de todo el relleno sanitario, para otorgar redundancia al sistema en caso de fugas o desperfectos en ductos o pozos. Se considera con válvulas reguladoras de vacío (y caudal) en cada cabezal de pozo.

Dada la complejidad de la red, se emplea el software EPANET para el cálculo de las pérdidas de carga, se ejecuta el modelo empleando la Ecuación de Darcy-Weibach. Los diámetros de ductos se escogen de acuerdo a lo típico utilizado, y se verifica que cumplan con los criterios de velocidad y pérdidas de carga en la red.

El caudal por cada pozo se estima con el método del cilindro, por lo que los caudales totales de biogás quedan sobreestimados para efectos de ser conservador para la selección de diámetros de ductos. Los resultados obtenidos están en la Tabla 7.31.

Tabla 7.30 Datos para cálculo de requerimientos de vacío de cabezal de pozo.

Radio de influencia [m]	30
Radio de pozo [m]	0,125
Largo del Pozo [m]	20
Espesor de residuos [m]	29
Capacidad relleno RS [ton]	6.450.517
Presión interna relleno sanitario [Pa]	100.000
Densidad de residuos [ton/m³]	1
Viscosidad dinámica biogás [Pa·s]	$1,38 \cdot 10^5$
Permeabilidad intrínseca de residuos [m²]	$2,035 \cdot 10^{12}$
Conductividad hidráulica horizontal residuos [m/s]	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Viscosidad dinámica del agua [Pa·s]	$7,98 \cdot 10^{-4}$
Peso específico del agua [N/m³]	9.800
Presión de vacío [Pa]	97.637
Vacío inducido [Pa]	2.363

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.31 Cálculos de velocidad máxima en ductos de biogás.

Diámetro ductos laterales [m]	0,10
Diámetro ductos intermedios [m]	0,30
Diámetro ductos principales [m]	0,35
Caudal por pozo [m³/s]	0,007
Caudal máx. ducto intermedio [m³/s]	0,079
Caudal máx. ducto principal [m³/s]	0,991
Velocidad ducto lateral [m/s]	0,914
Velocidad ducto intermedio [m/s]	1,117
Velocidad ducto principal [m/s]	10,299

Fuente: Elaboración propia.

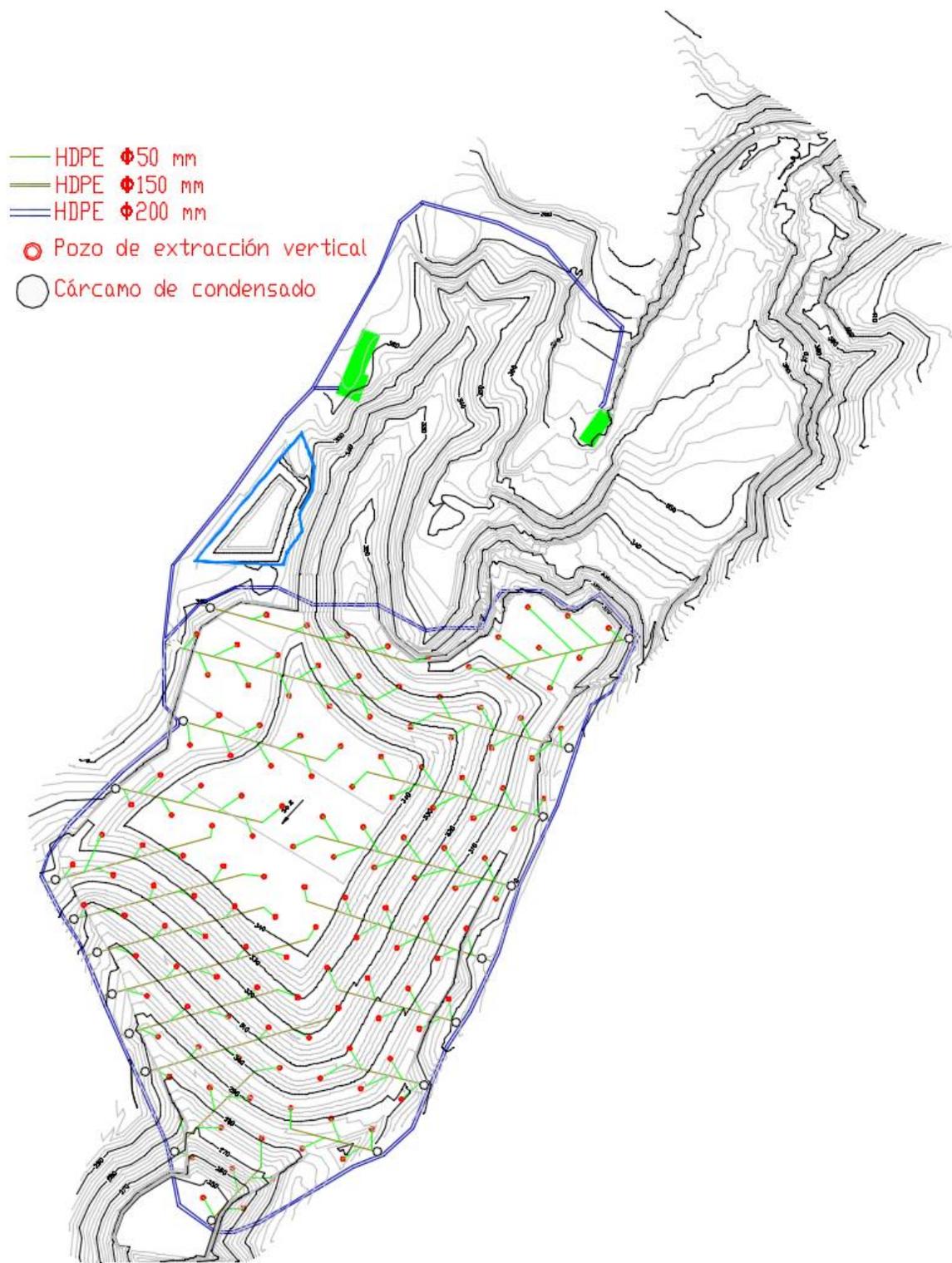


Figura 7.17 Esquema sistema de extracción propuesto.
Fuente: Elaboración propia.

La máxima pérdida de carga es de 1563 [Pa], lo que está dentro de los límites esperado (menos de 2500 [Pa]), los resultados del modelo en EPANET están en el Anexo C.

Se determina la necesidad de impulsar un máximo de 2.300 [m³/h] de biogás y una presión de mínima de 3.926 [Pa]. Dado que el sistema se expande gradualmente, puede instalarse progresivamente sopladores centrífugos de 1 etapa.

7.2.4 Estimación de la eficiencia de extracción y potencial energético

La eficiencia de extracción del sistema depende fuertemente de la calidad de la cobertura presente sobre los residuos, por lo que es requerido conocer el plan de construcción del relleno sanitario. Para simplificar el análisis se emplean los mismos supuestos que para el caso del relleno sanitario de Osorno, los cuales corresponden a los siguientes:

- Los residuos con más de 1 año de antigüedad están con cobertura intermedia.
- Luego del cierre del relleno sanitario se instala la cobertura final para todos los residuos.
- No se considera uso de geomembrana.

Los resultados de proyecciones de biogás se observan en la Figura 7.18. Se asume que la recolección de biogás comienza 3 años después del inicio de operación del relleno sanitario.

Con el flujo de biogás potencialmente captable, se estima el potencial energético del relleno sanitario, los resultados están en la Tabla 7.32.

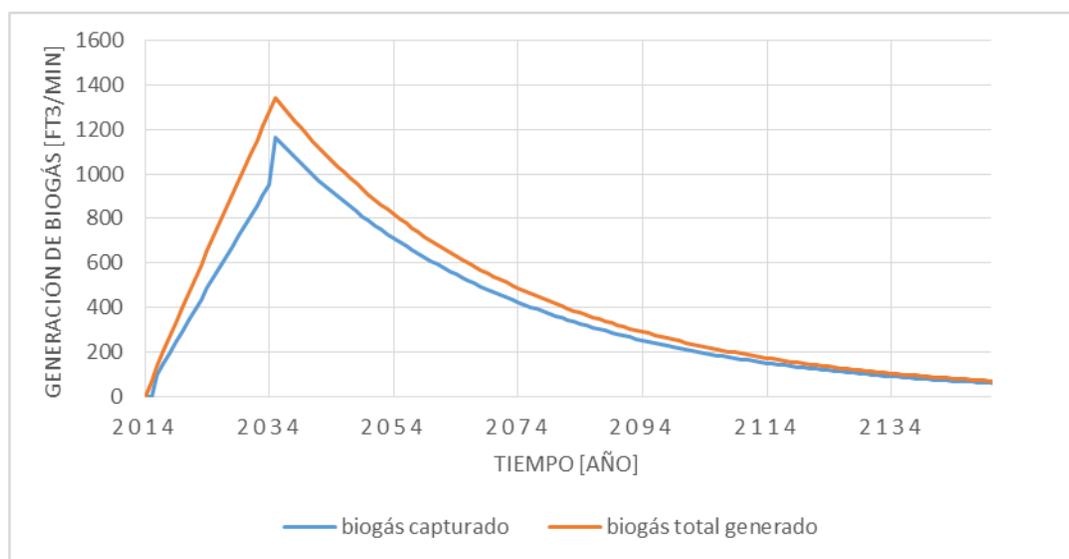


Figura 7.18 Curva de biogás captable relleno sanitario El Molle.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.32 Estimación de máximo flujo de biogás captable y potencia energético.

Flujo máximo de biogás captable [ft³/min]	1.165
Flujo promedio de biogás captable [ft³/min]^(*)	907
Poder calorífico inferior biogás [kJ/m³]	19.142
Potencia térmica promedio [kW]	8.195
Potencia térmica máxima [kW]	10.523

(*) Flujo promedio 21 años en torno a la máxima generación de biogás

Fuente: Elaboración propia.

7.2.5 Selección de la tecnología

Considerando la ubicación del relleno sanitario, alejado de potenciales consumidores, deben ser descartadas todas las alternativas de aprovechamiento energético que dependan de un cliente externo. De acuerdo a los proyectos de aprovechamiento energético definidos y considerando la potencia térmica disponible, equivalente aproximadamente a una potencia eléctrica 4,1 [MWe], se escogen para analizar la factibilidad económica por separado de los siguientes proyectos:

- **Generación eléctrica con motores de combustión interna:** Instalación de motores para generar energía eléctrica para inyección a la red. No se considera cogeneración por ausencia de cliente que aproveche dicha energía.

Para la interconexión con la red eléctrica se considera una línea de distribución de aproximadamente 1,9 [km] hacia el alimentador Uruguay de la empresa Chilquinta proveniente de la subestación de Valparaíso, en la Figura 7.19 se observa el trazado de la línea de distribución.



Figura 7.19 Interconexión eléctrica proyecto generación El Molle.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps.

- **Evaporación de lixiviados:** Instalación de equipo evaporador de lixiviados mediante combustión de biogás, para disminuir volumen del residuo líquido a tratar y generar ahorros en costos de tratamiento de lixiviado. Producto de la evaporación hay generación de lodos o lixiviado concentrado y vapores con alto contenidos de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Los lodos puede ser dispuesto nuevamente en el relleno sanitario en lugares destinados para ello y aplicando recubrimientos inmediatos. Los vapores con alto contenido

de COVs se considera que serán oxidados mediante la inyección de estos en una antorcha de llama cerrada.

7.2.6 Selección de equipo

Generación eléctrica con motores de combustión interna

La selección de la potencia de los motores a utilizar depende tanto de la cantidad de biogás que se generará, así como también de la velocidad con la que cambia la tasa de generación, pues la instalación de motores es progresiva en el tiempo.

Para evaluar este proyecto se selecciona motores Waukesha de potencia eléctrica de 1.000 [kW]. La expansión de la potencia eléctrica instalada se observa en la Figura 7.20, en donde la máxima potencia instalada es de 4 [MW].

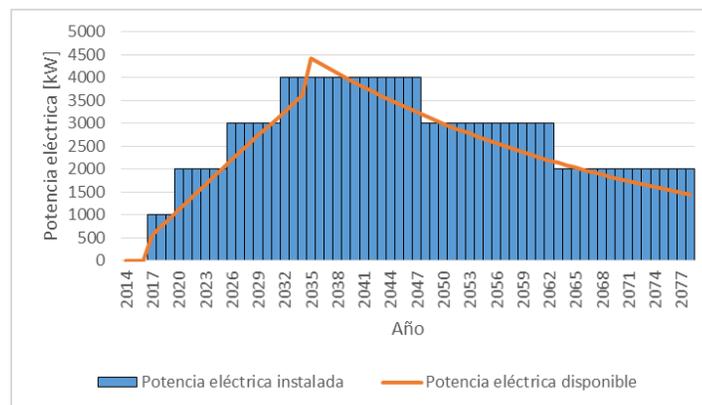


Figura 7.20 Expansión de la capacidad eléctrica instalada.

Fuente: Elaboración propia.

Evaporación de lixiviados

Para seleccionar el equipo de evaporación se debe tener una estimación de la cantidad de lixiviados que se generaran, de forma de determina la capacidad requerida. Las estimaciones de producción de lixiviado para el relleno sanitario de El Molle están en la Tabla 7.33.

Se selecciona evaporadores comerciales Thermal ENCON de capacidad de 400 galones por hora, equivalente a 36 [m³/día], el sistema se expandirá de acuerdo a las necesidades. Se considerará la expansión del sistema de acuerdo a los requerimientos de los años lluviosos.

Tabla 7.33 Estimación de lixiviados generados en relleno sanitario El Molle.

Año	Caudal Medio Año normal (m³/día)	Caudal Medio Año lluvioso (m³/día)	Caudal Medio Año Seco (m³/día)
1	7,2	13,5	1,8
2	12,4	22,7	3,9
3	17,7	31,9	5,9
4	23,0	40,6	8,3
5	28,4	49,8	10,4
6	33,8	59,1	12,6
7	39,2	68,5	14,8
8	44,8	78,0	17,0
9	50,3	87,6	19,2
10	56,1	97,6	21,5
11	61,9	107,8	23,7
12	67,9	118,2	25,9
13	73,9	128,8	28,1
14	80,0	139,5	30,3
15	86,1	150,4	32,5
16	92,4	161,5	34,7
17	98,7	172,8	37,0
18	105,2	184,2	39,2
19	111,7	195,8	41,4
20	118,3	207,7	43,7

Fuente: [25].

7.2.7 Estimación de Inversiones

Los costos de inversión del sistema de extracción se estiman en 2.925 millones de pesos aproximadamente, los detalles están en la Tabla 7.34.

Tabla 7.34 Inversiones para sistema de extracción relleno sanitario El Molle.

Componentes	Inversión [CLP]
Gestión y transporte de materiales	14.000.000
Excavación	407.100.000
Pozos de extracción vertical	804.830.141
Cabezales de pozo	69.000.000
Ductos laterales	119.970.000
Ductos intermedios o principales	528.375.000
Sopladores 500 [m ³ /h] a 1.000 [m ³ /h]	68.336.664
Cárcamos de condensado con bombeo	319.200.000
Ingeniería y administración	69.000.000
Antorchas de llama cerrada (opcional)	135.000.000
Margen	633.702.951
TOTAL	2.925.820.010
TOTAL [USD]	4.150.099

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del proyecto de generación eléctrica con motores de combustión, el costo de inversión se estima en 7.203 millones de pesos, incluyendo los costos de aproximadamente 2 [km] de líneas de transmisión aéreas. El detalle de las inversiones está en la Tabla 7.35. La inversión se realiza en forma gradual, debido a la adquisición de los motores en la medida que el flujo de biogás permite aumentar la capacidad instalada.

Tabla 7.35 Inversiones del proyecto de generación eléctrica con motores de combustión interna.

Combustión interna	Inversión[CLP]
Equipos de compresión, tratamiento de biogás y obras civiles	790.000.000
Motor de combustión interna	3.744.000.000
Subestación eléctrica	213.000.000
Interconexión eléctrica	741.080.000
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería	274.404.000
Margen	1.440.621.000
TOTAL	7.203.105.000
TOTAL	10.217.170

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del proyecto de evaporación de lixiviado, se estima una inversión de aproximadamente 1.635 millones de pesos. La estimación de los costos de inversión está en la Tabla 7.36.

Tabla 7.36 Inversiones del proyecto de evaporación de lixiviado.

Evaporación de lixiviados	Inversión [CLP]
Unidad de evaporación, estanques de almacenamiento de lixiviado, sistema de control	1.246.200.000
Movilización, gestión del proyecto e ingeniería	62.310.000
Margen	327.127.500
TOTAL	1.635.637.500
TOTAL [USD]	2.320.053

Fuente: Elaboración propia.

7.2.8 Estimación de costos de operación y mantenimiento

La estimación de los costos de operación y mantenimiento máximos para el sistema de extracción y para cada proyecto de aprovechamiento energético contemplado para el relleno sanitario El Molle, se ven en la Tabla 7.37, los valores no incluyen los costos de electricidad. Se asume un factor de planta de 93% para el proyecto de generación eléctrica con motores de combustión interna.

Tabla 7.37 Costos de operación y mantenimiento de proyectos para relleno sanitario El Molle.

Componentes	Costo [CLP/año]
Sistema de extracción	
Operación y mantenimiento ductos y pozos	259.440.000
Operación y mantenimiento antorcha	3.670.000
Proyecto generación motores de combustión interna	
Operación y mantenimiento unidades de generación.	469.109.038
Proyecto evaporación de lixiviados	
Operación y mantenimiento	379.052.500

Fuente: Elaboración propia.

7.2.9 Análisis de factibilidad económica

Primero se considera el análisis del proyecto de generación eléctrica con motores, se adoptan los siguientes supuestos:

- Precio de venta de energía: 62,2 [CLP/kWh] y un aumento de 1% anual.
- Precio de pago por potencia: 60.948 [CLP/kW].
- Precio Certificado de reducción de emisiones (CER): 2.278 [CLP/ton CO₂e].
- Precio de atributo ERNC: 4 [CLP/kWh].
- Impuesto a las utilidades de 25%.
- Depreciación normal para motores considerando vida útil de 10 años.
- Financiamiento 30% de la inversión con capital propio y 70% con crédito bancario de tasa de interés 6% anual a 20 años.
- Horizonte de evaluación de 30 años.

El precio de venta de la energía corresponde al PMM del año 2014, dicho valor aplica considerando la posibilidad de obtener un contrato de suministro de energía a dicho precio, sin embargo, es difícil concretar contratos de suministros para proyectos de esta magnitud.

En la Tabla 7.38 se tienen los indicadores económicos del proyecto.

Tabla 7.38 Indicadores económicos privados proyecto motores de combustión interna.

Indicador	Valor
TIR privado [%]	10,63
VAN privado (CLP)	404.679.573

Fuente: Elaboración propia.

Existe una segunda posibilidad de comercialización de la energía eléctrica, por medio del mercado Spot, en las cuales las transacciones se realizan a costo marginal. El costo marginal en promedio es mayor que el PMM, sin embargo es mucho más volátil, y el riesgo adoptado en el proyecto es mayor.

Si se realiza el flujo de caja con precio de venta de energía de 83 [CLP/kWh] correspondiente al costo marginal promedio del 2015, se obtienen los resultados de la Tabla 7.39.

Tabla 7.39 Indicadores económicos privados proyecto motores de combustión interna en mercado spot.

Indicador	Valor
TIR privado [%]	12,86
VAN privado (CLP)	1.753.473.990

Fuente: Elaboración propia.

Como factor clave en la factibilidad económica de un proyecto de este tipo es la distancia de la central de generación del punto de inyección. En la Figura 7.21 se observa el análisis de sensibilidad del VAN con respecto a la distancia de la línea de transmisión.

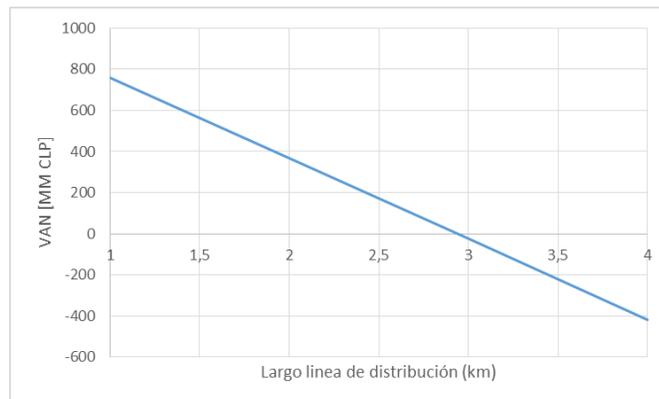


Figura 7.21 Análisis sensibilidad distancia de línea de distribución.

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se considera el proyecto de evaporación de lixiviado, se consideran los siguientes supuestos:

- Impuesto a las utilidades de 25%.
- Depreciación acelerada de evaporadores en 3 años.
- Financiamiento 30% de la inversión con capital propio y 70% con crédito bancario de tasa de interés 6% anual a 20 años.
- Horizonte de evaluación de 20 años.
- Ahorros valorizados en 15.500 [CLP/m³ lixiviado evaporado]

El horizonte se acota a 20 años, en los que el relleno sanitario está operativo, y por tanto debe existir tratamiento para lixiviados, debido a la menor vida útil del proyecto, se considera apropiado depreciar aceleradamente los activos para optar por mayores beneficios tributarios.

El ahorro de dinero por unidad de lixiviado tratado, considera la diferencia entre el costo del tratamiento por evaporación y la externalización de servicios de tratamiento a una planta química externa.

Los resultados están en la Tabla 7.40.

Tabla 7.40 Indicadores económicos proyecto evaporación de lixiviados.

Indicador	Valor
TIR privado [%]	0,81
VAN privado (CLP)	-2.530.977.675

Fuente: Elaboración propia.

Si ya se disponen de las instalaciones de extracción de biogás, y no se considera en la inversión se obtienen los resultados de la Tabla 7.41.

Tabla 7.41 Indicadores económicos proyecto evaporación de lixiviados sin sistema de extracción de biogás.

Indicador	Valor
TIR privado [%]	11,28
VAN privado (CLP)	157.217.975

Fuente: Elaboración propia.

8 Discusiones

8.1 Discusión caracterización de rellenos sanitarios chilenos

La base para establecer los beneficios económicos o sociales de explotar el biogás, es determinar el potencial energético disponible, por lo cual es clave validar las proyecciones de biogás realizadas. En la práctica, las proyecciones de biogás se validan por medio de pruebas en terreno.

Es difícil validar las proyecciones de biogás realizadas en la caracterización de los rellenos sanitarios con la escasa información disponible en Chile, debido a la ausencia de datos históricos de producción de biogás en rellenos sanitarios y también debido a que la mayoría de los rellenos sanitarios posee instalaciones poco sofisticadas y de baja eficiencia de extracción, por lo que la extracción de biogás reportada difiere significativamente de lo efectivamente producido.

Por lo anterior y a causa de la incertidumbre en la información, durante las estimaciones se toman todas las consideraciones para obtener resultados lo más conservadores posibles. Para efectos de estudiar la validez las proyecciones de biogás realizadas en este trabajo, se compara la energía aprovechable de los únicos proyectos de aprovechamiento energético en Chile, los cuales cuentan con registros de datos operativos históricos para proyectar con menor incertidumbre el potencial energético.

En el caso del relleno Sanitario Santa Marta se realiza una estimación de un potencial energético máximo de 15.3 [MWe] (considerando eficiencia eléctrica de 42%) en contraste a los 20 [MWe] de potencia instalada que contempla el proyecto original, lo puede explicarse por los supuestos adoptados para conseguir resultados conservadores en las estimaciones.

Sin embargo, en el caso del proyecto del relleno sanitario de El Molle, donde se trabajó con datos más precisos para obtener mejores estimaciones del potencial energético, se obtiene que la máxima energía eléctrica disponible es de aproximadamente 4,3 [MWe], valor que es similar a los 4 [MWe] que contempla el proyecto original. Esto último permite validar el modelo de producción de biogás escogido y las metodologías para calibrar los resultados a las condiciones físicas de los rellenos en Chile.

8.2 Discusión de resultados de implementación de modelo de diseño

Para determinar la validez de los resultados de la implementación del modelo de diseño, se contrasta el costo de inversión total estimado para los proyectos El Molle y Osorno, con datos de inversión estimada de los proyectos originales.

En el caso del proyecto original de generación eléctrica de El Molle, la inversión estimada para la central de generación y la interconexión eléctrica es de 10,8 [MM USD], mientras que la estimación realizada para el proyecto planteado mediante el empleo de la metodología desarrollada, se estimó en aproximadamente en 10,2 [MM USD].

Para el proyecto original para el sistema de extracción del relleno sanitario de Osorno la inversión se estima en aproximadamente 655.000 [USD], mientras que el proyecto planteado mediante la metodología descrita se calculan 812.000 [USD].

Se puede advertir bastante similitud en los montos de inversión. Si bien hay diferencias significativas en caso del sistema de extracción de biogás en Osorno, esto se explica por ciertas componentes de inversión no consideradas en el proyecto original, como por ejemplo, excavaciones para montaje de pozos verticales.

8.3 Discusión económica de estudio de casos relleno sanitario de Osorno

Los resultados del análisis de factibilidad económica de los casos de estudios definidos se resumen en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Resumen evaluación de proyectos en relleno sanitario de Osorno.

Proyecto	Comentario	Indicador	Valor
Cogeneración con microturbinas.	Abastecimiento de electricidad a aserraderos y ACS para 500 viviendas	TIR Privado [%]	8
		VAN Privado [CLP]	-393.189.850
		TIR Social [%]	0
		VAN Social [CLP]	-1.961.197.277
Generación de ACS y vapor con calderas.	Abastecimiento de ACS y vapor a 350 viviendas y excedentes de vapor a aserraderos	TIR Privado [%]	2,65
		VAN Privado [CLP]	-1.336.494.308
		TIR Social [%]	26,04
		VAN Social [CLP]	9.268.240.588

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al primer proyecto, se concluyó que el proyecto no es rentable en forma privada ni social. El resultado de la evaluación privada es muy sensible a la tarificación de los productos que se ofrecen. Si bien existe un precio medio de mercado para las transacciones de energía eléctrica, para la comercialización de productos térmicos (vapor y ACS), se debe considerar el costo alternativo de los combustibles empleados localmente para fijar una tarifa competitiva.

En la zona cercana al emplazamiento del relleno sanitario, la biomasa forestal (leña y residuos de madera) es una alternativa de energía térmica a precios muy bajos, lo que dificulta el ingreso de combustibles alternativos como el biogás. La posibilidad de comercializar energía térmica con un cliente industrial, con acceso a otras fuentes energéticas de bajo costo, como los residuos de madera en un aserradero, impiden rentabilizar el proyecto. La comercialización de energía térmica a comunidades permite considerar una tarifa mayor, sin embargo, las inversiones aumentan significativamente por concepto de una red distrital, y los beneficios sociales del proyecto no justifican un subsidio tampoco

A sí mismo, el proyecto de comercialización de agua caliente y vapor generado mediante calderas, tampoco resulta rentable privadamente. Al igual que el proyecto anterior, la imposibilidad de ofrecer tarifas competitivas con respecto otros combustibles empleados en la zona, no permite que el proyecto sea rentable, a pesar de que en este caso se contempla que la mayor parte de la energía se comercializaría mediante la red distrital, la que supone tarifas un poco más elevadas, por lo que el aumento en los ingresos no compensarían el alto costo de inversión en una red distrital.

Sin embargo, este segundo proyecto es rentable socialmente, debido esencialmente a los beneficios de sustituir la leña húmeda para calefacción de hogares, para contribuir en la disminución de la concentración de MP2.5 en una zona saturada. Es importante señalar que, si bien valora el beneficio

social de sustituir la leña húmeda como fuente de calefacción, el costo de esta otra es muy elevado, y no se puede considerar un proyecto que utilice la energía plenamente en calefacción, porque el consumo de esta presenta estacionalidades que implican grandes desperdicios de biogás en épocas de bajo consumo.

En cuanto a los beneficios sociales de los proyectos de biogás, debido a la indexación del precio social del carbono con el precio de los bonos de carbono (y el bajo precio actual de estos), el beneficio de la disminución de gases de efecto invernadero es despreciable, y el único beneficio social relevante, es la sustitución de la leña húmeda en zonas saturadas para disminuir la concentración de material particulado.

8.4 Discusión económica de estudio de casos relleno sanitario de El Molle

Los resultados de los análisis de los casos de estudio en el relleno sanitario de El Molle se resumen en Tabla 8.2.

Tabla 8.2 Resumen evaluación de proyectos en relleno sanitario El Molle.

Proyecto	Comentario	Indicador	Valor
Generación eléctrica con motores.	Inyección a red eléctrica con precio de energía igual a Precio medio de mercado	TIR Privado [CLP]	10,63
		VAN Privado [%]	404.679.573
	Inyección a red eléctrica con precio de energía promedio costo marginal	TIR Privado [CLP]	12,86
		VAN Privado [%]	1.753.473.990
Evaporación de lixiviado	Se considera inversión en sistema de extracción de biogás	TIR Privado [CLP]	0,81
		VAN Privado [%]	-2.530.977.675
	No se considera inversión en sistema de extracción de biogás	TIR Privado [CLP]	11,28
		VAN Privado [%]	157.217.975

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del proyecto de generación eléctrica con motores de combustión interna, se obtiene que para ambos escenarios, precio medio de mercado y precio mercado spot, el proyecto es rentable. Sin embargo, es importante aclarar que un modelo de negocio que pretende vender la energía en el mercado spot presenta mucho mayor riesgo por la volatilidad de los precios.

Los resultados obtenidos del estudio de factibilidad económica de generación eléctrica con motores explican la presencia de este tipo de proyectos, tanto en ejecución como en operación, que existen en los rellenos sanitarios de gran capacidad de la zona central. Naturalmente, como cualquier otro proyecto eléctrico, la distancia al punto de interconexión eléctrica con la red, es un factor clave para la factibilidad económica.

Para el proyecto de evaporación de lixiviado, observa que si se considerara la inversión del sistema de extracción, el proyecto no es rentable, en efecto, los requerimientos de biogás para la evaporación son pequeños en comparación al volumen total generado, por lo que un proyecto de evaporación de lixiviado no justifica un sistema de extracción solo para ese propósito. Sin embargo, si se considera la existencia previa de la instalación de captación de biogás, el proyecto es rentable como alternativa a otros sistemas de tratamientos para lixiviado, y puede complementarse con otros mecanismos de aprovechamiento energético.

9 Conclusiones

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

- i. En relación al estado del arte de sistemas de extracción de biogás, las instalaciones más comunes constan de pozos de extracción vertical o sistemas mixtos. Las principales sugerencias técnicas para el diseño de sistemas de extracción de biogás están incluidos en la metodología de diseño que contempla este trabajo, destacando el diseño recomendado para los pozos de extracción, recomendaciones para su localización mediante el método del cilindro y HDPE como el material preferente para la construcción de pozos de extracción y ductos de transporte de biogás. Con respecto a los sistemas instalados en Chile, se constató que son muy poco sofisticados y no se ajustan a los estándares modernos. Para los rellenos sanitarios con pozos de extracción operativos, en los que se pretenda aprovechar el biogás en términos energéticos, se sugiere un reacondicionamiento de la infraestructura existente y construcción de nuevos pozos.

En lo referido a las tecnologías de aprovechamiento energético, se identifican tres categorías: i) Generación eléctrica o cogeneración, ii) Uso directo del biogás de medio grado de energía y iii) Comercialización de biogás de alto grado de energía asimilable a gas natural. De las dos primeras categorías, se seleccionó cuatro alternativas tecnológicas, que poseen madurez tecnológica y factibilidad técnica de acuerdo a los volúmenes de biogás generados en los rellenos sanitarios en Chile, las cuales son: a) Motores de combustión interna, b) Microturbinas, c) Uso directo del biogás en calefacción o calor de proceso y d) Evaporación de lixiviado. En Chile los pocos proyectos de aprovechamiento energético existentes consisten en la instalación de motores de combustión interna.

- ii. Con respecto a los modelos de producción de biogás, se empleó el modelo LandGEM. Para representar mejor el fenómeno de generación de biogás, se complementó dicho modelo con la metodología IPCC, el método estequiometrico y una metodología de evaluación difusa, que en conjunto permiten determinar los valores de las constantes cinéticas y la composición del biogás.

Se otorga valores sugeridos para las constantes cinéticas de cada región del país, con el objetivo facilitar el cálculo del flujo de biogás. Se verificó la validez de los resultados haciendo una comparación entre el potencial energético estimado, con la potencia planificada de proyectos eléctricos chilenos en ejecución y en operación. Se obtuvo valores subestimados de hasta 30%. En el caso de la aplicación del modelo LandGEM con datos más precisos de la operación del relleno sanitario, la estimación alcanza hasta un 7% de precisión con respecto al flujo estimado por medio de pruebas en terreno. Tal precisión valida el modelo de predicción de biogás y las constantes cinéticas estimadas para efectos de un estudio de ingeniería conceptual.

- iii. Del proceso de estimación del potencial energético de los rellenos sanitarios en Chile, se notó que es posible clasificarlos de acuerdo a la zona geográfica en que se emplazan.

En la zona norte (desde la XV a la IV región) los rellenos sanitarios son en general de pequeño potencial energético y de bajas tasas de generación de biogás por unidad de residuo, esto es debido a las condiciones de aridez característica de esta parte del territorio, que no favorecen la generación de biogás.

En la zona centro (Región Metropolitana y V región) se encuentran los rellenos de gran potencial energético, con una potencia térmica promedio en el tiempo de 9 [MW] hasta 30 [MW].

En la zona sur (desde la VI a la X región) existen condiciones climáticas que favorecen la generación de biogás, sin embargo, los rellenos sanitarios son de baja capacidad y por lo tanto de potencial energético moderado, se establece que existen al menos cuatro rellenos sanitarios con una potencia térmica promedio comprendida entre 3 [MW] y 6 [MW].

De la clasificación anterior, se dedujo que los rellenos sanitarios de interés energético están principalmente en la zona centro y la zona sur.

Con respecto a las tecnologías de aprovechamiento energético propuestas, los motores a combustión interna representan la mejor alternativa para rellenos sanitarios de gran capacidad, especialmente los localizados en la zona central, el modelo de negocios típico es venta e inyección de la energía eléctrica a la red.

El uso de microturbinas es adecuado para rellenos sanitarios de media y baja capacidad, como podrían ser los localizados en la zona sur. Debido a que el costo unitario de inversión de las microturbinas es mayor a otras tecnologías, es necesario buscar alternativas de comercialización de la energía cogenerada para lograr rentabilidad económica, el modelo de negocios más común es comercialización de energía eléctrica y térmica directamente con un cliente industrial o una comunidad cercana.

La generación de agua caliente y vapor mediante calderas es una opción que se adapta bien a un amplio rango de capacidades, y su factibilidad depende de la disponibilidad de un cliente cercano y sus necesidades, puede comercializarse para uso en calor de proceso o calefacción.

Finalmente la evaporación de lixiviado es también una alternativa flexible, dependiendo de la capacidad del relleno sanitario, el parámetro de interés para determinar la factibilidad técnica y económica es la relación entre tasa de generación de lixiviado y la tasa de generación de biogás.

- iv. En relación al modelo de estudios para proyectos de biogás, se sistematiza el diseño básico de una instalación, desde la fase de caracterización de un relleno sanitario hasta el análisis de la factibilidad económica. Se incluye en dicha metodología, el modelamiento del flujo de biogás, el dimensionamiento y el diseño de los principales componentes de un sistema de extracción, la estimación del potencial energético disponible, el establecimiento de

criterios para la selección de tecnologías de aprovechamiento energético y sus respectivos equipos, y el desarrollo de un desglose de los costos de construcción, montaje, mantención y operación. Los análisis de factibilidad se realizan tanto de la perspectiva privada como social. Se contrastaron los valores de inversión estimados, con datos disponibles de inversión de proyectos reales. Se obtuvo valores similares con variaciones entre 6% a 20%, lo que valida el modelo de estudios propuesto.

- v. Con respecto a los proyectos analizados para el relleno sanitario de Osorno, tanto el de cogeneración con microturbinas como el de generación de agua caliente y vapor, no son rentables privadamente por la imposibilidad de establecer tarifas competitivas de comercialización de la energía, debido a que la biomasa forestal y leña húmeda son bienes sustitutos al biogás y de bajo costo. Sin embargo, se determinó que los proyectos son socialmente rentables cuando sustituyen el uso de leña húmeda, debido a la valorización de aquello en términos de costos en salud y muerte evitadas.

Para los proyectos en el relleno sanitario El Molle, se comprueba que la instalación de motores de generación eléctrica es rentable, pero un factor clave que puede impedir su ejecución es la distancia de la central de generación al punto de inyección en la red. En el caso del proyecto de evaporación de lixiviados, se concluyó que un proyecto de esta naturaleza no justifica la instalación de un sistema de extracción de biogás. Sin embargo, si este ya existiera, el proyecto es rentable y representa ahorros efectivos en el tratamiento de lixiviados.

En resumen, de la información expuesta y los resultados obtenidos en el desarrollo y aplicación del modelo de diseño, se sugiere que las mejores oportunidades de negocio para los proyectos de valoración energética de biogás, producidos en rellenos sanitarios chilenos, se concentran en la zona central. La tecnología más competitiva son los motores de combustión interna, lo que es consistente con la evidencia internacional, pues más del 50% de los proyectos en operación corresponden a este tipo de instalaciones.

La factibilidad privada de otros tipos de proyectos de biogás depende, en gran parte, de las características y requerimientos de su entorno, especialmente las potenciales tarifas de comercialización de productos energéticos. Se evidenció que existen oportunidades con valor social, como la sustitución de leña húmeda en zonas saturadas, mecanismo mediante el cual un proyecto podría optar por un subsidio que genere incentivos a invertir a un agente privado. Por las razones anteriores, es crucial analizar exhaustivamente el mercado, las condiciones y restricciones de la zona de emplazamiento de un relleno sanitario, para determinar un modelo de negocios adecuado.

10 Bibliografía

- [1] Comisión nacional de energía y Gamma Ingenieros S.A, «Análisis estratégico de elementos de política para biogases combustibles en Chile,» 2010.
- [2] Comisión nacional de energía y GTZ, «Potencial de biogás, Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás,» 2007.
- [3] IPCC, «Climate Change, The Physical Science Basis,» 2007.
- [4] Ministerio del Medio Ambiente, «Reporte del Estado del Medio Ambiente,» Santiago, 2013.
- [5] M. D. L. A. Cornejos Salas, Guía para el diseño de sistemas de recuperación de biogás en rellenos sanitarios, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago: Universidad de Chile, 2009.
- [6] Ministerio del Ambiente Perú, Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual, Lima, 2008.
- [7] J. Monreal, «La recuperación de biogás de rellenos sanitarios en Santiago de Chile,» Santiago, 1999.
- [8] V. Rajaram, From Landfill Gas to Energy - Technologies and Challenges, New Delhi: CRC Press/ Balkema Taylor & Francis Group, 2011.
- [9] F. Kreith, Handbook of Solid Waste Management 2ª Edition, California: McGraw-Hill, 2002.
- [10] Sandra Mazo, SCS Engineers, *Sistemas de Captura y Control del Biogás*, 2010.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency, International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects, 2012.
- [12] Conestoga-Rovers & Associates, Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines, Richmond, British Columbia, 2010.
- [13] Q. Aguilar Virgen, «Modelo Mexicano para la estimación de la generación de biogás,» *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 2011.
- [14] G. Anurag, A. Gopal y J. Ramesh, «A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation,» *Waste management & Research*, 2006.
- [15] Landfill Methane Outreach Program, LFG Energy Project Development Handbook, 2015.
- [16] H. Terraza y H. Willumsen, Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization, 2009.

- [17] Conestorga Rovers & Associates, Manual para la preparación de proyectos de generación de energía a partir de gas de rellenos sanitarios en America Latina y el Caribe, 2004.
- [18] COSEMAR S.A, «Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Copiapo,» 2005.
- [19] Consorcio Santa Marta S.A, «Estudio Impacto Ambiental relleno sanitario Santa Marta,» 2001.
- [20] EMG Consultores, «Estudio de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Santiago Poniente,» 2001.
- [21] ENASA S.A, «Estudio de Impacto Ambiental relleno sanitario El Retamo,» 2000.
- [22] Eco Securities, «Declaración de Impacto Ambiental Mejora sistema de captura y combustión controlada de gases del antiguo vertedero y actual relleno sanitario El Panul,» 2007.
- [23] GHD, «Estudio de Impacto Ambiental Relleno Sanitario Los Ríos,» 2012.
- [24] GesNat Consultores Ambientales, «Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario La Higuera,» 2008.
- [25] IGS Chile Ltda, «Estudio de Impacto Ambiental relleno Sanitario El Molle,» 2005.
- [26] Ilustre Municipalidad de Freire, «Estudio de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Coipúe, Freire,» 1999.
- [27] Ilustre Municipalidad de Huara, «Declaración de Impacto Ambiental Relleno Sanitario manual en la Localidad de Huara,» 2002.
- [28] Ilustre Municipalidad de Mejillones, «Declaración de Impacto Ambiental relleno snaitario de Mejillones,» 2009.
- [29] Ilustre Municipalidad de Pica, «Declaración de Impacto Ambiental Optimización y mejoramiento de operación del relleno sanitario de Pica,» 2012.
- [30] Ilustre Municipalidad de Pozo Almonte, «Declaración de Impacto Ambintal Construcción relleno sanitario para la comuna de Pozo Almonte,» 2003.
- [31] Ilustre Municipalidad de Tocopilla, «Declaración de Impacto Ambiental relleno sanitario Quebrada Ancha,» 2008.
- [32] Ilustre municipalidad de Arica, «Declaración de impacto ambiental relleno sanitario municipal Quebrada Encantada Alta,» 2009.
- [33] Ingeniería y construcción Cardenal Caro Ltda, «Declaración de Impacto Ambiental relleno sanitario Las Quilas,» 2002.

- [34] Kristmann Ingenieros, «Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario comuna de Caldera,» 2009.
- [35] ProAmbiente Ingeniería y servicios, «Estudio de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Los Angeles,» 2003.
- [36] kfw Bankengruppe, «Estudio de Impacto Ambiental Relleno Sanitario Provincial de Osorno,» 2009.
- [37] Ministerio de Energía, Estudio Propuesta de perfeccionamiento de entorno a proyectos de aprovechamiento energético de lodos y residuos sólidos urbanos, 2011.
- [38] U.S. Army Corps of Engineers, Landfill gas collection and treatment systems, 2013.
- [39] T. Brindley, «Landfill Gas, Industry Code of Practice, The Management of Landfill Gas,» 2012.
- [40] Scottish Environment Protection Agency, Guidance on the management of landfill gas, Bristol, 2004.
- [41] C. p. Paulo Coelho, *Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines*, 2007.
- [42] A. Hamid, R. Debra y N. Antti, «Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data,» *International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology*, 2013.
- [43] Instytut Nafty Gazu, Landfill Gas Energy Technologies, Cracovia, 2010.
- [44] U.S. Environmental Protection Agency, Landfill Methane Outreach Program, *LFGcost-Web V3.0*, Washington D.C, 2014.
- [45] GreenLabUC, «Estudio de Prefactibilidad Técnica y Económica de Aprovechamiento Energéticos para Vertederos de la Zona Centro-Sur de Chile,» Santiago, 2014.
- [46] J. M. Alex Stege, «Evaluación del Relleno Sanitario y Estudio de Prefactibilidad para la Recuperación y la utilización del biogás en el Relleno Sanitario El Navarro,» Virginia, 2008.
- [47] Universidad de Concepción Unidad de Desarrollo Tecnológico, «Calefacción distrital con biomasa en Chile, Evaluación de prefactibilidad técnica, económica y social de proyectos piloto en Osorno,» Coronel, 2015.
- [48] Green solutions, «Medición y Mitigación de la Huella de Carbono en la Comisión Nacional del Medio Ambiente,» Santiago, 2011.
- [49] Eukrasia Technology & Environment, «Leachate Evaporator SWANA Western Symposium of Solid Waste Association of North America,» California, 2012.

- [50] E. Giraldo, «Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes,» *Revista de Ingeniería N° 14 Universidad de los Andes Colombia*, 2002.
- [51] Ministerio Desarrollo Social, «Precios Sociales Vigentes 2015,» 2015.
- [52] Comisión Nacional del Medio Ambiente, «Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile,» 2010.

Anexos

Anexo A Modelo de estimación de “k” mediante evaluación difusa

La lógica difusa aplica el concepto de que un valor puede tomar valores de pertenencia dentro de una serie de conjuntos delimitados. Esto permite tratar información imprecisa en términos de conjuntos, que se denominan conjuntos difusos y sistemas de reglas para definir acciones o valores de salida.

Para cada variable se deben definir una serie de conjuntos difusos denominados con variables lingüísticas o cualitativas, como por ejemplo: “bajo”, “medio” o “alto”. Cada conjunto difuso debe ir acompañado de una función de membresía, que determinará para cada valor del conjunto un valor de pertenencia a este.

El modelo es implementado en el toolbox fuzzy del software MATLAB.

En este modelo para determina “k” se emplean como las variables más importantes las siguientes:

- Humedad del relleno sanitario
- Temperatura promedio del relleno sanitario
- Potencial de óxido-reducción
- Fracción biodegradable de los residuos.

La humedad del relleno sanitario es cuantificada mediante la precipitación media anual.

La temperatura del relleno sanitario dependerá de la temperatura promedio diaria de la zona de emplazamiento del relleno sanitario y la profundidad de este.

El potencial de óxido-reducción es dependiente de la altura del relleno sanitario también.

Primero se definen las funciones de membresía y los conjuntos difusos para la temperatura promedio diaria y la profundidad del relleno sanitario. Los que se observan en la Figura A.1 y Figura A.2. Con lo anterior cualquier valor de entrada de temperatura y profundidad, tendrá un grado de pertenencia (0 a 1) a 1 o 2 conjuntos difusos. Como máximo habrá 4 combinaciones, por ejemplo:

Si la temperatura promedio diaria es 5 [°C], pertenece a los conjuntos Muy-bajo y Bajo.

Si la profundidad del relleno es 3 [m], pertenece a los conjuntos Bajo y Medio.

Luego las 4 combinaciones son:

- Temperatura Baja y Profundidad Baja
- Temperatura Baja y Profundidad Media
- Temperatura Muy Baja y Profundidad Baja
- Temperatura Muy Baja y Profundidad media

Para determinar el valor de salida, en este caso la temperatura dentro del relleno sanitario se debe definir también los conjuntos difusos y sus respectivas funciones de membresía. (Figura A.3)

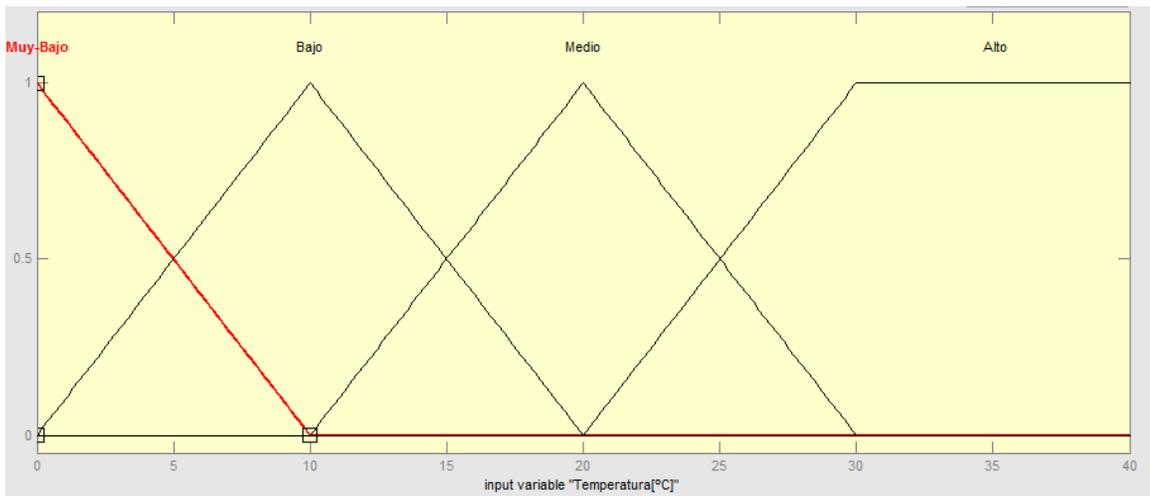


Figura A.1 Conjuntos difusos y funciones de membresía temperatura promedio diaria.

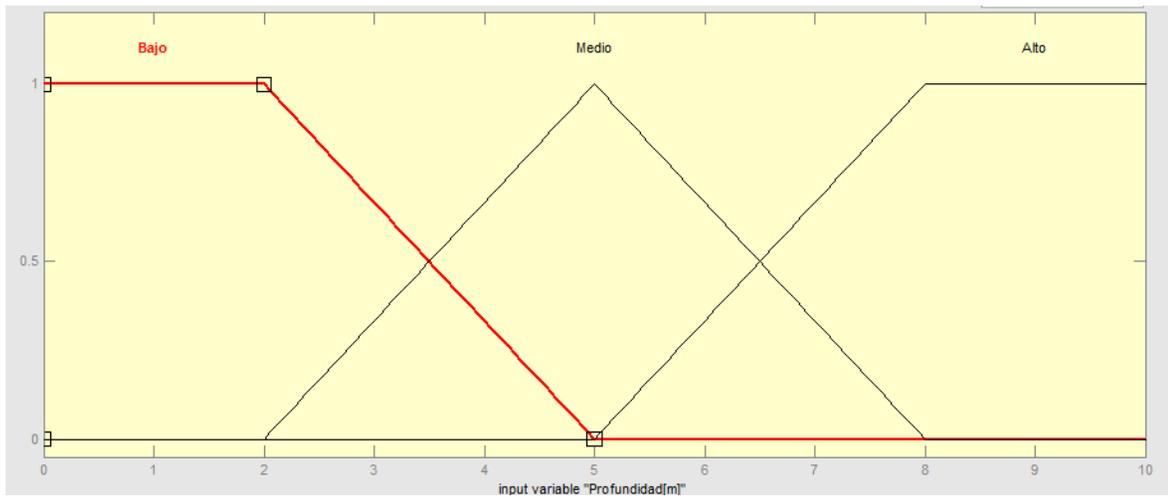


Figura A.2 Conjuntos difusos y funciones de membresía profundidad relleno sanitario.

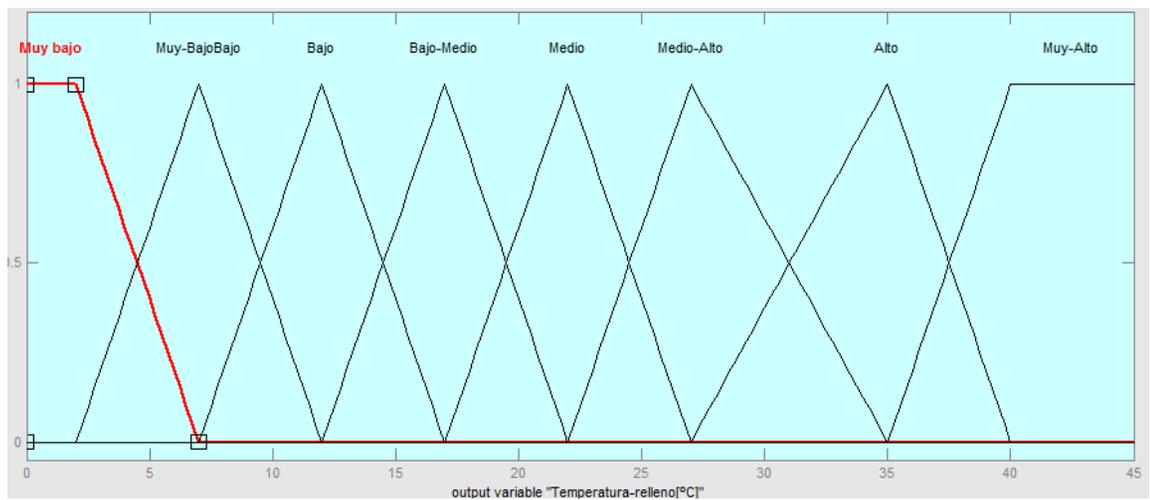


Figura A.3 Conjuntos difusos y funciones de membresía temperatura relleno sanitario.

Para cada combinación se asigna un valor y un conjunto difuso de la variable de salida, en este caso la temperatura del relleno sanitario. La asignación del conjunto se hace mediante el sistema de reglas de la Tabla A-1 y el grado de pertenencia corresponde al valor mínimo entre de los grados de pertenencia de los valor de entrada.

Tabla A-1 Sistema de reglas asociativas conjuntos difusos temperatura relleno sanitario.

Temperatura promedio diaria profundidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
Bajo	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
Medio	Muy BajoBajo	Bajo-Medio	Medio-Alto	Alto
Alto	Bajo-Medio	Medio	Alto	Muy Alto

Entonces se obtiene 4 resultados de pertenencia a conjuntos definidos para la temperatura del relleno sanitario. Para determinar finalmente el valor de salida, se usa el método del centroide, que consiste en determinar el centroide, correspondiente al área bajo la curva dado por el nivel de pertenecía de cada conjunto difuso. Este método se observa esquemáticamente en la Figura A.4.

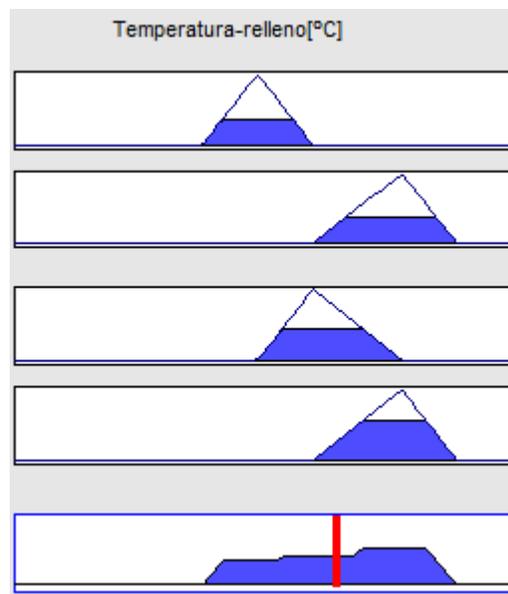


Figura A.4 Método del centroide.

Análogo al procedimiento anterior se definen los conjuntos difusos y las funciones de membresía de las variables de entrada: Temperatura del relleno sanitario, Profundidad del relleno sanitario (como función del potencial de óxido-reducción), la precipitación promedio anual (como función de la humedad del relleno sanitario) y la fracción biodegradable de los residuos. Se observan respectivamente en las

Para la variable de salida: tasa anual de generación de metano “k”, sus conjuntos difusos y funciones de membresía se observan en las Figura A.5, Figura A.6, Figura A.7, Figura A.8 y Figura A.9

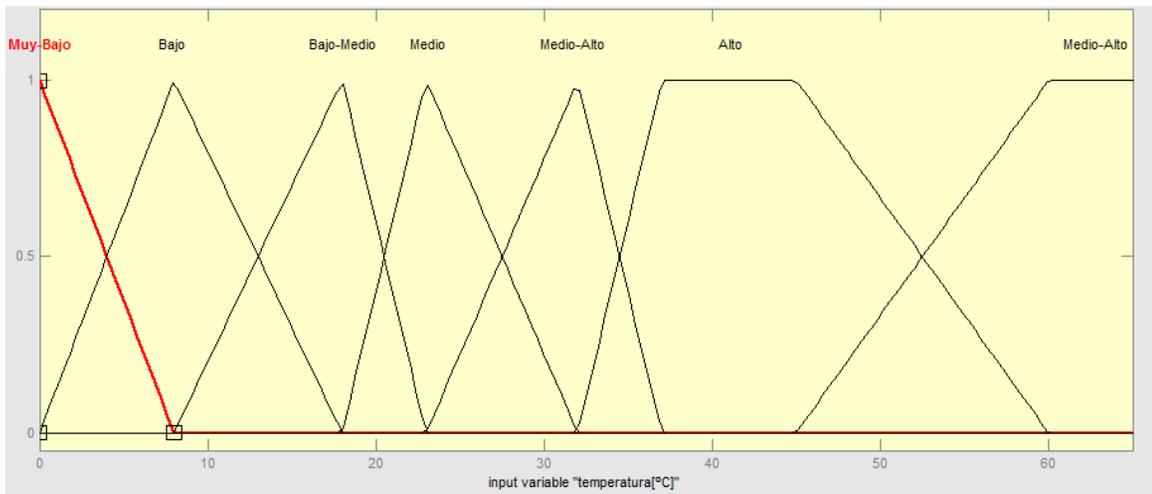


Figura A.5 Conjuntos difusos y funciones de membresía temperatura relleno sanitario.

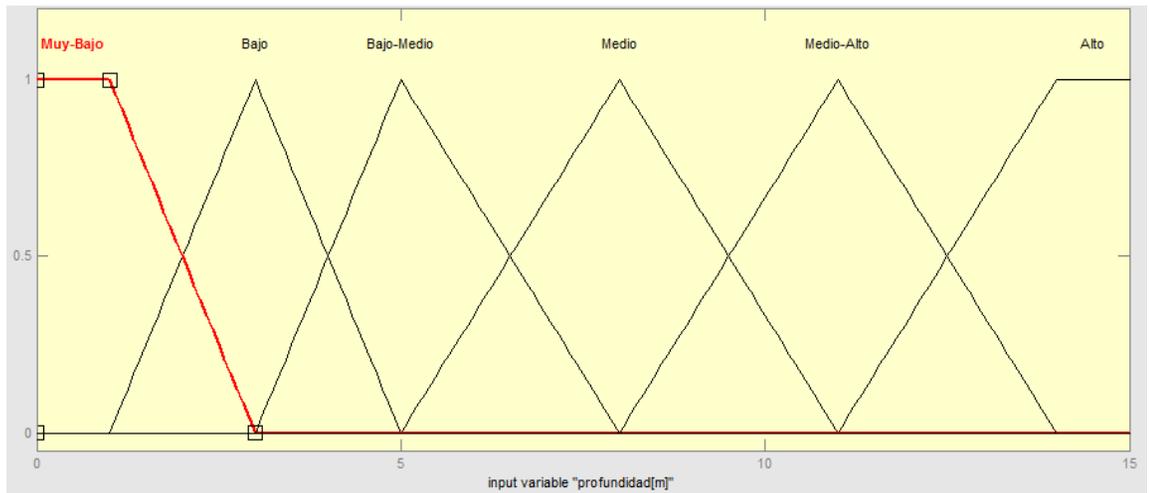


Figura A.6 Conjuntos difusos y funciones de membresía profundidad relleno sanitario.

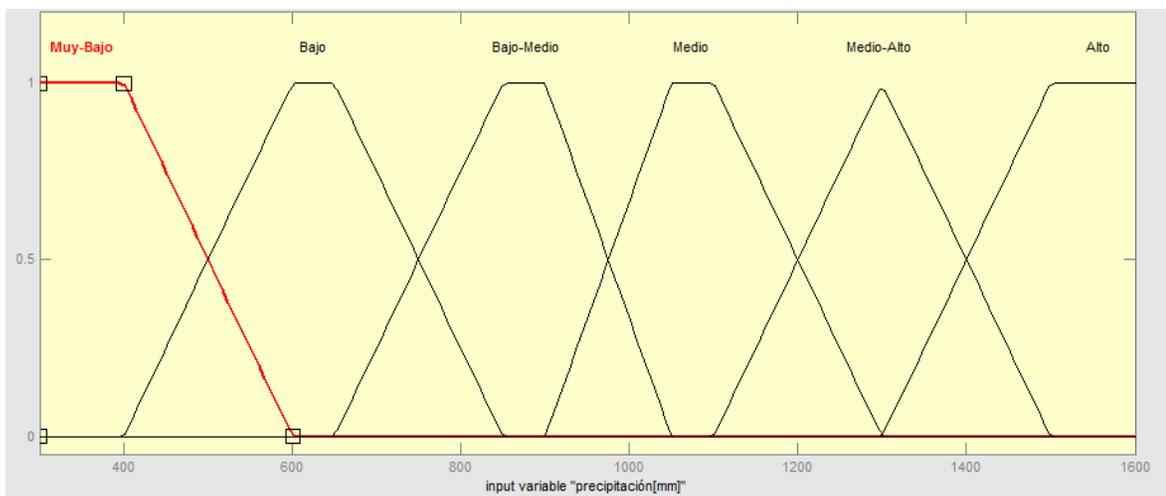


Figura A.7 Conjuntos difusos y funciones de membresía precipitación.

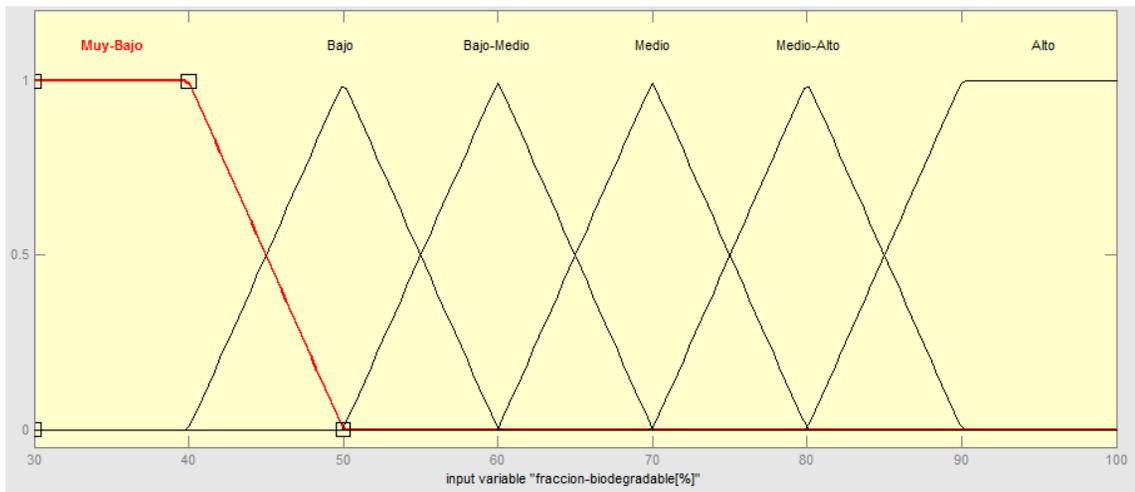


Figura A.8 Conjuntos difusos y funciones de membresía fracción biodegradable.

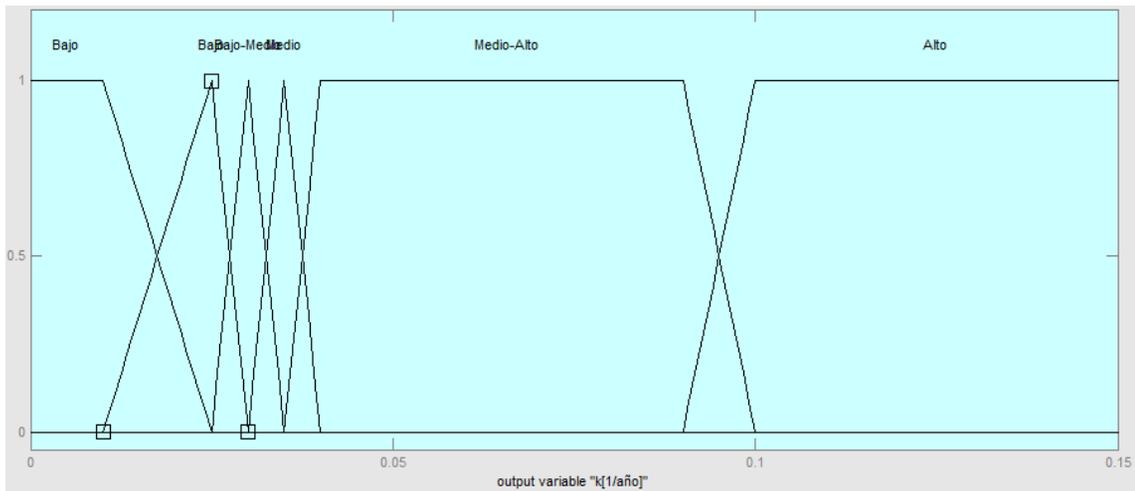


Figura A.9 Conjuntos difusos y funciones de membresía “k”.

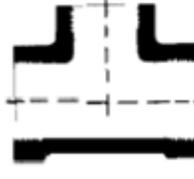
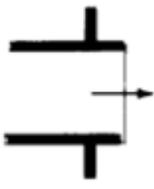
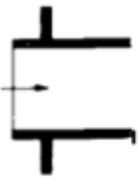
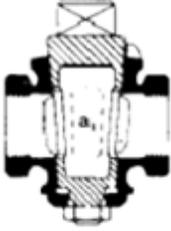
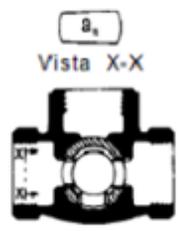
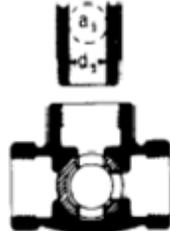
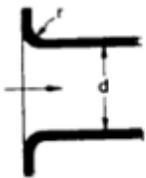
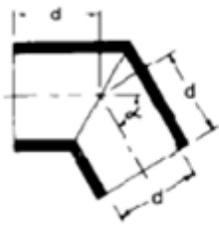
Para determinar el valor de salida, se debe construir una matriz relacional “R” de 4x6, en que cada elemento r_{ij} corresponde a el grado de pertenecía de del parámetro i en el conjunto j .

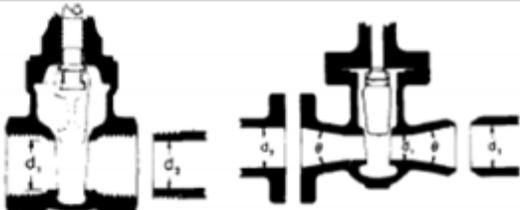
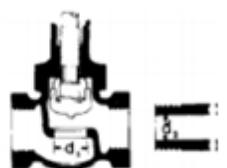
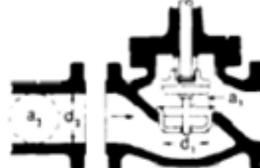
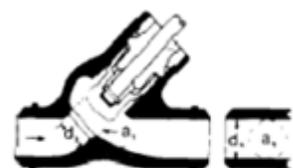
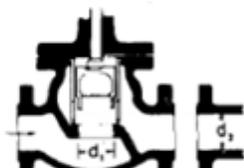
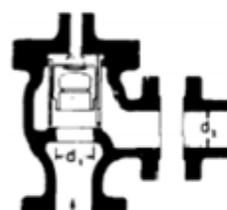
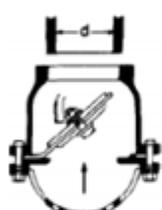
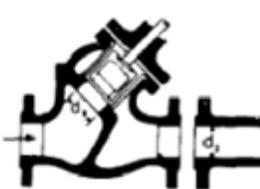
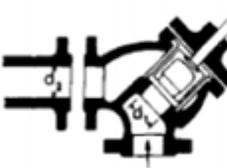
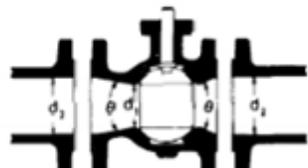
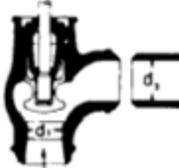
Debe realizarse el producto o composición Max-Mín entre la matriz R y un vector de pesos “w” dado por:

$$w = \begin{bmatrix} \text{Precipitación} & \text{temperatura del relleno} & \text{fracción biodegradable} & \text{profundidad} \\ 0,83 & 0,08 & 0,08 & 0,01 \end{bmatrix}$$

El vector resultante corresponde al vector de pertenencia a cada conjunto difuso en k. Para determinar el valor de k finalmente se emplea nuevamente el método del centroide.

Anexo B Tabla Diámetro/longitud equivalente para accesorios y válvula

Codo estandar de 90	Codo estandar de 45	Curvas de 180° de radio corto	Conexiones estandar en t																																												
																																															
$K=30 f_T$	$K=16 f_T$	$K=50 f_T$	Flujo directo $K=60 f_T$ Flujo desviado 90. $K=60 f_T$																																												
SALIDAS DE TUBERIAS			ENTRADAS DE TUBERÍA																																												
Con resalte	De cantos vivos	Redondeada	Con resalte hacia el interior																																												
																																															
	$K=1$		$K=0.78$																																												
VÁLVULAS DE MACHO Y LLAVES			ENTRADAS DE TUBERÍA																																												
Paso directo	Tres entradas		A tope																																												
				<table border="1"> <thead> <tr> <th>r/d</th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.00</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>0.02</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>0.04</td> <td>0.24</td> </tr> <tr> <td>0.06</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>0.10</td> <td>0.09</td> </tr> <tr> <td>0.15 y mas</td> <td>0.04</td> </tr> </tbody> </table>	r/d	K	0.00	0.5	0.02	0.28	0.04	0.24	0.06	0.15	0.10	0.09	0.15 y mas	0.04																													
r/d	K																																														
0.00	0.5																																														
0.02	0.28																																														
0.04	0.24																																														
0.06	0.15																																														
0.10	0.09																																														
0.15 y mas	0.04																																														
Si $\beta=1$ $K_1=18 f_T$	Si $\beta=1$ $K_1=30 f_T$	Si $\beta=1$ $K_1=90 f_T$																																													
Curvas y codos de 90° con bridas o con extremos para soldar a tope			Curvas en escuadra o falsa escuadra																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>r/d</th> <th>K</th> <th>r/d</th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>$20f_T$</td> <td>8</td> <td>$24f_T$</td> </tr> <tr> <td>1.5</td> <td>$14f_T$</td> <td>10</td> <td>$30f_T$</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>$12f_T$</td> <td>12</td> <td>$34f_T$</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>$12f_T$</td> <td>14</td> <td>$38f_T$</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>$14f_T$</td> <td>16</td> <td>$42f_T$</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>$17f_T$</td> <td>20</td> <td>$50f_T$</td> </tr> </tbody> </table>	r/d	K	r/d	K	1	$20f_T$	8	$24f_T$	1.5	$14f_T$	10	$30f_T$	2	$12f_T$	12	$34f_T$	3	$12f_T$	14	$38f_T$	4	$14f_T$	16	$42f_T$	6	$17f_T$	20	$50f_T$		<table border="1"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>$2 f_T$</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>$4 f_T$</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>$8 f_T$</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>$15 f_T$</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>$25 f_T$</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>$40 f_T$</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>$60 f_T$</td> </tr> </tbody> </table>	α	K	0	$2 f_T$	15	$4 f_T$	30	$8 f_T$	45	$15 f_T$	60	$25 f_T$	75	$40 f_T$	90	$60 f_T$
r/d	K	r/d	K																																												
1	$20f_T$	8	$24f_T$																																												
1.5	$14f_T$	10	$30f_T$																																												
2	$12f_T$	12	$34f_T$																																												
3	$12f_T$	14	$38f_T$																																												
4	$14f_T$	16	$42f_T$																																												
6	$17f_T$	20	$50f_T$																																												
α	K																																														
0	$2 f_T$																																														
15	$4 f_T$																																														
30	$8 f_T$																																														
45	$15 f_T$																																														
60	$25 f_T$																																														
75	$40 f_T$																																														
90	$60 f_T$																																														

VALVULAS DE COMPUERTA		VALVULAS DE RETENCION DE DISCO OSCILANTE		
 <p>Si $\beta=1$, $\Theta=0$ $K_1=8 f_r$</p>		 <p>$K=100 f_r$ $K=50 f_r$</p>		
VÁLVULAS DE GLOBO Y ANGULARES				
 <p>Si $\beta=1$ $K_1=340 f_r$</p>		 <p>Si $\beta=1$ $K_1=55 f_r$</p>		
 <p>Si $\beta=1$ $K_1=150 f_r$</p>				
VALVULAS DE RETENCION Y CIERRE		VALVULAS DE PIE CON FILTRO		
Tipo recto	Tipo rectangular	Obturador ascendente	Obturador oscilante	
 <p>Si $\beta=1$ $K_1=400 f_r$</p>	 <p>Si $\beta=1$ $K_1=200 f_r$</p>	 <p>$K=420 f_r$</p>	 <p>$K=75 f_r$</p>	
 <p>Si $\beta=1$ $K_1=300 f_r$</p>		 <p>Si $\beta=1$ $K_1=350 f_r$</p>		
		<th>VALVULAS DE GLOBO</th>		VALVULAS DE GLOBO
		 <p>Si $\beta=1$, $\Theta=0$ $K_1=3 f_r$</p>		
 <p>Si $\beta=1$ $K_1=55 f_r$</p>		 <p>Si $\beta=1$ $K_1=55 f_r$</p>		
		<th>VALVULAS DE MARIPOSA</th>		VALVULAS DE MARIPOSA
		 <p>Diámetro 50 mm a 200 mm $K=45 f_r$ Diámetro 250 mm a 350 mm $K=35 f_r$ Diámetro 400 mm a 600 mm $K=25 f_r$</p>		

Anexo C Modelo EPANET red de extracción de biogás El Molle.

A continuación se describe el modelo de EPANET para la red de extracción de biogás propuesta para el relleno sanitario de El Molle.

El modelo se crea para determinar el requerimiento mínimo de presión para vencer las pérdidas de carga en toda la red de biogás y la distribución de vacío inducido en todos los pozos.

El esquema de la red en el software y los resultados se observa en la Figura C.1. Las presiones se presentan en metros columna de biogás, que equivalen a aproximadamente a 12,4 [Pa].

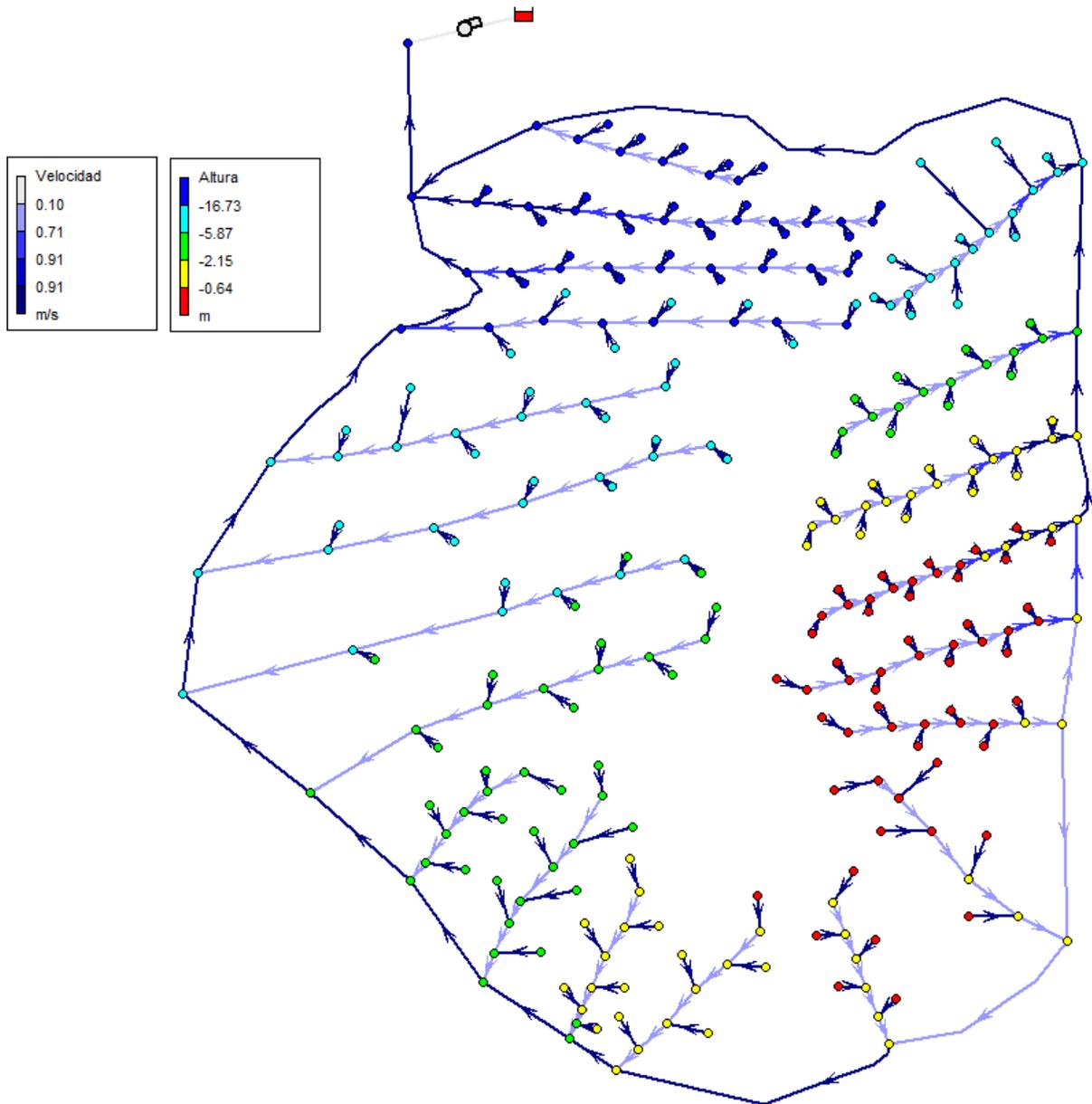


Figura C.1 Esquema Red en EPANET.

A continuación se presentan la distribución de vacío inducido en los pozos y la velocidad en los ductos en las Figura C.2 y Figura C.3 respectivamente, en los cuales se representa que porcentaje de pozos y ductos están por debajo de cada nivel de vacío y velocidad.

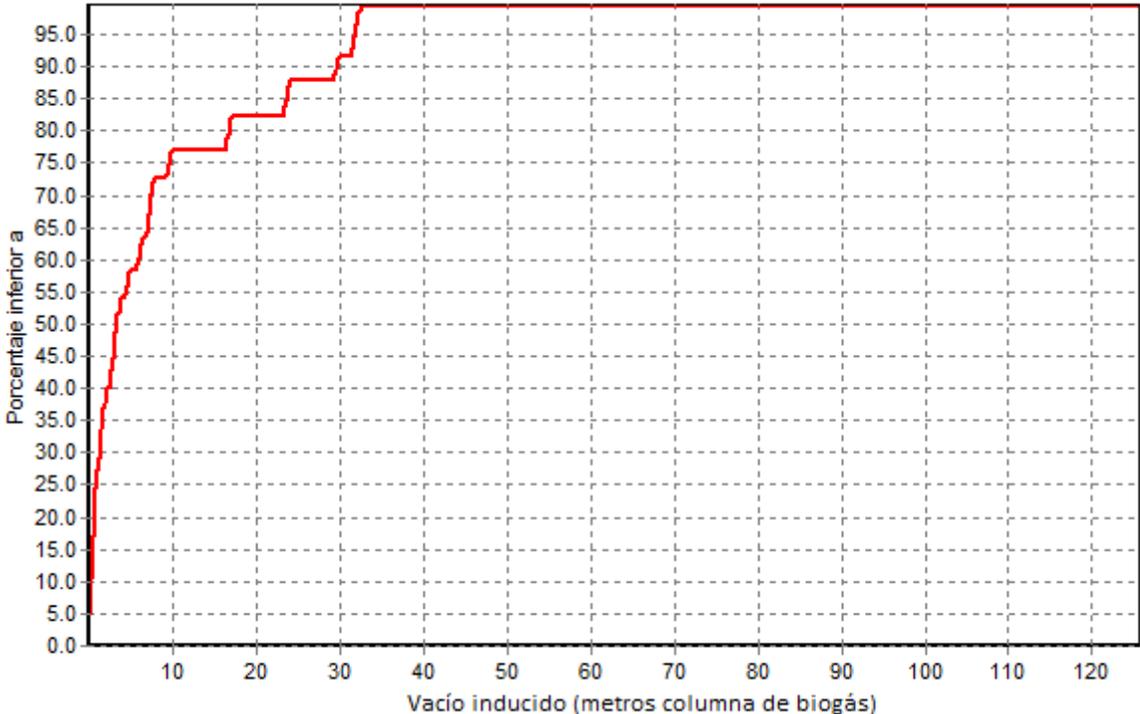


Figura C.2 Distribución de vacío inducido en pozos.

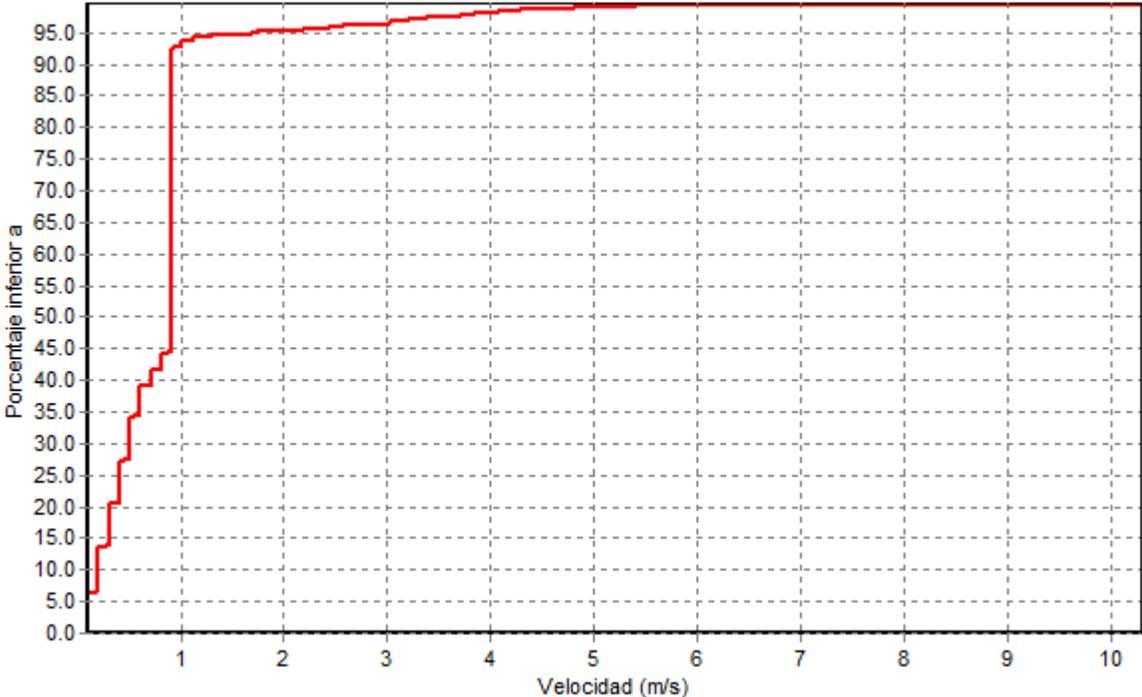


Figura C.3 Distribución de velocidad en ductos.

Anexo D Flujos de caja proyectos relleno sanitario de Osorno

Flujo de caja privado proyecto cogeneración con microturbinas

Años	0	2020	2021	2022	2023
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		139	171	202	231
Capacidad Bruta de Planta (kW)		200	200	200	400
Capacidad Neta de la Planta (kW)		156	154	152	316
Factor de planta(%)		0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme (kW)		141	139	137	284
Energía eléctrica vendida (kWh/año)		1.231.848	1.214.220	1.197.327	2.489.856
Precio de la energía (CLP/MWh)		62,2	62,9	63,5	64,1
Precio nudo de potencia (CLP/kW)		60.948	60.948	60.948	60.948
Reducción de emisión de metano (ton/año)		833	1.024	1.206	1.382
CERs (ton CO2e/año)		20.816	25.588	30.161	34.550
Precio CER (CLP/ton CO2e)		2.278	2.278	2.278	2.278
Precio atributo verde (CLP/kWh)		4,0	4,0	4,0	4,0
Vapor vendido (kWht)		613.638	613.638	613.638	3.034.026
Agua caliente vendida (kWht)		1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
Precio vapor (CLP/kWht)		20	20	20	20
Precio agua caliente (CLP/kWht)		78	78	78	78
Ingreso por CER (CLP/año)		\$ 47.419.024	\$ 58.289.429	\$ 68.706.789	\$ 78.705.778
Ingreso por venta de energía eléctrica (CLP/año)		\$ 76.655.434	\$ 76.314.078	\$ 76.004.866	\$ 159.633.587
Ingreso por venta de vapor (CLP/año)		\$ 12.272.760	\$ 12.272.760	\$ 12.272.760	\$ 60.680.520
Ingreso por venta de agua caliente (CLP/año)		\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500
Ingresos totales		\$ 277.273.718	\$ 287.802.768	\$ 297.910.915	\$ 439.946.385
Costos O&M ductos y pozos (CLP/año)		\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
Costos O&M antorcha (CLP/año)		\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 28.417.006	\$ 28.417.006	\$ 28.417.006	\$ 56.834.011
Costo O&M Red distrital		\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
Gasto financiero (CLP/año)		\$ 134.181.769	\$ 130.534.097	\$ 126.667.565	\$ 122.569.040
- Depreciación (CLP/año)		\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 82.063.942
Ganancia o pérdida de capital (CLP/año)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		0	42.667.027	71.157.333	85.672.958
Utilidades antes de impuesto		-42.667.027	-71.157.333	-85.672.958	-23.503.567
Impuesto a las utilidades(25%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad despues de impuesto		\$ -42.667.027	\$ -71.157.333	\$ -85.672.958	\$ -23.503.567
+ Depreciación		\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 82.063.942
+Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 42.667.027	\$ 71.157.333	\$ 85.672.958
Flujo operacional		\$ -1.635.056	\$ 12.541.665	\$ 26.516.345	\$ 144.233.333
Inversión (CLP/año)		\$ 3.194.804.017	\$ -	\$ 410.319.708	\$ -
Capital de trabajo (CLP/año)		\$ 24.121.168	\$ -	\$ -	\$ -
Prestamo (CLP/año)		\$ 2.236.362.812	\$ -	\$ -	\$ -
Amortización (CLP/año)		\$ 60.794.532	\$ 64.442.204	\$ 68.308.736	\$ 72.407.261
Valor residual (CLP)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional		\$ -982.562.373	\$ -60.794.532	\$ -64.442.204	\$ -478.628.444
Flujo de Caja		\$ -982.562.373	\$ -62.429.588	\$ -51.900.539	\$ 71.826.072
Recuperació de la inversión		\$ 3.218.925.185	\$ 3.281.354.773	\$ 3.333.255.312	\$ 3.713.541.339
Tasa de descuento (%)		10%			
TIR		8,00%			
VAN (CLP)		\$ -393.189.850			

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
	260	287	313	338	363	387	410	432	454
	400	400	400	400	600	600	600	600	800
	314	312	310	308	473	471	469	468	632
	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	282	281	279	277	425	424	422	421	569
	2.474.268	2.459.255	2.444.773	2.430.777	3.725.971	3.712.830	3.700.060	3.687.628	4.984.248
	64,8	65,4	66,1	66,7	67,4	68,1	68,7	69,4	70,1
	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948
	1.551	1.713	1.870	2.022	2.168	2.311	2.449	2.584	2.715
	38.770	42.834	46.755	50.543	54.211	57.769	61.226	64.591	67.873
	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	3.034.026	3.034.026	3.034.026	3.034.026	5.454.414	5.454.414	5.454.414	5.454.414	7.874.802
	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	78	78	78	78	78	78	78	78	78
\$	88.318.882	\$ 97.576.546	\$ 106.507.307	\$ 115.137.922	\$ 123.493.490	\$ 131.597.559	\$ 139.472.230	\$ 147.138.257	\$ 154.615.135
\$	160.220.469	\$ 160.840.823	\$ 161.492.579	\$ 162.173.759	\$ 251.070.883	\$ 252.687.190	\$ 254.336.286	\$ 256.016.586	\$ 349.495.783
\$	60.680.520	\$ 60.680.520	\$ 60.680.520	\$ 60.680.520	\$ 109.088.280	\$ 109.088.280	\$ 109.088.280	\$ 109.088.280	\$ 157.496.040
\$	140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500
\$	450.146.371	\$ 460.024.389	\$ 469.606.906	\$ 478.918.701	\$ 624.579.153	\$ 634.299.529	\$ 643.823.296	\$ 653.169.623	\$ 802.533.459
\$	52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
\$	3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$	56.834.011	\$ 56.834.011	\$ 56.834.011	\$ 56.834.011	\$ 85.251.017	\$ 85.251.017	\$ 85.251.017	\$ 85.251.017	\$ 113.668.022
\$	60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
\$	118.224.605	\$ 113.619.503	\$ 108.738.095	\$ 103.563.803	\$ 98.079.053	\$ 92.265.218	\$ 86.102.553	\$ 79.570.128	\$ 72.645.758
\$	82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 123.095.912	\$ 123.095.912	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 123.095.912
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	23.503.567	0	0	0	0	0	0	0	0
	53.210.247	91.196.933	105.660.858	120.146.946	201.843.172	217.377.382	274.095.785	289.974.537	376.813.766
\$	13.302.562	\$ 22.799.233	\$ 26.415.214	\$ 30.036.736	\$ 50.460.793	\$ 54.344.345	\$ 68.523.946	\$ 72.493.634	\$ 94.203.442
\$	39.907.685	\$ 68.397.700	\$ 79.245.643	\$ 90.110.209	\$ 151.382.379	\$ 163.033.036	\$ 205.571.839	\$ 217.480.902	\$ 282.610.325
\$	82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 123.095.912	\$ 123.095.912	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 123.095.912
\$	23.503.567	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	145.475.193	\$ 150.461.641	\$ 161.309.585	\$ 172.174.151	\$ 274.478.291	\$ 286.128.949	\$ 287.635.780	\$ 299.544.844	\$ 405.706.237
\$	-	\$ -	\$ -	\$ 410.319.708	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 410.319.708	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	76.751.696	\$ 81.356.798	\$ 86.238.206	\$ 91.412.498	\$ 96.897.248	\$ 102.711.083	\$ 108.873.748	\$ 115.406.173	\$ 122.330.543
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-76.751.696	\$ -81.356.798	\$ -86.238.206	\$ -501.732.206	\$ -96.897.248	\$ -102.711.083	\$ -108.873.748	\$ -525.725.881	\$ -122.330.543
\$	68.723.497	\$ 69.104.843	\$ 75.071.379	\$ -329.558.055	\$ 177.581.043	\$ 183.417.866	\$ 178.762.032	\$ -226.181.037	\$ 283.375.694
\$	3.644.817.842	\$ 3.575.712.999	\$ 3.500.641.620	\$ 3.830.199.675	\$ 3.652.618.632	\$ 3.469.200.767	\$ 3.290.438.734	\$ 3.516.619.771	\$ 3.233.244.077

2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
476	497	517	538	654	611	571	533	498
800	800	800	800	1000	1000	1000	800	800
631	629	628	626	784	787	790	627	629
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
568	566	565	564	706	709	711	564	566
4.972.400	4.960.801	4.949.426	4.938.248	6.182.943	6.206.660	6.228.818	4.940.776	4.960.117
70,8	71,5	72,2	73,0	73,7	74,4	75,2	75,9	76,7
60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948
2.843	2.969	3.092	3.213	3.907	3.650	3.410	3.186	2.976
71.080	74.220	77.300	80.326	97.664	91.243	85.245	79.641	74.406
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
7.874.802	7.874.802	7.874.802	7.874.802	10.295.190	10.295.190	10.295.190	7.874.802	7.874.802
1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
20	20	20	20	20	20	20	20	20
78	78	78	78	78	78	78	78	78
\$ 161.921.186	\$ 169.073.636	\$ 176.088.693	\$ 182.981.612	\$ 222.478.164	\$ 207.852.555	\$ 194.188.426	\$ 181.422.571	\$ 169.495.937
\$ 352.151.672	\$ 354.843.545	\$ 357.570.137	\$ 360.330.229	\$ 455.663.708	\$ 461.985.716	\$ 468.271.383	\$ 375.153.046	\$ 380.387.791
\$ 157.496.040	\$ 157.496.040	\$ 157.496.040	\$ 157.496.040	\$ 205.903.800	\$ 205.903.800	\$ 205.903.800	\$ 157.496.040	\$ 157.496.040
\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500
\$ 812.495.398	\$ 822.339.722	\$ 832.081.371	\$ 841.734.381	\$ 1.024.972.172	\$ 1.016.668.571	\$ 1.009.290.109	\$ 854.998.157	\$ 848.306.269
\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 113.668.022	\$ 113.668.022	\$ 113.668.022	\$ 113.668.022	\$ 142.085.028	\$ 142.085.028	\$ 142.085.028	\$ 113.668.022	\$ 113.668.022
\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
\$ 65.305.925	\$ 57.525.702	\$ 49.278.667	\$ 40.536.808	\$ 31.270.439	\$ 21.448.087	\$ 11.036.394	\$ -	\$ -
\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 164.127.883	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 136.773.236	\$ -
0	0	0	0	0	0	0	0	0
435.147.509	452.772.055	470.760.740	489.155.609	571.178.822	654.761.514	657.794.745	679.729.430	536.264.305
\$ 108.786.877	\$ 113.193.014	\$ 117.690.185	\$ 122.288.902	\$ 142.794.706	\$ 163.690.379	\$ 164.448.686	\$ 169.932.357	\$ 134.066.076
\$ 326.360.632	\$ 339.579.042	\$ 353.070.555	\$ 366.866.707	\$ 428.384.117	\$ 491.071.136	\$ 493.346.059	\$ 509.797.072	\$ 402.198.229
\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 164.127.883	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942	\$ 82.063.942
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 408.424.573	\$ 421.642.983	\$ 435.134.497	\$ 448.930.648	\$ 592.512.000	\$ 573.135.077	\$ 575.410.001	\$ 591.861.014	\$ 484.262.170
\$ -	\$ -	\$ -	\$ 410.319.708	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 129.670.376	\$ 137.450.599	\$ 145.697.634	\$ 154.439.493	\$ 163.705.862	\$ 173.528.214	\$ 183.939.907	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 136.773.236	\$ -
\$ -129.670.376	\$ -137.450.599	\$ -145.697.634	\$ -154.439.493	\$ -163.705.862	\$ -173.528.214	\$ -183.939.907	\$ -	\$ -
\$ 278.754.197	\$ 284.192.385	\$ 289.436.862	\$ -115.828.552	\$ 428.806.138	\$ 399.606.864	\$ 391.470.094	\$ 591.861.014	\$ 484.262.170
\$ 2.954.489.880	\$ 2.670.297.495	\$ 2.380.860.633	\$ 2.496.689.185	\$ 2.067.883.048	\$ 1.668.276.184	\$ 1.276.806.090	\$ 684.945.076	\$ 200.682.906

2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
465	435	406	379	354	331	309	289	270
800	600	600	600	600	600	400	400	400
631	468	470	471	473	309	310	312	313
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
568	421	423	424	426	278	279	281	282
4.978.186	3.686.323	3.702.094	3.716.829	3.730.595	2.434.712	2.446.728	2.457.954	2.468.441
77,5	78,2	79,0	79,8	80,6	81,4	82,2	83,0	83,9
60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948
2.781	2.598	2.427	2.267	2.118	1.979	1.849	1.727	1.614
69.514	64.944	60.675	56.686	52.960	49.478	46.225	43.187	40.348
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
7.874.802	5.454.414	5.454.414	5.454.414	5.454.414	3.034.026	3.034.026	3.034.026	3.034.026
1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
20	20	20	20	20	20	20	20	20
78	78	78	78	78	78	78	78	78
\$ 158.353.355	\$ 147.943.280	\$ 138.217.559	\$ 129.131.202	\$ 120.642.178	\$ 112.711.218	\$ 105.301.636	\$ 98.379.156	\$ 91.911.757
\$ 385.591.235	\$ 288.383.771	\$ 292.513.763	\$ 296.614.777	\$ 300.690.484	\$ 198.203.160	\$ 201.173.129	\$ 204.117.081	\$ 207.037.899
\$ 157.496.040	\$ 109.088.280	\$ 109.088.280	\$ 109.088.280	\$ 109.088.280	\$ 60.680.520	\$ 60.680.520	\$ 60.680.520	\$ 60.680.520
\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500	\$ 140.926.500
\$ 842.367.130	\$ 686.341.831	\$ 680.746.102	\$ 675.760.759	\$ 671.347.442	\$ 512.521.398	\$ 508.081.785	\$ 504.103.258	\$ 500.556.676
\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 113.668.022	\$ 85.251.017	\$ 85.251.017	\$ 85.251.017	\$ 85.251.017	\$ 56.834.011	\$ 56.834.011	\$ 56.834.011	\$ 56.834.011
\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ 136.773.236	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 136.773.236	\$ -	\$ -	\$ 273.546.472
0	0	0	0	0	0	0	0	0
571.357.137	580.522.079	438.153.115	433.167.771	428.754.455	476.150.623	334.937.774	330.959.247	600.959.137
\$ 142.839.284	\$ 145.130.520	\$ 109.538.279	\$ 108.291.943	\$ 107.188.614	\$ 119.037.656	\$ 83.734.444	\$ 82.739.812	\$ 150.239.784
\$ 428.517.853	\$ 435.391.559	\$ 328.614.836	\$ 324.875.828	\$ 321.565.841	\$ 357.112.967	\$ 251.203.331	\$ 248.219.435	\$ 450.719.353
\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ 41.031.971	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 469.549.823	\$ 476.423.530	\$ 369.646.807	\$ 365.907.799	\$ 362.597.812	\$ 357.112.967	\$ 251.203.331	\$ 248.219.435	\$ 450.719.353
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -24.121.168
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ 136.773.236	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 136.773.236	\$ -	\$ -	\$ 273.546.472
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 24.121.168
\$ 469.549.823	\$ 476.423.530	\$ 369.646.807	\$ 365.907.799	\$ 362.597.812	\$ 357.112.967	\$ 251.203.331	\$ 248.219.435	\$ 474.840.520
\$ -268.866.917	\$ -745.290.447	\$ -1.114.937.254	\$ -1.480.845.053	\$ -1.843.442.865	\$ -2.200.555.833	\$ -2.451.759.163	\$ -2.699.978.598	\$ -3.174.819.118

Flujo de caja social proyecto cogeneración con microturbinas

Años	0	2020	2021	2022	2023
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		139	171	202	231
Capacidad Bruta de Planta (kW)		200	200	200	400
Capacidad Neta de la Planta (kW)		156	154	152	316
Factor de planta(%)		0,9	0,9	0,9	0,9
Potencia firme (kW)		141	139	137	284
Energía eléctrica vendida (kWhe/año)		1.231.848	1.214.220	1.197.327	2.489.856
Vapor vendido (kWht/año)		613.638	613.638	613.638	3.034.026
Agua caliente vendida (kWht/año)		1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
Reducción de emisión de metano (ton/año)		833	1.024	1.206	1.382
Reducción GEI por combustión de metano (ton CO2e/año)		20.816	25.588	30.161	34.550
Reducción GEI por reemplazo otros combustibles (ton CO2e/año)		650	650	650	1.545
Reducción GEI por reemplazo matriz eléctrica (ton CO2e/año)		437	431	425	884
Reducción de MP(ton)		1,02	0,51	0,51	2,53
Precio social del carbono (CLP/ton CO2e)		2.213	2.213	2.213	2.213
Beneficio unitario salud por reducción de MP2,5 (CLP/ton MP2,5)		18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
Beneficio reducción de GEI por destrucción de metano (CLP/año)		\$ 46.065.979	\$ 56.626.210	\$ 66.746.323	\$ 76.460.003
Beneficio reducción de GEI reemplazo combustibles fósiles (CLP/año)		\$ 1.438.064	\$ 1.438.064	\$ 1.438.064	\$ 3.419.902
Beneficio reducción de GEI reemplazo electricidad de matriz (CLP/año)		\$ 967.758	\$ 953.910	\$ 940.638	\$ 1.956.069
Beneficio disminución MP2,5		\$ 18.774.799	\$ 9.387.400	\$ 9.387.400	\$ 46.414.359
Beneficios totales		\$ 67.246.601	\$ 68.405.583	\$ 78.512.424	\$ 128.250.332
Costo O&M Red distrital		\$ 56.160.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 22.351.527	\$ 23.879.837	\$ 23.879.837	\$ 47.759.673
Beneficios netos		\$ -11.264.927	\$ -13.194.253	\$ -3.087.412	\$ 22.770.659
Inversión (CLP/año)	\$ 2.512.887.866	\$ -	\$ -	\$ 287.338.731	\$ -
Valor Residual activos (CLP/año)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional	\$ -2.512.887.866	\$ -	\$ -	\$ -287.338.731	\$ -
Flujo de Caja	\$ -2.512.887.866	\$ -11.264.927	\$ -13.194.253	\$ -290.426.143	\$ 22.770.659
Tasa de descuento (%)		6%			
TIR		-0,04%			
VAN (CLP)		\$ -1.961.197.277			

2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
260	287	313	338	363	387	410	432	454
400	400	400	400	600	600	600	600	800
314	312	310	308	473	471	469	468	632
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
282	281	279	277	425	424	422	421	569
2.474.268	2.459.255	2.444.773	2.430.777	3.725.971	3.712.830	3.700.060	3.687.628	4.984.248
3.034.026	3.034.026	3.034.026	3.034.026	5.454.414	5.454.414	5.454.414	5.454.414	7.874.802
1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
1.551	1.713	1.870	2.022	2.168	2.311	2.449	2.584	2.715
38.770	42.834	46.755	50.543	54.211	57.769	61.226	64.591	67.873
1.545	1.545	1.545	1.545	2.441	2.441	2.441	2.441	3.336
878	873	868	863	1.323	1.318	1.314	1.309	1.769
2,53	2,53	2,53	2,53	4,54	4,54	4,54	4,54	6,55
2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213
18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
\$ 85.798.809	\$ 94.792.316	\$ 103.468.248	\$ 111.852.600	\$ 119.969.752	\$ 127.842.580	\$ 135.492.557	\$ 142.939.843	\$ 150.203.378
\$ 3.419.902	\$ 3.419.902	\$ 3.419.902	\$ 3.419.902	\$ 5.401.740	\$ 5.401.740	\$ 5.401.740	\$ 5.401.740	\$ 7.383.578
\$ 1.943.822	\$ 1.932.028	\$ 1.920.650	\$ 1.909.655	\$ 2.927.179	\$ 2.916.855	\$ 2.906.822	\$ 2.897.056	\$ 3.915.700
\$ 46.414.359	\$ 46.414.359	\$ 46.414.359	\$ 46.414.359	\$ 83.441.318	\$ 83.441.318	\$ 83.441.318	\$ 83.441.318	\$ 120.468.277
\$ 137.576.891	\$ 146.558.604	\$ 155.223.159	\$ 163.596.515	\$ 211.739.988	\$ 219.602.493	\$ 227.242.437	\$ 234.679.957	\$ 281.970.932
\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000
\$ 47.759.673	\$ 47.759.673	\$ 47.759.673	\$ 47.759.673	\$ 71.639.510	\$ 71.639.510	\$ 71.639.510	\$ 71.639.510	\$ 95.519.346
\$ 32.097.218	\$ 41.078.931	\$ 49.743.486	\$ 58.116.842	\$ 82.380.478	\$ 90.242.983	\$ 97.882.927	\$ 105.320.447	\$ 128.731.586
\$ -	\$ -	\$ -	\$ 287.338.731	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 287.338.731	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -287.338.731	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -287.338.731	\$ -
\$ 32.097.218	\$ 41.078.931	\$ 49.743.486	\$ -229.221.889	\$ 82.380.478	\$ 90.242.983	\$ 97.882.927	\$ -182.018.284	\$ 128.731.586

2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
476	497	517	538	654	611	571	533	498
800	800	800	800	1000	1000	1000	800	800
631	629	628	626	784	787	790	627	629
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
568	566	565	564	706	709	711	564	566
4.972.400	4.960.801	4.949.426	4.938.248	6.182.943	6.206.660	6.228.818	4.940.776	4.960.117
7.874.802	7.874.802	7.874.802	7.874.802	10.295.190	10.295.190	10.295.190	7.874.802	7.874.802
1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
2.843	2.969	3.092	3.213	3.907	3.650	3.410	3.186	2.976
71.080	74.220	77.300	80.326	97.664	91.243	85.245	79.641	74.406
3.336	3.336	3.336	3.336	4.232	4.232	4.232	3.336	3.336
1.765	1.761	1.757	1.753	2.195	2.203	2.211	1.754	1.761
6,55	6,55	6,55	6,55	8,57	8,57	8,57	6,55	6,55
2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213
18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
\$ 157.300.959	\$ 164.249.323	\$ 171.064.213	\$ 177.760.451	\$ 216.130.016	\$ 201.921.731	\$ 188.647.492	\$ 176.245.895	\$ 164.659.574
\$ 7.383.578	\$ 7.383.578	\$ 7.383.578	\$ 7.383.578	\$ 9.365.416	\$ 9.365.416	\$ 9.365.416	\$ 7.383.578	\$ 7.383.578
\$ 3.906.392	\$ 3.897.280	\$ 3.888.343	\$ 3.879.562	\$ 4.857.413	\$ 4.876.045	\$ 4.893.453	\$ 3.881.548	\$ 3.896.742
\$ 120.468.277	\$ 120.468.277	\$ 120.468.277	\$ 120.468.277	\$ 157.495.236	\$ 157.495.236	\$ 157.495.236	\$ 120.468.277	\$ 120.468.277
\$ 289.059.206	\$ 295.998.457	\$ 302.804.411	\$ 309.491.867	\$ 387.848.081	\$ 373.658.428	\$ 360.401.597	\$ 307.979.298	\$ 296.408.170
\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000
\$ 95.519.346	\$ 95.519.346	\$ 95.519.346	\$ 95.519.346	\$ 119.399.183	\$ 119.399.183	\$ 119.399.183	\$ 95.519.346	\$ 95.519.346
\$ 135.819.859	\$ 142.759.111	\$ 149.565.064	\$ 156.252.521	\$ 210.728.898	\$ 196.539.245	\$ 183.282.414	\$ 154.739.951	\$ 143.168.824
\$ -	\$ -	\$ -	\$ 287.338.731	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 172.403.239	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -287.338.731	\$ -				
\$ 135.819.859	\$ 142.759.111	\$ 149.565.064	\$ -131.086.210	\$ 210.728.898	\$ 196.539.245	\$ 183.282.414	\$ 327.143.190	\$ 143.168.824

2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
465	435	406	379	354	331	309	289	270
800	600	600	600	600	400	400	400	400
631	468	470	471	473	309	310	312	313
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
568	421	423	424	426	278	279	281	282
4.978.186	3.686.323	3.702.094	3.716.829	3.730.595	2.434.712	2.446.728	2.457.954	2.468.441
7.874.802	5.454.414	5.454.414	5.454.414	5.454.414	3.034.026	3.034.026	3.034.026	3.034.026
1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750	1.806.750
2.781	2.598	2.427	2.267	2.118	1.979	1.849	1.727	1.614
69.514	64.944	60.675	56.686	52.960	49.478	46.225	43.187	40.348
3.336	2.441	2.441	2.441	2.441	1.545	1.545	1.545	1.545
1.767	1.309	1.314	1.319	1.324	864	869	873	876
6,55	4,54	4,54	4,54	4,54	2,53	2,53	2,53	2,53
2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213
18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
\$ 153.834.931	\$ 143.721.896	\$ 134.273.686	\$ 125.446.598	\$ 117.199.798	\$ 109.495.139	\$ 102.296.980	\$ 95.572.025	\$ 89.289.165
\$ 7.383.578	\$ 5.401.740	\$ 5.401.740	\$ 5.401.740	\$ 5.401.740	\$ 3.419.902	\$ 3.419.902	\$ 3.419.902	\$ 3.419.902
\$ 3.910.937	\$ 2.896.031	\$ 2.908.421	\$ 2.919.997	\$ 2.930.812	\$ 1.912.746	\$ 1.922.186	\$ 1.931.005	\$ 1.939.244
\$ 120.468.277	\$ 83.441.318	\$ 83.441.318	\$ 83.441.318	\$ 83.441.318	\$ 46.414.359	\$ 46.414.359	\$ 46.414.359	\$ 46.414.359
\$ 285.597.723	\$ 235.460.984	\$ 226.025.165	\$ 217.209.652	\$ 208.973.667	\$ 161.242.146	\$ 154.053.427	\$ 147.337.291	\$ 141.062.670
\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000	\$ 57.720.000
\$ 95.519.346	\$ 71.639.510	\$ 71.639.510	\$ 71.639.510	\$ 71.639.510	\$ 47.759.673	\$ 47.759.673	\$ 47.759.673	\$ 47.759.673
\$ 132.358.377	\$ 106.101.474	\$ 96.665.655	\$ 87.850.142	\$ 79.614.157	\$ 55.762.473	\$ 48.573.754	\$ 41.857.618	\$ 35.582.997
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ 172.403.239	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 172.403.239	\$ -	\$ -	\$ 284.957.168
\$ -	\$ 172.403.239	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 172.403.239	\$ -	\$ -	\$ 284.957.168
\$ 132.358.377	\$ 278.504.713	\$ 96.665.655	\$ 87.850.142	\$ 79.614.157	\$ 228.165.711	\$ 48.573.754	\$ 41.857.618	\$ 320.540.165

Flujo de caja privado proyecto generación de agua caliente y vapor con caldera

Años	0	2020	2021	2022	2023
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		139	171	202	231
Capacidad Bruta de Planta (kW)		2.800	2.800	2.800	2.800
Capacidad Neta de Planta (kW)		635	780	919	1.053
Factor de planta(%)		0,9	0,9	0,9	0,9
Reducción de emisión de metano (ton/año)		833	1.024	1.206	1.382
CERs (ton CO2e/año)		20.816	25.588	30.161	34.550
Precio CER (CLP/ton CO2e)		2.278	2.278	2.278	2.278
Vapor vendido aserradero (kWht)		248.265	1.395.043	2.494.027	3.548.875
Vapor vendido red distrital (kWht)		3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
Agua caliente vendida (kWht)		1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
Precio vapor aserradero (CLP/kWht)		20	20	20	20
Precio vapor red distrital (CLP/kWht)		25	25	25	25
Precio agua caliente (CLP/kWht)		78	78	78	78
Ingreso por CER (CLP/año)		\$ 47.419.024	\$ 58.289.429	\$ 68.706.789	\$ 78.705.778
Ingreso por venta de vapor (CLP/año)		\$ 92.202.805	\$ 34.876.082	\$ 62.350.677	\$ 88.721.868
Ingreso por venta de agua caliente (CLP/año)		\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550
Ingresos totales		\$ 238.270.380	\$ 191.814.061	\$ 229.706.016	\$ 266.076.195
Consumo eléctrico equipos auxiliares (kWh/año)		153.792	189.048	222.834	255.263
Precio electricidad (CLP/kWh)		100	100	100	100
Costos electricidad (CLP/año)		\$ 15.379.211	\$ 18.904.764	\$ 22.283.382	\$ 25.526.311
Costos O&M ductos y pozos (CLP/año)		\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
Costos O&M antorcha (CLP/año)		\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 32.522.468	\$ 33.647.630	\$ 34.577.834	\$ 35.369.895
Costo O&M Red distrital (CLP/año)		\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000
Gasto financiero (CLP/año)		\$ 163.848.924	\$ 159.394.764	\$ 154.673.354	\$ 149.668.659
- Depreciación (CLP/año)		\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656
Ganancia o pérdida de capital (CLP/año)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 157.586.880	\$ 361.826.632	\$ 527.761.841
Utilidades antes de impuesto		\$ -157.586.880	\$ -361.826.632	\$ -527.761.841	\$ -656.357.167
Impuesto a las utilidades(25%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad despues de impuesto		\$ -157.586.880	\$ -361.826.632	\$ -527.761.841	\$ -656.357.167
+ Depreciación		\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656
+Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 157.586.880	\$ 361.826.632	\$ 527.761.841
Flujo operacional		\$ -71.790.224	\$ -118.443.096	\$ -80.138.553	\$ -42.798.670
Inversión (CLP/año)	\$ 3.901.164.862	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Capital de trabajo (CLP/año)	\$ 17.368.630	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Prestamo (CLP/año)	\$ 2.730.815.403	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Amortización (CLP/año)		\$ 74.236.007	\$ 78.690.167	\$ 83.411.577	\$ 88.416.272
Valor Residual (CLP)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional		\$ -1.187.718.088	\$ -74.236.007	\$ -78.690.167	\$ -83.411.577
Flujo de Caja		\$ -1.187.718.088	\$ -146.026.231	\$ -197.133.264	\$ -163.550.130
Recuperación de la inversión		\$ 3.918.533.492	\$ 4.064.559.723	\$ 4.261.692.986	\$ 4.425.243.117
Tasa de descuento (%)		10%			
TIR		2,65%			
VAN (CLP)		\$-1.336.494.308			

2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
260	287	313	338	363	387	410	432	454
2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
1.182	1.306	1.425	1.541	1.652	1.761	1.866	1.969	2.069
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1.551	1.713	1.870	2.022	2.168	2.311	2.449	2.584	2.715
38.770	42.834	46.755	50.543	54.211	57.769	61.226	64.591	67.873
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
4.563.013	5.539.654	6.481.809	7.392.299	8.273.774	9.128.716	9.959.458	10.768.188	11.556.965
3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
20	20	20	20	20	20	20	20	20
25	25	25	25	25	25	25	25	25
78	78	78	78	78	78	78	78	78
\$ 88.318.882	\$ 97.576.546	\$ 106.507.307	\$ 115.137.922	\$ 123.493.490	\$ 131.597.559	\$ 139.472.230	\$ 147.138.257	\$ 154.615.135
\$ 114.075.332	\$ 138.491.362	\$ 162.045.223	\$ 184.807.485	\$ 206.844.341	\$ 228.217.895	\$ 248.986.441	\$ 269.204.711	\$ 288.924.122
\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550
\$ 301.042.764	\$ 334.716.458	\$ 367.201.079	\$ 398.593.957	\$ 428.986.381	\$ 458.464.004	\$ 487.107.221	\$ 514.991.518	\$ 542.187.807
286.441	316.466	345.431	373.422	400.521	426.805	452.344	477.207	501.457
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 28.644.089	\$ 31.646.588	\$ 34.543.064	\$ 37.342.195	\$ 40.052.121	\$ 42.680.479	\$ 45.234.438	\$ 47.720.728	\$ 50.145.672
\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 36.058.761	\$ 36.667.589	\$ 37.212.583	\$ 37.705.555	\$ 38.155.409	\$ 38.569.030	\$ 38.951.859	\$ 39.308.279	\$ 39.641.868
\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000
\$ 144.363.683	\$ 138.740.408	\$ 132.779.736	\$ 126.461.425	\$ 119.764.014	\$ 112.664.759	\$ 105.139.549	\$ 97.162.826	\$ 88.707.500
\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 656.357.167	\$ 748.487.592	\$ 804.932.375	\$ 826.373.334	\$ 813.395.207	\$ 766.487.026	\$ 686.043.946	\$ 486.572.571	\$ 254.082.886
\$ -748.487.592	\$ -804.932.375	\$ -826.373.334	\$ -813.395.207	\$ -766.487.026	\$ -686.043.946	\$ -486.572.571	\$ -254.082.886	\$ 11.299.882
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2.824.970
\$ -748.487.592	\$ -804.932.375	\$ -826.373.334	\$ -813.395.207	\$ -766.487.026	\$ -686.043.946	\$ -486.572.571	\$ -254.082.886	\$ 8.474.911
\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ 85.796.656	\$ -	\$ -
\$ 656.357.167	\$ 748.487.592	\$ 804.932.375	\$ 826.373.334	\$ 813.395.207	\$ 766.487.026	\$ 686.043.946	\$ 486.572.571	\$ 254.082.886
\$ -6.333.769	\$ 29.351.873	\$ 64.355.697	\$ 98.774.782	\$ 132.704.837	\$ 166.239.736	\$ 199.471.375	\$ 232.489.686	\$ 262.557.797
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 93.721.248	\$ 99.344.523	\$ 105.305.195	\$ 111.623.506	\$ 118.320.917	\$ 125.420.172	\$ 132.945.382	\$ 140.922.105	\$ 149.377.431
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -93.721.248	\$ -99.344.523	\$ -105.305.195	\$ -111.623.506	\$ -118.320.917	\$ -125.420.172	\$ -132.945.382	\$ -140.922.105	\$ -149.377.431
\$ -100.055.017	\$ -69.992.650	\$ -40.949.498	\$ -12.848.724	\$ 14.383.920	\$ 40.819.565	\$ 66.525.993	\$ 91.567.581	\$ 113.180.366
\$ 4.656.513.076	\$ 4.726.505.726	\$ 4.767.455.224	\$ 4.780.303.948	\$ 4.765.920.028	\$ 4.725.100.463	\$ 4.658.574.470	\$ 4.567.006.890	\$ 4.453.826.524

2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
476	497	517	538	654	611	571	533	498
2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
2.167	2.262	2.356	2.448	2.800	2.781	2.598	2.428	2.268
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
2.843	2.969	3.092	3.213	3.907	3.650	3.410	3.186	2.976
71.080	74.220	77.300	80.326	97.664	91.243	85.245	79.641	74.406
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
12.327.720	13.082.271	13.822.327	14.549.499	17.320.975	17.173.269	15.731.766	14.385.027	13.126.821
3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
20	20	20	20	20	20	20	20	20
25	25	25	25	25	25	25	25	25
78	78	78	78	78	78	78	78	78
\$ 161.921.186	\$ 169.073.636	\$ 176.088.693	\$ 182.981.612	\$ 222.478.164	\$ 207.852.555	\$ 194.188.426	\$ 181.422.571	\$ 169.495.937
\$ 308.192.995	\$ 327.056.766	\$ 345.558.176	\$ 363.737.463	\$ 433.024.375	\$ 429.331.731	\$ 393.294.154	\$ 359.625.670	\$ 328.170.536
\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550
\$ 568.762.731	\$ 594.778.952	\$ 620.295.420	\$ 645.367.625	\$ 754.151.089	\$ 735.832.836	\$ 686.131.130	\$ 639.696.791	\$ 596.315.023
525.152	548.349	571.101	593.457	721.554	674.119	629.803	588.400	549.719
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 52.515.212	\$ 54.834.936	\$ 57.110.100	\$ 59.345.651	\$ 72.155.401	\$ 67.411.939	\$ 62.980.310	\$ 58.840.014	\$ 54.971.899
\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 39.955.593	\$ 40.251.937	\$ 40.533.001	\$ 40.800.578	\$ 42.194.838	\$ 41.703.543	\$ 41.218.884	\$ 40.740.772	\$ 40.269.118
\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000
\$ 79.744.854	\$ 70.244.449	\$ 60.174.021	\$ 49.499.366	\$ 38.184.232	\$ 26.190.190	\$ 13.476.506	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 298.237.072	\$ 331.137.629	\$ 364.168.298	\$ 397.412.030	\$ 503.306.619	\$ 502.217.165	\$ 470.145.431	\$ 441.806.005	\$ 402.764.006
\$ 74.559.268	\$ 82.784.407	\$ 91.042.074	\$ 99.353.008	\$ 125.826.655	\$ 125.554.291	\$ 117.536.358	\$ 110.451.501	\$ 100.691.001
\$ 223.677.804	\$ 248.353.222	\$ 273.126.223	\$ 298.059.023	\$ 377.479.964	\$ 376.662.873	\$ 352.609.073	\$ 331.354.504	\$ 302.073.004
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 223.677.804	\$ 248.353.222	\$ 273.126.223	\$ 298.059.023	\$ 377.479.964	\$ 376.662.873	\$ 352.609.073	\$ 331.354.504	\$ 302.073.004
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 158.340.077	\$ 167.840.482	\$ 177.910.911	\$ 188.585.565	\$ 199.900.699	\$ 211.894.741	\$ 224.608.426	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -158.340.077	\$ -167.840.482	\$ -177.910.911	\$ -188.585.565	\$ -199.900.699	\$ -211.894.741	\$ -224.608.426	\$ -	\$ -
\$ 65.337.727	\$ 80.512.740	\$ 95.215.313	\$ 109.473.457	\$ 177.579.265	\$ 164.768.132	\$ 128.000.648	\$ 331.354.504	\$ 302.073.004
\$ 4.388.488.797	\$ 4.307.976.057	\$ 4.212.760.744	\$ 4.103.287.287	\$ 3.925.708.022	\$ 3.760.939.889	\$ 3.632.939.242	\$ 3.301.584.738	\$ 2.999.511.734

2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
465	435	406	379	354	331	309	289	270
2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
2.119	1.980	1.849	1.728	1.614	1.508	1.409	1.316	1.230
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
2.781	2.598	2.427	2.267	2.118	1.979	1.849	1.727	1.614
69.514	64.944	60.675	56.686	52.960	49.478	46.225	43.187	40.348
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
11.951.330	10.853.115	9.827.096	8.868.526	7.972.973	7.136.293	6.354.616	5.624.326	4.942.045
3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
20	20	20	20	20	20	20	20	20
25	25	25	25	25	25	25	25	25
78	78	78	78	78	78	78	78	78
\$ 158.353.355	\$ 147.943.280	\$ 138.217.559	\$ 129.131.202	\$ 120.642.178	\$ 112.711.218	\$ 105.301.636	\$ 98.379.156	\$ 91.911.757
\$ 298.783.248	\$ 271.327.866	\$ 245.677.388	\$ 221.713.161	\$ 199.324.330	\$ 178.407.330	\$ 158.865.405	\$ 140.608.156	\$ 123.551.130
\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550	\$ 98.648.550
\$ 555.785.153	\$ 517.919.696	\$ 482.543.497	\$ 449.492.913	\$ 418.615.058	\$ 389.767.099	\$ 362.815.591	\$ 337.635.862	\$ 314.111.437
513.581	479.818	448.275	418.806	391.274	365.552	341.520	319.069	298.094
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 51.358.073	\$ 47.981.817	\$ 44.827.515	\$ 41.880.576	\$ 39.127.367	\$ 36.555.152	\$ 34.152.034	\$ 31.906.895	\$ 29.809.351
\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000	\$ 52.640.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 39.803.836	\$ 39.344.838	\$ 38.892.041	\$ 38.445.360	\$ 38.004.713	\$ 37.570.018	\$ 37.141.194	\$ 36.718.164	\$ 36.300.847
\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 366.313.244	\$ 332.283.041	\$ 300.513.941	\$ 270.856.977	\$ 243.172.979	\$ 217.331.929	\$ 193.212.363	\$ 170.700.803	\$ 149.691.239
\$ 91.578.311	\$ 83.070.760	\$ 75.128.485	\$ 67.714.244	\$ 60.793.245	\$ 54.332.982	\$ 48.303.091	\$ 42.675.201	\$ 37.422.810
\$ 274.734.933	\$ 249.212.280	\$ 225.385.456	\$ 203.142.733	\$ 182.379.734	\$ 162.998.947	\$ 144.909.272	\$ 128.025.602	\$ 112.268.429
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 274.734.933	\$ 249.212.280	\$ 225.385.456	\$ 203.142.733	\$ 182.379.734	\$ 162.998.947	\$ 144.909.272	\$ 128.025.602	\$ 112.268.429
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ 17.368.630							
\$ 274.734.933	\$ 249.212.280	\$ 225.385.456	\$ 203.142.733	\$ 182.379.734	\$ 162.998.947	\$ 144.909.272	\$ 128.025.602	\$ 129.637.059
\$ 2.724.776.801	\$ 2.475.564.521	\$ 2.250.179.065	\$ 2.047.036.332	\$ 1.864.656.598	\$ 1.701.657.652	\$ 1.556.748.380	\$ 1.428.722.777	\$ 1.299.085.718

Flujo de caja social proyecto generación de agua caliente y vapor con caldera.

Años	0	2020	2021	2022	2023
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		139	171	202	231
Capacidad Bruta de Planta (kW)		2.800	2.800	2.800	2.800
Capacidad Neta de la Planta (kW)		635	780	919	1.053
Factor de planta(%)		0,9	0,9	0,9	0,9
Reducción de emisión de metano (ton/año)		833	1.024	1.206	1.382
Vapor vendido aserradero (kWht)		248.265	1.395.043	2.494.027	3.548.875
Vapor vendido red distrital (kWht)		3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
Agua caliente vendida (kWht)		1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
Reducción GEI por combustión de metano (ton CO2e/año)		20.816	25.588	30.161	34.550
Reducción GEI por reemplazo otros combustibles (ton CO2e/año)		1.770	2.194	2.601	2.991
Reducción de MP2,5(ton)		40	41	42	43
Precio social del carbono (CLP/ton CO2e)		2.213	2.213	2.213	2.213
Beneficio unitario salud por reducción de MP2,5 (CLP/ton MP2,5)		18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
Beneficio reducción de GEI por destrucción de metano(CLP/año)		\$ 46.065.979	\$ 56.626.210	\$ 66.746.323	\$ 76.460.003
Beneficio reducción de GEI reemplazo combustibles fósiles (CLP/año)		\$ 3.916.226	\$ 4.855.219	\$ 5.755.078	\$ 6.618.798
Beneficio disminución MP2,5		\$ 741.692.743	\$ 759.236.089	\$ 776.048.281	\$ 792.185.280
Beneficios totales		\$ 791.674.949	\$ 820.717.518	\$ 848.549.682	\$ 875.264.081
Consumo eléctrico equipos auxiliares (kWh/año)		153.792	189.048	222.834	255.263
Precio electricidad (CLP/kWh)		100	100	100	100
Costos electricidad (CLP/año)		\$ 15.379.211	\$ 18.904.764	\$ 22.283.382	\$ 25.526.311
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 25.580.698	\$ 26.465.699	\$ 27.197.355	\$ 27.820.354
Costo O&M Red distrital		\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294
Beneficios netos		\$ 717.679.746	\$ 742.311.762	\$ 766.033.652	\$ 788.882.121
Inversión (CLP/año)	\$ 3.068.479.252	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Valor Residual activos (CLP/año)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional	\$ -3.068.479.252	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo de Caja	\$ -3.068.479.252	\$ 717.679.746	\$ 742.311.762	\$ 766.033.652	\$ 788.882.121
Tasa de descuento (%)		6%			
TIR		26,04%			
VAN (CLP)		\$9.268.240.588			

2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
260	287	313	338	363	387	410	432	454
2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
1.182	1.306	1.425	1.541	1.652	1.761	1.866	1.969	2.069
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1.551	1.713	1.870	2.022	2.168	2.311	2.449	2.584	2.715
4.563.013	5.539.654	6.481.809	7.392.299	8.273.774	9.128.716	9.959.458	10.768.188	11.556.965
3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
38.770	42.834	46.755	50.543	54.211	57.769	61.226	64.591	67.873
3.366	3.727	4.076	4.413	4.739	5.055	5.363	5.662	5.954
44	45	46	46	47	48	48	49	50
2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213
18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
\$ 85.798.809	\$ 94.792.316	\$ 103.468.248	\$ 111.852.600	\$ 119.969.752	\$ 127.842.580	\$ 135.492.557	\$ 142.939.843	\$ 150.203.378
\$ 7.449.185	\$ 8.248.869	\$ 9.020.314	\$ 9.765.833	\$ 10.487.593	\$ 11.187.628	\$ 11.867.848	\$ 12.530.044	\$ 13.175.902
\$ 807.699.515	\$ 822.640.117	\$ 837.053.142	\$ 850.981.775	\$ 864.466.518	\$ 877.545.375	\$ 890.254.016	\$ 902.625.935	\$ 914.692.592
\$ 900.947.509	\$ 925.681.302	\$ 949.541.705	\$ 972.600.207	\$ 994.923.862	\$ 1.016.575.583	\$ 1.037.614.421	\$ 1.058.095.523	\$ 1.078.071.873
286.441	316.466	345.431	373.422	400.521	426.805	452.344	477.207	501.457
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 28.644.089	\$ 31.646.588	\$ 34.543.064	\$ 37.342.195	\$ 40.052.121	\$ 42.680.479	\$ 45.234.438	\$ 47.720.728	\$ 50.145.672
\$ 28.362.185	\$ 28.841.062	\$ 29.269.729	\$ 29.657.479	\$ 30.011.314	\$ 30.336.649	\$ 30.637.765	\$ 30.918.108	\$ 31.180.495
\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294
\$ 810.905.941	\$ 832.158.358	\$ 852.693.618	\$ 872.565.240	\$ 891.825.134	\$ 910.523.162	\$ 928.706.925	\$ 946.421.693	\$ 963.710.412
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 810.905.941	\$ 832.158.358	\$ 852.693.618	\$ 872.565.240	\$ 891.825.134	\$ 910.523.162	\$ 928.706.925	\$ 946.421.693	\$ 963.710.412

2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
476	497	517	538	611	654	611	571	498
2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
2.167	2.262	2.356	2.448	2.800	2.781	2.598	2.428	2.268
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
2.843	2.969	3.092	3.213	3.907	3.650	3.410	3.186	2.976
12.327.720	13.082.271	13.822.327	14.549.499	17.320.975	17.173.269	15.731.766	14.385.027	13.126.821
3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
71.080	74.220	77.300	80.326	97.664	91.243	85.245	79.641	74.406
6.239	6.518	6.792	7.061	8.087	8.032	7.499	7.000	6.535
50	51	52	52	55	54	53	52	51
2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213
18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
\$ 157.300.959	\$ 164.249.323	\$ 171.064.213	\$ 177.760.451	\$ 216.130.016	\$ 201.921.731	\$ 188.647.492	\$ 176.245.895	\$ 164.659.574
\$ 13.807.004	\$ 14.424.838	\$ 15.030.804	\$ 15.626.219	\$ 17.895.532	\$ 17.774.589	\$ 16.594.272	\$ 15.491.548	\$ 14.461.317
\$ 926.483.558	\$ 938.026.634	\$ 949.347.975	\$ 960.472.203	\$ 1.002.870.094	\$ 1.000.610.500	\$ 978.558.467	\$ 957.956.124	\$ 938.708.170
\$ 1.097.591.521	\$ 1.116.700.794	\$ 1.135.442.992	\$ 1.153.858.873	\$ 1.236.895.642	\$ 1.220.306.820	\$ 1.183.800.231	\$ 1.149.693.567	\$ 1.117.829.060
525.152	548.349	571.101	593.457	721.554	674.119	629.803	588.400	549.719
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 52.515.212	\$ 54.834.936	\$ 57.110.100	\$ 59.345.651	\$ 72.155.401	\$ 67.411.939	\$ 62.980.310	\$ 58.840.014	\$ 54.971.899
\$ 31.427.256	\$ 31.660.347	\$ 31.881.420	\$ 32.091.883	\$ 33.188.545	\$ 32.802.114	\$ 32.420.904	\$ 32.044.843	\$ 31.673.861
\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294
\$ 980.613.758	\$ 997.170.217	\$ 1.013.416.179	\$ 1.029.386.045	\$ 1.098.516.403	\$ 1.087.057.473	\$ 1.055.363.723	\$ 1.025.773.417	\$ 998.148.005
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 980.613.758	\$ 997.170.217	\$ 1.013.416.179	\$ 1.029.386.045	\$ 1.098.516.403	\$ 1.087.057.473	\$ 1.055.363.723	\$ 1.025.773.417	\$ 998.148.005

2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
465	435	406	379	354	331	309	289	270
2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
2.119	1.980	1.849	1.728	1.614	1.508	1.409	1.316	1.230
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
2.781	2.598	2.427	2.267	2.118	1.979	1.849	1.727	1.614
11.951.330	10.853.115	9.827.096	8.868.526	7.972.973	7.136.293	6.354.616	5.624.326	4.942.045
3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500	3.489.500
1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725	1.264.725
69.514	64.944	60.675	56.686	52.960	49.478	46.225	43.187	40.348
6.100	5.693	5.314	4.959	4.628	4.318	4.029	3.759	3.506
50	49	48	48	47	46	45	45	44
2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213	2.213
18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000	18.380.000
\$ 153.834.931	\$ 143.721.896	\$ 134.273.686	\$ 125.446.598	\$ 117.199.798	\$ 109.495.139	\$ 102.296.980	\$ 95.572.025	\$ 89.289.165
\$ 13.498.813	\$ 12.599.583	\$ 11.759.468	\$ 10.974.582	\$ 10.241.294	\$ 9.556.212	\$ 8.916.167	\$ 8.318.199	\$ 7.759.540
\$ 920.725.567	\$ 903.925.131	\$ 888.229.149	\$ 873.565.013	\$ 859.864.890	\$ 847.065.407	\$ 835.107.355	\$ 823.935.421	\$ 813.497.924
\$ 1.088.059.310	\$ 1.060.246.610	\$ 1.034.262.303	\$ 1.009.986.193	\$ 987.305.982	\$ 966.116.758	\$ 946.320.503	\$ 927.825.645	\$ 910.546.629
513.581	479.818	448.275	418.806	391.274	365.552	341.520	319.069	298.094
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 51.358.073	\$ 47.981.817	\$ 44.827.515	\$ 41.880.576	\$ 39.127.367	\$ 36.555.152	\$ 34.152.034	\$ 31.906.895	\$ 29.809.351
\$ 31.307.891	\$ 30.946.865	\$ 30.590.715	\$ 30.239.376	\$ 29.892.782	\$ 29.550.871	\$ 29.213.578	\$ 28.880.841	\$ 28.552.599
\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294	\$ 33.035.294
\$ 972.358.052	\$ 948.282.634	\$ 925.808.779	\$ 904.830.947	\$ 885.250.539	\$ 866.975.441	\$ 849.919.597	\$ 834.002.614	\$ 819.149.385
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 972.358.052	\$ 948.282.634	\$ 925.808.779	\$ 904.830.947	\$ 885.250.539	\$ 866.975.441	\$ 849.919.597	\$ 834.002.614	\$ 819.149.385

Anexo E Flujos de caja proyectos relleno sanitario El Molle

Flujo de caja privado proyecto generación eléctrica con motores

Años	0	2017	2018	2019	2020
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		247	331	414	497
Capacidad Bruta de Planta (kW)		1000	1000	1000	2000
Capacidad Neta de la Planta (kW)		513	687	860	1032
Factor de planta(%)		0,93	0,93	0,93	0,93
Potencia firme (kW)		477	639	800	960
Energía eléctrica vendida (kWh/año)		4.178.062	5.597.978	7.007.211	8.406.471
Precio de la energía (CLP/MWh)		62,2	62,8	63,5	64,1
Precio nudo de potencia (CLP/kW)		60.948	60.948	60.948	60.948
Reducción de emisión de metano (ton/año)		1.474	1.974	2.471	2.965
CERs (ton CO2e/año)		36.838	49.357	61.783	74.120
Precio CER (CLP/ton CO2e)		2.278	2.278	2.278	2.278
Precio atributo verde (CLP/kWh)		4,0	4,0	4,0	4,0
Ingreso por CER (CLP/año)		\$ 83.916.932	\$ 112.436.125	\$ 140.740.766	\$ 168.845.089
Ingreso por venta de energía eléctrica (CLP/año)		\$ 259.875.464	\$ 351.676.156	\$ 444.609.092	\$ 538.726.373
Ingreso por pago potencia (CLP/año)		\$ 29.069.010	\$ 38.948.122	\$ 48.752.912	\$ 58.488.311
Ingreso por atributo verde (CLP/año)		\$ 16.712.249	\$ 22.391.911	\$ 28.028.845	\$ 33.625.885
Ingresos totales		\$ 389.573.655	\$ 525.452.314	\$ 662.131.614	\$ 799.685.658
Costos O&M ductos y pozos (CLP/año)		\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
Costos O&M antorcha (CLP/año)		\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 75.205.118	\$ 100.763.599	\$ 126.129.801	\$ 151.316.482
Gasto financiero (CLP/año)		\$ 307.478.850	\$ 299.120.174	\$ 290.259.977	\$ 280.868.168
- Depreciación (CLP/año)		\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 187.200.000
Ganancia o pérdida de capital (CLP/año)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 349.820.314	\$ 580.961.773	\$ 691.929.937
Utilidades antes de impuesto		-349.820.314	-580.961.773	-691.929.937	-774.738.930
Impuesto a las utilidades(25%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad despues de impuesto		\$ -349.820.314	\$ -580.961.773	\$ -691.929.937	\$ -774.738.930
+ Depreciación		\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 187.200.000
+Perdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 349.820.314	\$ 580.961.773	\$ 691.929.937
Flujo operacional		\$ -256.220.314	\$ -137.541.459	\$ -17.368.164	\$ 104.391.007
Inversión (CLP/año)	\$ 7.320.925.010	\$ -	\$ -	\$ 936.000.000	\$ -
Capital de trabajo (CLP/año)	\$ 56.385.853	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Prestamo (CLP/año)	\$ 5.124.647.507	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Amortización (CLP/año)		\$ 139.311.272	\$ 147.669.948	\$ 156.530.145	\$ 165.921.954
Valor residual (CLP)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional		\$ -2.252.663.356	\$ -139.311.272	\$ -147.669.948	\$ -1.092.530.145
Flujo de Caja		\$ -2.252.663.356	\$ -395.531.586	\$ -285.211.408	\$ -1.109.898.310
Recuperació de la inversión		\$ 7.377.310.863	\$ 7.772.842.449	\$ 8.058.053.857	\$ 9.229.483.113
Tasa de descuento (%)		10%			
TIR		10,63%			
VAN (CLP)		\$401.275.896			

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
579	661	742	823	903	983	1063	1142	1221
2000	2000	2000	2000	2000	3000	3000	3000	3000
1202	1372	1541	1708	1875	2041	2207	2372	2536
0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
1118	1276	1433	1589	1744	1899	2052	2206	2359
9.796.456	11.177.852	12.551.337	13.917.579	15.277.235	16.630.956	17.979.383	19.323.147	20.662.874
64,7	65,4	66,0	66,7	67,4	68,0	68,7	69,4	70,1
60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948
3.455	3.942	4.427	4.908	5.388	5.865	6.341	6.815	7.287
86.375	98.555	110.665	122.711	134.699	146.635	158.524	170.372	182.185
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
\$ 196.763.110	\$ 224.508.634	\$ 252.095.265	\$ 279.536.412	\$ 306.845.298	\$ 334.034.966	\$ 361.118.287	\$ 388.107.967	\$ 415.016.556
\$ 634.081.167	\$ 730.727.746	\$ 828.721.513	\$ 928.119.046	\$ 1.028.978.132	\$ 1.131.357.802	\$ 1.235.318.374	\$ 1.340.921.492	\$ 1.448.230.164
\$ 68.159.175	\$ 77.770.286	\$ 87.326.356	\$ 96.832.030	\$ 106.291.888	\$ 115.710.449	\$ 125.092.171	\$ 134.441.456	\$ 143.762.651
\$ 39.185.822	\$ 44.711.407	\$ 50.205.347	\$ 55.670.315	\$ 61.108.942	\$ 66.523.826	\$ 71.917.531	\$ 77.292.588	\$ 82.651.494
\$ 938.189.275	\$ 1.077.718.073	\$ 1.218.348.481	\$ 1.360.157.803	\$ 1.503.224.260	\$ 1.647.627.043	\$ 1.793.446.364	\$ 1.940.763.503	\$ 2.089.660.865
\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 176.336.201	\$ 201.201.331	\$ 225.924.063	\$ 250.516.415	\$ 274.990.237	\$ 299.357.217	\$ 323.628.890	\$ 347.816.644	\$ 371.931.725
\$ 270.912.851	\$ 260.360.215	\$ 249.174.420	\$ 237.317.478	\$ 224.749.120	\$ 211.426.660	\$ 197.304.852	\$ 182.335.735	\$ 166.468.472
\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 280.800.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 774.738.930	\$ 734.108.707	\$ 568.262.180	\$ 275.322.183	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-734.108.707	-568.262.180	-275.322.183	146.691.726	553.174.903	592.933.167	822.202.622	960.301.124	1.100.950.668
\$ -	\$ -	\$ -	\$ 36.672.932	\$ 138.293.726	\$ 148.233.292	\$ 205.550.655	\$ 240.075.281	\$ 275.237.667
\$ -734.108.707	\$ -568.262.180	\$ -275.322.183	\$ 110.018.795	\$ 414.881.177	\$ 444.699.875	\$ 616.651.966	\$ 720.225.843	\$ 825.713.001
\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 280.800.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000
\$ 774.738.930	\$ 734.108.707	\$ 568.262.180	\$ 275.322.183	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 227.830.223	\$ 353.046.527	\$ 480.139.998	\$ 572.540.978	\$ 602.081.177	\$ 725.499.875	\$ 803.851.966	\$ 907.425.843	\$ 1.012.913.001
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 936.000.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 175.877.271	\$ 186.429.908	\$ 197.615.702	\$ 209.472.644	\$ 222.041.003	\$ 235.363.463	\$ 249.485.271	\$ 264.454.387	\$ 280.321.650
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -175.877.271	\$ -186.429.908	\$ -197.615.702	\$ -209.472.644	\$ -1.158.041.003	\$ -235.363.463	\$ -249.485.271	\$ -264.454.387	\$ -280.321.650
\$ 51.952.952	\$ 166.616.619	\$ 282.524.295	\$ 363.068.333	\$ -555.959.826	\$ 490.136.412	\$ 554.366.696	\$ 642.971.456	\$ 732.591.351
\$ 9.177.530.161	\$ 9.010.913.542	\$ 8.728.389.247	\$ 8.365.320.913	\$ 8.921.280.739	\$ 8.431.144.327	\$ 7.876.777.631	\$ 7.233.806.176	\$ 6.501.214.825

2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
1300	1379	1458	1536	1615	1979	1928	1879	1831
3000	3000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
2700	2864	3027	3191	3354	3720	3720	3720	3720
0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
2511	2664	2816	2967	3119	3460	3460	3460	3460
21.999.180	23.332.677	24.663.966	25.993.646	27.322.305	30.306.096	30.306.096	30.306.096	30.306.096
70,8	71,5	72,2	72,9	73,7	74,4	75,1	75,9	76,7
60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948	60.948
7.759	8.229	8.698	9.167	9.636	11.810	11.507	11.212	10.924
193.967	205.724	217.462	229.186	240.901	295.254	287.676	280.293	273.099
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
\$ 441.856.450	\$ 468.639.903	\$ 495.379.031	\$ 522.085.818	\$ 548.772.126	\$ 672.587.839	\$ 655.325.933	\$ 638.507.051	\$ 622.119.825
\$ 1.557.308.807	\$ 1.668.223.285	\$ 1.781.040.960	\$ 1.895.830.731	\$ 2.012.663.081	\$ 2.254.784.846	\$ 2.277.332.695	\$ 2.300.106.022	\$ 2.323.107.082
\$ 153.060.049	\$ 162.337.896	\$ 171.600.389	\$ 180.851.679	\$ 190.095.875	\$ 210.855.701	\$ 210.855.701	\$ 210.855.701	\$ 210.855.701
\$ 87.996.721	\$ 93.330.706	\$ 98.655.865	\$ 103.974.582	\$ 109.289.222	\$ 121.224.384	\$ 121.224.384	\$ 121.224.384	\$ 121.224.384
\$ 2.240.222.026	\$ 2.392.531.790	\$ 2.546.676.245	\$ 2.702.742.811	\$ 2.860.820.304	\$ 3.259.452.770	\$ 3.264.738.712	\$ 3.270.693.158	\$ 3.277.306.992
\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 395.985.242	\$ 419.988.178	\$ 443.951.391	\$ 467.885.621	\$ 491.801.497	\$ 545.509.728	\$ 545.509.728	\$ 545.509.728	\$ 545.509.728
\$ 149.649.173	\$ 131.820.716	\$ 112.922.552	\$ 92.890.498	\$ 71.656.520	\$ 49.148.504	\$ 25.290.007	\$ -	\$ -
\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 93.600.000
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
1.337.877.610	1.484.012.896	1.539.492.302	1.691.656.692	1.847.052.287	2.214.484.538	2.337.228.977	2.368.473.430	2.375.087.264
\$ 334.469.403	\$ 371.003.224	\$ 384.873.075	\$ 422.914.173	\$ 461.763.072	\$ 553.621.135	\$ 584.307.244	\$ 592.118.357	\$ 593.771.816
\$ 1.003.408.208	\$ 1.113.009.672	\$ 1.154.619.226	\$ 1.268.742.519	\$ 1.385.289.215	\$ 1.660.863.404	\$ 1.752.921.733	\$ 1.776.355.072	\$ 1.781.315.448
\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 187.200.000	\$ 93.600.000	\$ 93.600.000	\$ 93.600.000
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 1.097.008.208	\$ 1.206.609.672	\$ 1.341.819.226	\$ 1.455.942.519	\$ 1.572.489.215	\$ 1.848.063.404	\$ 1.846.521.733	\$ 1.869.955.072	\$ 1.874.915.448
\$ -	\$ 936.000.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 297.140.949	\$ 314.969.406	\$ 333.867.571	\$ 353.899.625	\$ 375.133.602	\$ 397.641.619	\$ 421.500.116	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -297.140.949	\$ -1.250.969.406	\$ -333.867.571	\$ -353.899.625	\$ -375.133.602	\$ -397.641.619	\$ -421.500.116	\$ -	\$ -
\$ 799.867.258	\$ -44.359.734	\$ 1.007.951.656	\$ 1.102.042.894	\$ 1.197.355.613	\$ 1.450.421.785	\$ 1.425.021.617	\$ 1.869.955.072	\$ 1.874.915.448
\$ 5.701.347.566	\$ 5.745.707.301	\$ 4.737.755.645	\$ 3.635.712.751	\$ 2.438.357.137	\$ 987.935.352	\$ -437.086.265	\$ -2.307.041.337	\$ -4.181.956.785

Flujo de caja privado proyecto evaporación de lixiviados con inversión en sistema de extracción

Años	0	2017	2018	2019	2020
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		247	331	414	497
Capacidad Bruta de Planta (m3 lixiado/año)		13264	13264	13264	26528
Volumen de lixiviado (m3/año)		2628	4526	6460,5	8395
Costo tratamiento de lixiviado (CLP/m3)		19000	19000	19000	19000
Costo tratatamiento por evaporación (CLP/m3)		3500	3500	3500	3500
Reducción de emisión de metano (ton/año)		1.474	1.974	2.471	2.965
CERs (ton CO2e/año)		36.838	49.357	61.783	74.120
Precio CER (CLP/ton CO2e)		2.278	2.278	2.278	2.278
Ingreso por CER (CLP/año)		\$ 83.916.932	\$ 112.436.125	\$ 140.740.766	\$ 168.845.089
Ahorro por evaporación (CLP/año)		\$ 40.734.000	\$ 70.153.000	\$ 100.137.750	\$ 130.122.500
Ingresos totales		\$ 124.650.932	\$ 182.589.125	\$ 240.878.516	\$ 298.967.589
Consumo electrico equipos auxiliares (kWh/año)		38.369	66.080	94.323	122.567
Precio electricidad (CLP/kWh)		100	100	100	100
Costos electricidad (CLP/año)		\$ 3.836.880	\$ 6.607.960	\$ 9.432.330	\$ 12.256.700
Costos O&M ductos y pozos (CLP/año)		\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
Costos O&M antorcha (CLP/año)		\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 13.140.000	\$ 22.630.000	\$ 32.302.500	\$ 41.975.000
Gasto financiero (CLP/año)		\$ 148.398.426	\$ 122.073.080	\$ 94.168.212	\$ 64.589.053
- Depreciación (CLP/año)		\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
Ganancia o pérdida de capital (CLP/año)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-Pérdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 372.676.947	\$ 670.580.354	\$ 891.962.002
Utilidades antes de impuesto		-372.676.947	-670.580.354	-891.962.002	-1.035.347.918
Impuesto a las utilidades(25%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad despues de impuesto		\$ -372.676.947	\$ -670.580.354	\$ -891.962.002	\$ -1.035.347.918
+ Depreciación		\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
+Pérdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 372.676.947	\$ 670.580.354	\$ 891.962.002
Flujo operacional		\$ -299.997.495	\$ -225.223.955	\$ -148.702.196	\$ -70.706.464
Inversión (CLP/año)	\$ 3.533.295.866	\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -
Capital de trabajo (CLP/año)	\$ 46.681.147	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Prestamo (CLP/año)	\$ 2.473.307.106	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Amortización (CLP/año)		\$ 438.755.778	\$ 465.081.124	\$ 492.985.992	\$ 522.565.151
Valor residual (CLP)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional	\$ -1.106.669.906	\$ -438.755.778	\$ -465.081.124	\$ -711.024.348	\$ -522.565.151
Flujo de Caja	\$ -1.106.669.906	\$ -738.753.272	\$ -690.305.079	\$ -859.726.544	\$ -593.271.615
Recuperació de la inversión	\$ 3.579.977.013	\$ 4.318.730.285	\$ 5.009.035.365	\$ 5.868.761.909	\$ 6.462.033.524
Tasa de descuento (%)		10%			
TIR		0,81%			
VAN (CLP)		\$ -2.530.977.675			

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
579	661	742	823	903	983	1063	1142	1221
26528	26528	26528	39792	39792	39792	39792	53056	53056
10366	12337	14308	16352	18359,5	20476,5	22593,5	24783,5	26973,5
19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
3.455	3.942	4.427	4.908	5.388	5.865	6.341	6.815	7.287
86.375	98.555	110.665	122.711	134.699	146.635	158.524	170.372	182.185
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
\$ 196.763.110	\$ 224.508.634	\$ 252.095.265	\$ 279.536.412	\$ 306.845.298	\$ 334.034.966	\$ 361.118.287	\$ 388.107.967	\$ 415.016.556
\$ 160.673.000	\$ 191.223.500	\$ 221.774.000	\$ 253.456.000	\$ 284.572.250	\$ 317.385.750	\$ 350.199.250	\$ 384.144.250	\$ 418.089.250
\$ 357.436.110	\$ 415.732.134	\$ 473.869.265	\$ 532.992.412	\$ 591.417.548	\$ 651.420.716	\$ 711.317.537	\$ 772.252.217	\$ 833.105.806
151.344	180.120	208.897	238.739	268.049	298.957	329.865	361.839	393.813
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 15.134.360	\$ 18.012.020	\$ 20.889.680	\$ 23.873.920	\$ 26.804.870	\$ 29.895.690	\$ 32.986.510	\$ 36.183.910	\$ 39.381.310
\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 51.830.000	\$ 61.685.000	\$ 71.540.000	\$ 81.760.000	\$ 91.797.500	\$ 102.382.500	\$ 112.967.500	\$ 123.917.500	\$ 134.867.500
\$ 33.235.144	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 1.035.347.918	\$ 1.098.766.404	\$ 1.080.508.722	\$ 941.289.457	\$ 825.846.497	\$ 662.015.900	\$ 448.767.136	\$ 113.527.099	\$ -
-1.098.766.404	-1.080.508.722	-941.289.457	-825.846.497	-662.015.900	-448.767.136	-113.527.099	199.018.166	362.448.854
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 49.754.541	\$ 90.612.213
\$ -1.098.766.404	\$ -1.080.508.722	\$ -941.289.457	\$ -825.846.497	\$ -662.015.900	\$ -448.767.136	\$ -113.527.099	\$ 149.263.624	\$ 271.836.640
\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ 1.035.347.918	\$ 1.098.766.404	\$ 1.080.508.722	\$ 941.289.457	\$ 825.846.497	\$ 662.015.900	\$ 448.767.136	\$ 113.527.099	\$ -
\$ 9.260.966	\$ 90.937.134	\$ 139.219.265	\$ 188.122.412	\$ 236.510.048	\$ 285.928.216	\$ 335.240.037	\$ 335.470.176	\$ 344.516.092
\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 553.919.061	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -553.919.061	\$ -	\$ -218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -218.038.356	\$ -	\$ -
\$ -544.658.094	\$ 90.937.134	\$ -78.819.091	\$ 188.122.412	\$ 236.510.048	\$ 285.928.216	\$ 117.201.681	\$ 335.470.176	\$ 344.516.092
\$ 7.006.691.619	\$ 6.915.754.485	\$ 6.994.573.576	\$ 6.806.451.164	\$ 6.569.941.115	\$ 6.284.012.899	\$ 6.166.811.218	\$ 5.831.341.042	\$ 5.486.824.950

2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1300	1379	1458	1536	1615	1979	1928
53056	66320	66320	66320	79584	79584	79584
29200	31426,5	33726	36025,5	38398	40770,5	43179,5
19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
7.759	8.229	8.698	9.167	9.636	11.810	11.507
193.967	205.724	217.462	229.186	240.901	295.254	287.676
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
\$ 441.856.450	\$ 468.639.903	\$ 495.379.031	\$ 522.085.818	\$ 548.772.126	\$ 672.587.839	\$ 655.325.933
\$ 452.600.000	\$ 487.110.750	\$ 522.753.000	\$ 558.395.250	\$ 595.169.000	\$ 631.942.750	\$ 669.282.250
\$ 894.456.450	\$ 955.750.653	\$ 1.018.132.031	\$ 1.080.481.068	\$ 1.143.941.126	\$ 1.304.530.589	\$ 1.324.608.183
426.320	458.827	492.400	525.972	560.611	595.249	630.421
100	100	100	100	100	100	100
\$ 42.632.000	\$ 45.882.690	\$ 49.239.960	\$ 52.597.230	\$ 56.061.080	\$ 59.524.930	\$ 63.042.070
\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 146.000.000	\$ 157.132.500	\$ 168.630.000	\$ 180.127.500	\$ 191.990.000	\$ 203.852.500	\$ 215.897.500
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 72.679.452	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
412.666.998	535.508.153	586.392.031	637.243.568	616.161.674	764.888.637	772.921.231
\$ 103.166.749	\$ 133.877.038	\$ 146.598.008	\$ 159.310.892	\$ 154.040.419	\$ 191.222.159	\$ 193.230.308
\$ 309.500.248	\$ 401.631.115	\$ 439.794.023	\$ 477.932.676	\$ 462.121.256	\$ 573.666.478	\$ 579.690.923
\$ 72.679.452	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 382.179.700	\$ 401.631.115	\$ 439.794.023	\$ 477.932.676	\$ 534.800.708	\$ 646.345.930	\$ 652.370.375
\$ 218.038.356	\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 436.076.712
\$ -218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -218.038.356	\$ -	\$ -	\$ 436.076.712
\$ 164.141.344	\$ 401.631.115	\$ 439.794.023	\$ 259.894.320	\$ 534.800.708	\$ 646.345.930	\$ 1.088.447.087
\$ 5.322.683.606	\$ 4.921.052.492	\$ 4.481.258.469	\$ 4.221.364.148	\$ 3.686.563.441	\$ 3.040.217.511	\$ 1.951.770.423

Flujo de caja privado proyecto evaporación de lixiviados sin inversión en sistema de extracción

Años	0	2017	2018	2019	2020
Flujo potencial de biogás captable (m3/h)		247	331	414	497
Capacidad Bruta de Planta (m3 lixiado/año)		13264	13264	13264	26528
Volumen de lixiviado (m3/año)		2628	4526	6460,5	8395
Costo tratamiento de lixiviado (CLP/m3)		19000	19000	19000	19000
Costo tratatamiento por evaporación (CLP/m3)		3500	3500	3500	3500
Reducción de emisión de metano (ton/año)		1.474	1.974	2.471	2.965
CERs (ton CO2e/año)		36.838	49.357	61.783	74.120
Precio CER (CLP/ton CO2e)		2.278	2.278	2.278	2.278
Ingreso por CER (CLP/año)		\$ 83.916.932	\$ 112.436.125	\$ 140.740.766	\$ 168.845.089
Ahorro por evaporación (CLP/año)		\$ 40.734.000	\$ 70.153.000	\$ 100.137.750	\$ 130.122.500
Ingresos totales		\$ 124.650.932	\$ 182.589.125	\$ 240.878.516	\$ 298.967.589
Consumo electrico equipos auxiliares (kWh/año)		38.369	66.080	94.323	122.567
Precio electricidad (CLP/kWh)		100	100	100	100
Costos electricidad (CLP/año)		\$ 3.836.880	\$ 6.607.960	\$ 9.432.330	\$ 12.256.700
Costos O&M ductos y pozos (CLP/año)		\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
Costos O&M antorcha (CLP/año)		\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
Costo O&M tecnología de aprovechamiento energético (CLP/año)		\$ 13.140.000	\$ 22.630.000	\$ 32.302.500	\$ 41.975.000
Gasto financiero (CLP/año)		\$ 25.513.986	\$ 20.987.897	\$ 16.190.242	\$ 11.104.728
- Depreciación (CLP/año)		\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
Ganancia o pérdida de capital (CLP/año)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-Pérdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 249.792.506	\$ 446.610.730	\$ 590.014.408
Utilidades antes de impuesto		-249.792.506	-446.610.730	-590.014.408	-679.916.000
Impuesto a las utilidades(25%)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Utilidad despues de impuesto		\$ -249.792.506	\$ -446.610.730	\$ -590.014.408	\$ -679.916.000
+ Depreciación		\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
+Pérdida del ejercicio anterior (CLP/año)		\$ -	\$ 249.792.506	\$ 446.610.730	\$ 590.014.408
Flujo operacional		\$ -177.113.054	\$ -124.138.772	\$ -70.724.226	\$ -17.222.139
Inversión (CLP/año)	\$ 607.475.856	\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -
Capital de trabajo (CLP/año)	\$ 46.681.147	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Prestamo (CLP/año)	\$ 425.233.099	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Amortización (CLP/año)		\$ 75.434.821	\$ 79.960.910	\$ 84.758.565	\$ 89.844.079
Valor residual (CLP)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo no operacional		\$ -228.923.904	\$ -75.434.821	\$ -79.960.910	\$ -302.796.921
Flujo de Caja		\$ -228.923.904	\$ -252.547.875	\$ -204.099.682	\$ -373.521.147
Recuperació de la inversión		\$ 654.157.003	\$ 906.704.878	\$ 1.110.804.561	\$ 1.484.325.708
Tasa de descuento (%)		10%			
TIR		11,28%			
VAN (CLP)		\$157.217.975			

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
579	661	742	823	903	983	1063	1142	1221
26528	26528	26528	39792	39792	39792	39792	53056	53056
10366	12337	14308	16352	18359,5	20476,5	22593,5	24783,5	26973,5
19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
3.455	3.942	4.427	4.908	5.388	5.865	6.341	6.815	7.287
86.375	98.555	110.665	122.711	134.699	146.635	158.524	170.372	182.185
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
\$ 196.763.110	\$ 224.508.634	\$ 252.095.265	\$ 279.536.412	\$ 306.845.298	\$ 334.034.966	\$ 361.118.287	\$ 388.107.967	\$ 415.016.556
\$ 160.673.000	\$ 191.223.500	\$ 221.774.000	\$ 253.456.000	\$ 284.572.250	\$ 317.385.750	\$ 350.199.250	\$ 384.144.250	\$ 418.089.250
\$ 357.436.110	\$ 415.732.134	\$ 473.869.265	\$ 532.992.412	\$ 591.417.548	\$ 651.420.716	\$ 711.317.537	\$ 772.252.217	\$ 833.105.806
151.344	180.120	208.897	238.739	268.049	298.957	329.865	361.839	393.813
100	100	100	100	100	100	100	100	100
\$ 15.134.360	\$ 18.012.020	\$ 20.889.680	\$ 23.873.920	\$ 26.804.870	\$ 29.895.690	\$ 32.986.510	\$ 36.183.910	\$ 39.381.310
\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 51.830.000	\$ 61.685.000	\$ 71.540.000	\$ 81.760.000	\$ 91.797.500	\$ 102.382.500	\$ 112.967.500	\$ 123.917.500	\$ 134.867.500
\$ 5.714.083	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 679.916.000	\$ 715.813.425	\$ 697.555.744	\$ 558.336.479	\$ 442.893.518	\$ 279.062.922	\$ 65.814.158	\$ -	\$ -
-715.813.425	-697.555.744	-558.336.479	-442.893.518	-279.062.922	-65.814.158	269.425.879	312.545.265	362.448.854
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 67.356.470	\$ 78.136.316	\$ 90.612.213
\$ -715.813.425	\$ -697.555.744	\$ -558.336.479	\$ -442.893.518	\$ -279.062.922	\$ -65.814.158	\$ 202.069.409	\$ 234.408.949	\$ 271.836.640
\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ 679.916.000	\$ 715.813.425	\$ 697.555.744	\$ 558.336.479	\$ 442.893.518	\$ 279.062.922	\$ 65.814.158	\$ -	\$ -
\$ 36.782.026	\$ 90.937.134	\$ 139.219.265	\$ 188.122.412	\$ 236.510.048	\$ 285.928.216	\$ 267.883.567	\$ 307.088.401	\$ 344.516.092
\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 95.234.724	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -95.234.724	\$ -	\$ -218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -218.038.356	\$ -	\$ -
\$ -58.452.697	\$ 90.937.134	\$ -78.819.091	\$ 188.122.412	\$ 236.510.048	\$ 285.928.216	\$ 49.845.211	\$ 307.088.401	\$ 344.516.092
\$ 1.649.844.623	\$ 1.558.907.490	\$ 1.637.726.581	\$ 1.449.604.168	\$ 1.213.094.120	\$ 927.165.904	\$ 877.320.693	\$ 570.232.292	\$ 225.716.200

2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1300	1379	1458	1536	1615	1979	1928
53056	66320	66320	66320	79584	79584	79584
29200	31426,5	33726	36025,5	38398	40770,5	43179,5
19000	19000	19000	19000	19000	19000	19000
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500
7.759	8.229	8.698	9.167	9.636	11.810	11.507
193.967	205.724	217.462	229.186	240.901	295.254	287.676
2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278	2.278
\$ 441.856.450	\$ 468.639.903	\$ 495.379.031	\$ 522.085.818	\$ 548.772.126	\$ 672.587.839	\$ 655.325.933
\$ 452.600.000	\$ 487.110.750	\$ 522.753.000	\$ 558.395.250	\$ 595.169.000	\$ 631.942.750	\$ 669.282.250
\$ 894.456.450	\$ 955.750.653	\$ 1.018.132.031	\$ 1.080.481.068	\$ 1.143.941.126	\$ 1.304.530.589	\$ 1.324.608.183
426.320	458.827	492.400	525.972	560.611	595.249	630.421
100	100	100	100	100	100	100
\$ 42.632.000	\$ 45.882.690	\$ 49.239.960	\$ 52.597.230	\$ 56.061.080	\$ 59.524.930	\$ 63.042.070
\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000	\$ 259.440.000
\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000	\$ 3.670.000
\$ 146.000.000	\$ 157.132.500	\$ 168.630.000	\$ 180.127.500	\$ 191.990.000	\$ 203.852.500	\$ 215.897.500
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 72.679.452	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
412.666.998	535.508.153	586.392.031	637.243.568	616.161.674	764.888.637	772.921.231
\$ 103.166.749	\$ 133.877.038	\$ 146.598.008	\$ 159.310.892	\$ 154.040.419	\$ 191.222.159	\$ 193.230.308
\$ 309.500.248	\$ 401.631.115	\$ 439.794.023	\$ 477.932.676	\$ 462.121.256	\$ 573.666.478	\$ 579.690.923
\$ 72.679.452	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452	\$ 72.679.452
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 382.179.700	\$ 401.631.115	\$ 439.794.023	\$ 477.932.676	\$ 534.800.708	\$ 646.345.930	\$ 652.370.375
\$ 218.038.356	\$ -	\$ -	\$ 218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 436.076.712
\$ -218.038.356	\$ -	\$ -	\$ -218.038.356	\$ -	\$ -	\$ 436.076.712
\$ 164.141.344	\$ 401.631.115	\$ 439.794.023	\$ 259.894.320	\$ 534.800.708	\$ 646.345.930	\$ 1.088.447.087
\$ 61.574.855	\$ -340.056.259	\$ -779.850.282	\$ -1.039.744.602	\$ -1.574.545.310	\$ -2.220.891.240	\$ -3.309.338.327