UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE

“Evaluación técnica y económica de proyectos de metanización de biogás producido a partir de desechos orgánicos.”

MARIO SÁNCHEZ JARAMILLO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: ING. RAFAEL MENA Y.

Julio – 2019

Resumen

La generación de biogás a partir de desechos orgánicos posee un doble beneficio, por un lado, permite obtener una fuente energética y por otro, ayuda a reducir las emisiones de gases a efecto invernadero.

En Chile se han contabilizado 104 plantas de biogás [1] de las cuales solo un 60% está operativa. Se considera que el potencial técnico de biogás en Chile es de 9.750 GWh/año [2]. Por otra parte, las fuentes para generar biogás, es decir, los sustratos, son variados y dispersos, muchos de ellos terminan en vertederos y rellenos sanitarios.

En este contexto, se observa que en la Región Metropolitana existen aproximadamente 67 vertederos ilegales de residuos sólidos (VIRS) [3]. Estos VIRS generan problemas sanitarios y ambientales sobre el entorno. Los desechos alimentarios en descomposición pueden producir metano equivalente a 1899 kgCO_2 por tonelada[4].

Los tipos de sustratos generan diferentes cantidades de metano y requieren distintos tipos de procesos para extraer su máximo potencial. Existen variadas tecnologías de metanización adaptadas a los recursos y cantidades de materia seca en los sustratos.

En un proyecto de generación de biogás, se puede comercializar el biogás o su valorización energética en electricidad y calor, además se pueden obtener recursos de la venta del fertilizante o digestato residual e inclusive de la venta de créditos de carbono.

Como aplicación de este trabajo de investigación, se calcula que en el Mercado Lo Valledor es posible generar una capacidad de 0,84MW eléctricos y 0,86MW térmicos con una fuente de desechos orgánicos de 1500 toneladas por mes.

Abstract

The generation of biogas from organic waste has a double benefit, on the one hand, it allows obtaining an energy source and on the other, it helps to reduce greenhouse gas emissions.

In Chile, 104 biogas plants [1] have been registered, of which only 60% are operational. The biogas technical potential in Chile is 9,750 GWh / year [2]. The sources to generate biogas, i.e., the substrates, are varied and dispersed, many of them end up in illegal or sanitary landfills.

In this context, it is observed that in the Metropolitan Region of Chile there are approximately 67 illegal solid waste landfills (VIRS) [3]. These VIRS generate health and environmental problems on the environment. Decomposing food waste stored in landfills or illegal dumps can produce methane equivalent to 1899 kgCO2 [4].

The types of substrates generate different amounts of methane and require different types of processes to extract their maximum potential. There are various methanization technologies adapted to the resources and amounts of dry matter in the substrates.

In a biogas generation project, it is possible to market biogas or its energy recovery in electricity and heat, in addition, it is also possible to obtain resources from fertilizer's sales or residual digestate and even from trading carbon credits.

As an application of this research work, it is estimated that at Mercado Lo Valledor it is possible to generate a capacity of 0.84MW electric and 0.86MW thermal with a source of organic waste of 1500 tons per month.

Resumen 2
Abstract 3
Índice de Figuras. 8
Índice de Tablas. 10
1. Introducción. 12
1.1 Objetivos. 13
1.1.1 Objetivo general 13
1.1.2 Objetivos específicos 13
2. Marco contextual 14
2.1 Contexto actual del biogás 14
2.2 Descripción general y alcances 16
2.3 Definición de conceptos 16
2.3.1 Los desechos orgánicos 16
2.3.2 La metanización 18
2.3.2.1 Parámetros analizables 19
2.3.3 El biogás 20
2.3.4 El digestato 21
2.3.5 El proceso de generación de biogás 22
2.3.5.1 Etapas de la digestión anaeróbica 22
2.3.5.2 Microorganismos productores de metano 23
3. Estado del arte. 25
3.1 Estado del arte de la generación de biogás 25
3.1.2 Tipología y tecnologías de metanización 25
3.1.2.1 Tipología de los reactores de metanización 25
3.1.2.1.1 Contenido de materia seca 25
3.1.2.1.2 Temperatura 25
3.1.2.1.3 Procesos continuos/discontinuos 26
3.1.2.1.4 Reactores de una o dos etapas 26
3.1.2.2 Tecnologías de metanización 27
3.1.2.2.1 Tecnologías de vía húmeda 27
3.1.2.2.2 Tecnologías de vía seca 27
3.1.3 Valorización del biogás 30
3.1.3.4 Calor 30
3.1.3.5 Electricidad (Cogeneración) 30
3.1.3.6 BioGNV (Gas natural para vehículos) 31

3.1.3.7 Inyección a la red de gas natural 31
3.1.3.8 Purificación del biogás 31
3.1.4 Valorización del digestato 32
3.1.4.1 Fertilizantes 33
3.1.4.2 Compostaje 33
3.2 Estado del arte del tratamiento de desechos orgánicos 34
3.2.1 La gestión de desechos orgánicos 34
3.2.1.1 Problemas asociados 35
3.2.1.1.1 Caso de estudio: Relleno Sanitario Santiago Poniente 35
3.2.1.1.2 Vertederos ilegales 36
3.2.2 Técnicas de colecta y separación 36
3.2.2.1 Técnicas de colecta 36
3.2.2.2 Técnicas de separación 38
3.2.3 Técnicas de valorización 39
3.2.3.1 Recuperación de alimentos para el consumo humano y animal 39
3.2.3.2 Compostaje tradicional 40
3.2.3.4 Metanización 40
3.2.3.5 Gasificación 40
3.2.4 Técnicas de eliminación 40
3.2.4.1 Rellenos sanitarios 40
3.2.4.1.1 Catastro Región Metropolitana 41
3.2.4.2 Incineración 41
4. Potencial teórico 43
4.1 Potencial teórico energético del biogás 43
4.1.1 Requerimientos energéticos 44
4.2 Potencial teórico de producción de metano 44
4.2.1 Otros compuestos presentes en el biogás 47
5. Plantas de biogás 49
5.1 Tipos de plantas de biogás 49
5.1.1 Modelo chino 49
5.1.2 Modelo indio 50
5.1.3 Biodigestor de polietileno 50
5.2 Plantas de biogás en Chile 52
5.2.1 Catastro de plantas 52
5.2.1.1 Ejemplos de plantas de biogás existentes en Chile 54

5.3 Plantas de biogás en Francia 55
5.3.1 Catastro de plantas 55
5.3.1.1 Ejemplos de plantas de biogás existentes en Francia 56
5.4 Levantamiento de la información técnica 56
5.5 Conclusiones 58
6. Emisiones CO_2 58
6.1 Emisiones ligadas a la energía 59
6.2 Emisiones ligadas a los desechos orgánicos 61
6.2.1 Descomposición natural 61
6.2.2 Metanización 61
6.2.3 Compostaje industrial 61
6.2.4 Compostaje doméstico 62
6.3 Emisiones ligadas al transporte 63
6.4 Emisiones CO_2 evitadas 63
6.4.1 Emisiones ligadas al almacenamiento de desechos 63
6.4.2 Emisiones ligadas a la metanización 64
6.4.3 Emisiones ligadas al compostaje 64
6.5 Créditos de carbono 65
6.5.1 Precios créditos de carbono (EUA vs CER) 66
6.5.2 Protocolo de Kioto 67
7. Caso de estudio: Sector la Beaujoire en Francia 69
7.1 Introducción 69
7.2 Cuantificación de desechos orgánicos 69
7.3 Diagnóstico energético 73
7.4 Selección de la tecnología y capacidad 74
7.4.1 Presentación general 74
7.4.2 Dimensionamiento 75
7.4.3 Balance técnico económico 77
7.5 Proceso y componentes 82
7.5.1 Descripción del proceso 82
7.5.2 Valorización de los componentes 84
8. Regulación 85
8.1 Levantamiento de la información 85
8.2 Análisis comparativo: Regulación en Chile y Francia 86

9. Aplicación: Implementación de una planta de metanización de biogás a partir de desechos orgánicos en el Mercado Lo Valledor 87
9.1 Introducción 87
9.2 Cuantificación de los desechos orgánicos 88
9.3 Estimación del potencial metanógeno 89
9.4 Estimación del potencial energético 90
9.5 Estimación de emisiones CO_2 91
9.5.1 Emisiones ligadas al transporte 91
9.5.2 Emisiones ligadas al almacenamiento de desechos 92
9.5.3 Emisiones ligadas a la producción de energía 92
9.6 Selección de la tecnología y capacidad de la planta 93
9.6.1 Tecnología 93
9.6.2 Volumen de los estanques 94
9.6.3 Capacidad de la planta 97
9.6.4 Listado de los componentes 100
9.6.4 Terreno y distancias de seguridad 100
9.7 Balance económico 102
9.7.1 Inversión 102
9.7.2 Ingresos y ahorros 103
9.7.3 Egresos 104
9.7.4 Resultados del flujo de caja 105
9.7.5 Análisis de sensibilidad del proyecto 106
10. Conclusiones 108
11. Bibliografía 109
12. Anexos 113

Índice de Figuras.

Figura 2.1 Porcentajes referenciales de la composición del biogás (desechos orgánicos) y gas natural. 14
Figura 2.2 Porcentajes de las fuentes de generación de electricidad en Chile 2016 [2]. 15
Figura 2.3. Catastro de plantas de biogás 2017 del Ministerio de energía [4]. 15
Figura 2.4 Clasificación de los desechos orgánicos [8]. 18
Figura 2.5 Parámetros analizados en las diferentes matrices en cada una de las etapas del proceso de metanización [9]. 19
Figura 2.6 Esquema general de las etapas de la generación de biogás [10]. 20
Figura 2.7 Digestato sólido producido por el metanizador de BioBeeBox® a base de los desechos orgánicos del mercado de frutas y verduras de Bordeaux, Francia (Fuente elaboración propia). 21
Figura 2.8 Etapas de la digestión anaerobia [11]. 22
Figura 3.1 Esquema simplificado de un reactor de metanización [9]. 27
Figura 3.2 Principio de funcionamiento de procesos de vía seca operados en modo continuo y discontinuo [9]. 28
Figura 3.3 Digestor Dranco® con salida cónica [15]. 29
Figura 3.4 Generación de residuos en Chile en 2015 y 2016 [3]. 34
Figura 3.5 Representación de las etapas que constituyen la prevención y la gestión de desechos [21]. 35
Figura 3.6 Método ilustrativo de separación de basura en Nantes, Francia [26]. 37
Figura 3.7 Esquema típico de un centro de separación [27]. 38
Figura 3.8 Tipos de valorización de bio-desechos [8]. 39
Figura 3.9 Etapa de construcción de un relleno sanitario por la empresa Veolia para el depósito de desechos domiciliarios [30]. 41
Figura 4.1 Producción y consumo eléctrico anual (GWh) en Chile y Francia [2]. 44
Figura 4.2 Potencial metanógeno de diferentes sustratos (m^3 CH_4 por tonelada bruta de materia) **[36]** 46
Figura 5.1 Esquema de modelo de digestor chino [38, 38]. 49
Figura 5.2 Esquema de modelo de digestor indio [38]. 50
Figura 5.3 Esquema de modelo clásico de un biodigestor de polietileno [38]. 50
Figura 5.4 Catastro de plantas de biogás en Chile año 2017 [4]. 52
Figura 5.5 Clasificación de instalaciones de biogás en Chile [4] 53
Figura 5.6. Planta de biogás Fundo El Ánima en Purranque, Osorno [41]. 54
Figura 5.7. Planta de biogás Fundo El Coihue en Puyehue, Osorno [42] 54
Figura 5.8. Planta de biogás Fundo El Maqui en Purranque, Osorno [43] 55
Figura 5.9. Micro-metanizador de hasta 300 t/año de la empresa BioBeeBox® en Bordeaux, Francia. El tamaño es comparable al de un contenedor de barco. 56
Figura 5.10. Componentes biodigestor de polietileno [45]. 57

Figura 6.1. Porcentajes de las fuentes de generación de electricidad en Chile y Francia [2]. 59
Figura 6.2. Emisiones de CO_2 ligadas al consumo de energía eléctrica [2]. 60
Figura 6.3. Principio de funcionamiento de un centro de almacenamiento de desechos [50]. 63
Figura 6.4. Precio de venta de créditos de carbono en Euros (€) [54]. 66
Figura 6.5. Participación en el protocolo de Kioto [55]. 67
Figura 6.6. Participación en la extensión del protocolo de Kioto [55] 67
Figura 7.1. Ubicación de la ciudad de Nantes y Carrefour la Beaujoire (Fuente: elaboración. propia). 69
Figura 7.2. Cartografía de los productores de desechos del sector la Beaujoire y sus cantidades de bio-desechos en toneladas por año (Fuente: elaboración propia). 70
Figura 7.3. Tipología y cantidad de desechos generada por Carrefour Beaujoire en 2017 (Fuente: M. Lionel Egonneau, jefe técnico de Carrefour Beaujoire). 72
Figura 7.4. Cajas de bio-desechos generadas por Carrefour Beaujoire. 72
Figura 7.5. Metanizador Biocube® 40 localizado en Howard Tenens, Inglaterra [56]. 75
Figura 7.6. Payback o ROI (return on investment) de las tres tecnologías consideradas para el escenario 1. 80
Figure 7.7. Payback o ROI (return on investment) de las cuatro tecnologías consideradas para el escenario 2 en mutualización en Carrefour. 80
Figura 7.8. Payback o ROI (return on investment) de las tres tecnologías consideradas para el escenario 3. A la izquierda el RSI de Carrefour y a la derecha Leclerc. 81
Figura 7.9. Payback o ROI (return on investment) de las cuatro tecnologías consideradas para el escenario 4 en mutualización en Carrefour. 81
Figura 7.10. Esquema del proceso de funcionamiento de una unidad de micro-metanización de BioCube 40 construída por Qube Renewables®. 82
Figura 9.1. Vista satélite y panorámica del mercado Lo Valledor (Fuente: elaboración propia. Derechos de autor: Google Maps y El Mercurio). 87
Figura 9.2. Puntos verdes del Mercado Lo Valledor. 88
Figura 9.3. Potencial metanógeno de diferentes sustratos en m^3 de metano por tonelada de materia bruta. 89
Figura 9.4. Distancia aproximada total que recorren los desechos orgánicos desde su punto de generación hasta el lugar de valorización [Fuente: Google Maps]. 91
Figura 9.5. Esquema del proceso (Fuente: elaboración propia) 93
Figura 9.6. Principio de funcionamiento de procesos de vía seca operados en modo continuo [9]. 94
F**igura 9.7.** Tiempo de retención hidráulico según temperatura del biodigestor [39]. 95
Figura 9.8. Proceso de digestión en dos etapas. 96
Figura 9.9. Principio de utilización del calor del cogenerador JMS 320 GS-N.L. 97
Figura 9.10. Especificaciones técnicas del cogenerador JMS 320 GS-B.L. 97
Figura 9.11. Temperatura promedio en Santiago de Chile [58]. 98
Figura 9.12. Potencia eléctrica y térmica durante el año. 99
Figura 9.13. Valor actual neto (VAN) y tasa de descuento. 105

Índice de Tablas.

Tabla 2.1 Clasificación de las bacterias metanogénicas [14] 24
Tabla 3.1 Proceso por vía seca en comparación con la vía húmeda (para una misma cantidad de sustrato)..... 28
Tabla 3.2 Tipologías de VIRS [25]. 36
Tabla 3.3 Catastro de rellenos sanitarios en la región Metropolitana [31]. 41
Tabla 4.1 Contenido medio de los principales compuestos de diferentes biogases producidos a partir de sustratos típicos [37]. 47
Tabla 5.1. Plantas de biogás en Chile según tipo de sustrato y tamaño del proyecto [5]. 53
Tabla 5.2. Plantas de biogás en Chile según tipo de sustrato y modelo de valorización [5]. . 53
Tabla 5.3. Plantas de biogás en Francia según tipo de valorización y tipo de sustrato [44]. . 55
Tabla 5.4. Producción total de biogás en Francia [44]. 56
Tabla 6.1. Potencial de calentamiento global (PCG) y duración de los gases a efecto invernadero (GEI) en la atmósfera según el IPCC [46]. 58
Tabla 6.2. Emisiones de CO_2 por kWh producido por diferentes fuentes de energía [46]. ... 60
Tabla 6.3. Emisiones brutas de metano según el tipo de desechos (equivalente en CO_2) [47]. 61
Tabla 6.4. Emisiones del compostaje industrial [47] 62
Tabla 6.5. Casos de compostaje típicos según la ADEME [48]. 62
Tabla 6.6. Emisiones CO_2 por kilogramo de desechos orgánicos. 62
Tabla 6.7. Emisiones por transporte, los datos unitarios son expresados por una tonelada transportada un kilómetro. 63
Tabla 6.8. Emisiones evitadas ligadas almacenamiento de desechos a través de la valorización del metano [47]. 64
Tabla 6.9. Emisiones evitadas ligadas a la metanización. 64
Tabla 6.10. Emisiones evitadas debido al compostaje relacionadas con la producción sintética o extracción minera de nutrientes. 65
Tabla 6.11. Emisiones evitadas ligadas al compostaje. 65
Tabla 7.1. Recopilación de la cantidad, tipo e implementación de separación de bio-desechos del sector la Beaujoire. 71
Tabla 7.2. Recapitulativo des capacidades y precios de metanizadores de cuatro constructores consultados. 74
Tabla 7.3. Lista de parámetros a definir para el dimensionamiento de una unidad de metanización. 76
Tabla 7.4. Escenarios propuestos para micro-metanización con sus volúmenes correspondientes. 76
Tabla 7.5. Costos y balance considerado en el balance técnico económico de cada uno de los escenarios. 78

Tabla 7.6. Listado de componentes de una unidad de metanización BioQube40 de Qube Renewables®. Valores en libras esterlinas..... 84
Tabla 8.1 Comparación de los tópicos normados en Chile y Francia (Fuente: elaboración propia) 86
Tabla 9.1. Emisiones ligadas al transporte de desechos del Mercado Lo Valledor. 92
T**abla 9.2.** Volumen de trabajo para el diseño de los biodigestores. 95
Tabla 9.3. Requerimientos de gas natural para la planta de metanización..... 99
Tabla 9.4. Listado de componentes requeridos en la unidad de metanización. 100
Tabla 9.5. Distancias mínimas de seguridad entre almacenamientos de biogás y estructuras adyacentes..... 101
Tabla 9.6. Valores referenciales de la inversión 103
Tabl8a 9.7. Valores de los productos del proyecto. (Fuente: www.cne.cl)..... 103
Tabla 9.8. Egresos considerados en el balance económico del proyecto. 104
Tabla 9.9. Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR) del proyecto. 105
Tabla 9.10. Sensibilidad del VAN ante la variación de la producción de biogás. 106
Tabla 9.11. Sensibilidad del VAN ante la variación de los costos de inversión. 106
Tabla 9.12. Sensibilidad del VAN ante la variación de los costos de operación. 106
Tabla 9.13. Sensibilidad del VAN ante la variación del precio de venta de la energía eléctrica. 107

1. Introducción.

El biogás es un combustible [1] con gran potencial como energía renovable. Además de su poder energético, su principal virtud recae en su fuente de generación, es decir, a través de los desechos orgánicos. La utilización del biogás apunta a resolver un problema de carácter contemporáneo; por un lado, contribuye a disminuir las emisiones de gases a efecto invernadero, al problema de la contaminación y los vertederos ilegales, y a su vez aporta a los requerimientos energéticos a nivel local y nacional.

Las variantes que afectan técnica, ambiental y económicamente al proceso de generación de biogás provienen de diversos sectores de la cadena: La logística y el transporte pesado de los desechos, los métodos de valorización del biogás, la valorización del fertilizante residual que se obtiene del proceso, entre otras. Todas estas variables son puntos clave para la implementación de una planta de biogás.

La generación de biogás brinda la oportunidad de gestionar los desechos y generar energía simultáneamente. Actualmente se ha logrado un buen desempeño en el sector agrícola. En consecuencia, el tratamiento de los desechos orgánicos en la industria de la alimentación y los desechos domésticos está en desarrollo. Las pistas de investigación sugieren integrar de el concepto de micro-metanización “in-situ”, es decir, a pequeña escala y en medio urbano, evitando de esta forma, los costos y la contaminación del transporte pesado.

No obstante, para gestionar y valorizar los desechos orgánicos, el biogás no es el único método. Hoy en día es cada vez más frecuente la recuperación de alimentos no comercializables, pero aptos para el consumo humano y/o animal. Otras alternativas de valorización son el compost y los fertilizantes. Es importante analizar las variables que aplican en cada caso, de manera de optar por la mejor opción para la valorización.

Este trabajo expone una visión global de la valorización de los desechos orgánicos, mostrando las diferentes alternativas y enfocándose en la valorización a través del biogás y la implementación de tales proyectos.

1.1 Objetivos.

1.1.1 Objetivo general

En el marco de un proyecto de emprendimiento industrial para Chile y Francia, el presente trabajo de titulación propone el desarrollo de una evaluación técnica y económica para la metanización de biogás producido a partir de desechos orgánicos, principalmente de la industria de los alimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos consideran:

1. Investigar el estado del arte de la tecnología de generación de biogás a partir de desechos orgánicos, verificando el potencial teórico de generación de metano.
2. Realizar un catastro de las plantas de metanización en Chile y Francia, y un levantamiento técnico de las instalaciones.
3. Seleccionar una tecnología y capacidad de una planta, y generar una descripción valorizada del proceso y de los distintos componentes.
4. Realizar un estudio legal y ambiental requerido para el desarrollo de un proyecto en Chile y Francia, y desarrollar un análisis comparativo.
5. Evaluar técnica y económicamente la implementación de la planta de generación de metano a partir de biogás.

2. Marco contextual

2.1 Contexto actual del biogás

El biogás es comparado intuitivamente con el gas natural (**Figura 2.1**), sin embargo, el biogás presenta una composición de normalmente 60% de metano (gas combustible) y 40% de otros gases (CO_2, H_2O, Nitrógeno...) por lo que no es posible inyectar el biogás a la red de gas natural sin antes realizar un proceso de purificación y compresión. Este proceso da origen al biometano, que cuenta con hasta un 99% de metano y es compatible con el gas natural facultando su inyección a la red.

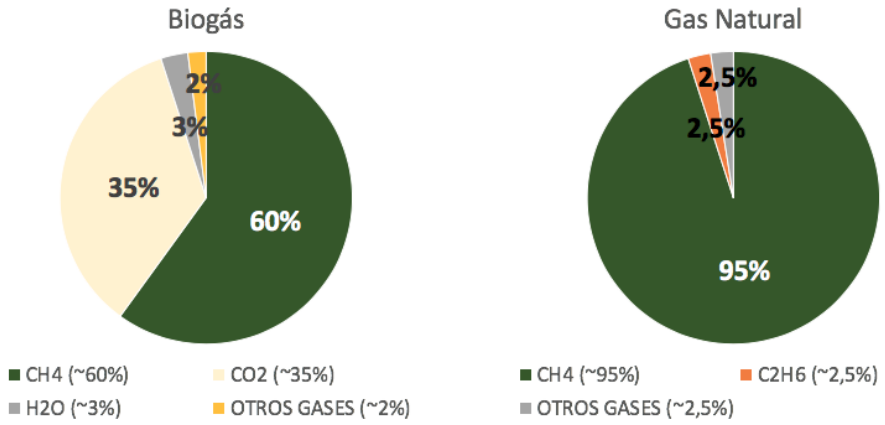


Figura 2.1 *Porcentajes referenciales de la composición del biogás (desechos orgánicos) y gas natural.*

Además de la purificación, otro medio de valorización del biogás es la cogeneración, es decir, la generación de electricidad y calor. Este es uno de los métodos más utilizados para valorizar el biogás, ya que genera una buena rentabilidad permitiendo recuperar el calor y contribuyendo a los requerimientos de electricidad en la zona de cogeneración. En Chile, la generación de electricidad proviene principalmente de fuentes de combustibles fósiles (**Figura 2.2**).

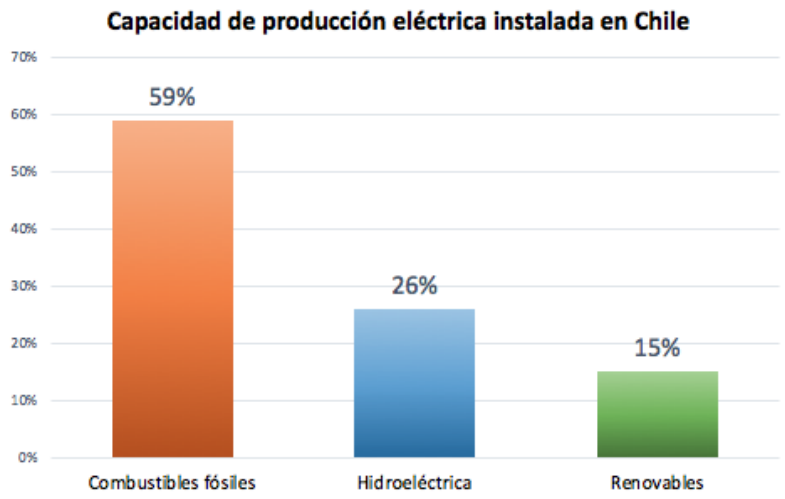


Figura 2.2 *Porcentajes de las fuentes de generación de electricidad en Chile 2016 [2].*

La capacidad total de generación eléctrica en Chile es de 24,53 GW [2], de la cual un 59% proviene de una fuente no renovable (**Figura 2.2**). Por otro lado, los residuos municipales e industriales, muchos de los cuales pueden ser potencialmente transformados en biogás, ascienden a 20 millones de toneladas en 2016 [3]. En esta línea, la visión del país es llegar a un 60% de utilización de energías renovables para el año 2035 [4].

A nivel nacional, el desarrollo de las plantas de biogás se concentra en el sector agrícola y en las plantas de tratamiento de aguas servidas [4]. La cantidad de plantas de biogás asciende a 104 en 2017, de las cuales solo un 60 % está activa. Las principales zonas de desarrollo del biogás son en el centro y sur de Chile (**Figura 2.3**).

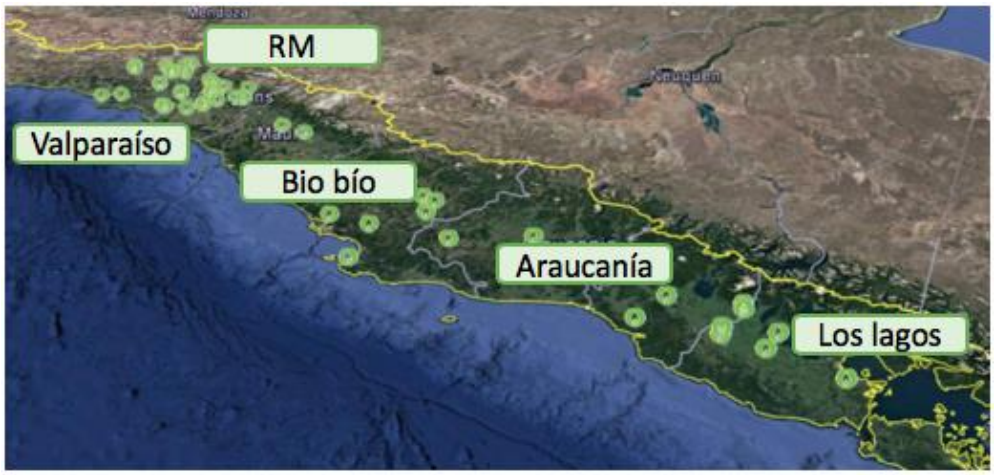


Figura 2.3. *Catastro de plantas de biogás 2017 del Ministerio de energía [4].*

La capacidad de generación de biogás en Chile actualmente se desconoce [5]. Sin embargo, en la sección 5.2 se presenta una estimación de la capacidad mínima de generación de biogás a través de la información recopilada. Posteriormente se presenta una comparación de la actualidad energética en Chile y en Francia, con el objetivo de observar el contexto chileno desde una perspectiva internacional.

2.2 Descripción general y alcances

El propósito de este trabajo es proponer una metodología para realizar de manera simple y efectiva, el estudio técnico-económico de proyectos que involucren desechos orgánicos, o "bio-desechos", y la generación de biogás a través de la metanización, particularmente en la industria de la alimentación.
Para lograr este objetivo, primero se definen los conceptos necesarios para comprender el marco contextual. A su vez, se recopila información acerca del estado del arte de la metanización y el tratamiento de los desechos orgánicos. Posteriormente se analizan distintos proyectos, se determinan sus características generales, procesos y se describen sus distintos componentes. Finalmente se realiza una aplicación de la información recopilada, se evalúa técnica y económicamente la implantación de una planta de metanización de biogás a partir de desechos orgánicos.
Las principales fuentes bibliográficas de este trabajo son estudios llevados a cabo en Francia y publicados por la ADEME (Agencia del medio ambiente y de la energía, por sus siglas en francés) y proyectos realizados en Chile, publicados por el Ministerio de energía, memoristas y tesistas que han investigado y recopilado información.

2.3 Definición de conceptos

2.3.1 Los desechos orgánicos

Los desechos orgánicos son la materia prima para la generación de biogás, por lo cual es importante comprender qué son, dónde y cómo son producidos, y de qué forma son tratados. Para responder a estas preguntas es necesario conocer el contexto en el que los desechos o residuos son definidos y clasificados.
La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define como "residuo" a "aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en el que son producidas" [6]
Los residuos poseen diferentes, orígenes, composiciones fisicoquímicas, toxicidades y naturaleza. Estos parámetros facultan su clasificación, permitiendo así conocer cuáles pueden ser revalorizados.
A continuación, se presenta la clasificación general y definición de desechos en base a sus propiedades fisicoquímicas. Posteriormente la clasificación de los desechos orgánicos.

I. Clasificación de desechos según su naturaleza fisicoquímica

La clasificación de los desechos según su naturaleza fisicoquímica permite identificarlos en función de su capacidad de ser valorizados, si son inertes, su peligrosidad y también en sus propiedades de biodegradabilidad. Estos se reagrupan en 5 categorías.

1. **Desechos inertes:** desechos que, con el transcurso del tiempo, no presentan modificaciones físicas, químicas o biológicas importantes. No se descomponen, no se queman ni producen ninguna reacción física o química. No son de ninguna forma propensas a producir contaminación ambiental o de dañar la salud humana [7]. Se componen de materias minerales y provienen principalmente de trabajos públicos, edificios y construcciones.

2. **Desechos banales:** desechos municipales o industriales que pueden ser valorizados por reciclaje, fermentación o por acción térmica con recuperación de energía. Estos no son tóxicos ni peligrosos, pero pueden originar contaminación si no son gestionados de manera controlada.
3. **Desechos tóxicos o peligrosos:** reagrupa los desechos industriales y domésticos especiales. Entre ellos están los desechos inflamables, radioactivos, ciertos tipos de desechos biológico, etc. Estos son tratados independientemente de otros desechos según sus características y su composición.
4. **Desechos finales:** desechos que no son valorizables, ni por reciclaje, ni por valorización energética bajo las condiciones técnicas y económicas del momento.
5. **Desechos orgánicos o bio-desechos:** Todo desecho no peligroso biodegradable de jardín o parque, todo desecho no peligroso alimentario o de cocina proveniente de particulares, restaurantes, supermercados, cantinas, etc., así como todo desecho comparable proveniente de establecimientos de producción o transformación de productos alimentarios [7].

II. Clasificación de los bio-desechos.

Los bio-desechos pueden ser clasificados según su procedencia, la cual puede ser de desechos industriales, agrícolas o domésticos o de comunidades.

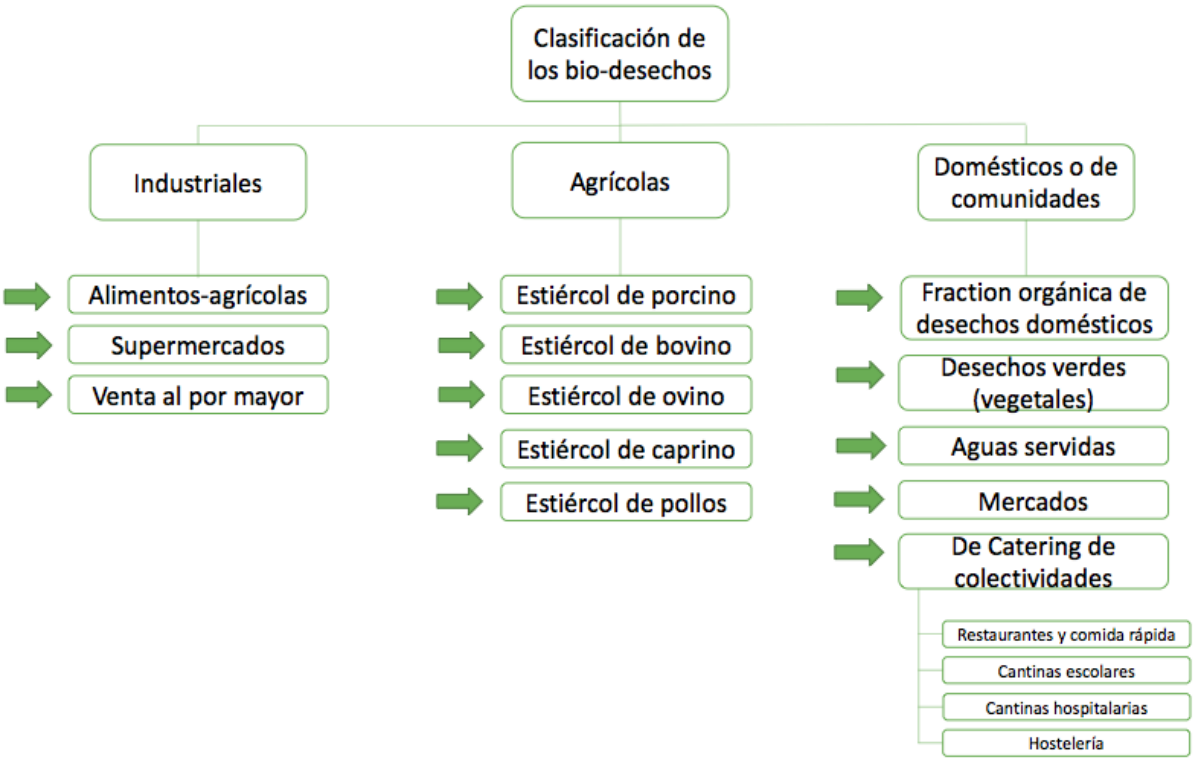


Figura 2.4 *Clasificación de los desechos orgánicos [8].*

2.3.2 La metanización

La metanización es la digestión o fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno bajo la acción combinada de distintos tipos de microorganismos. Estos microorganismos están presentes naturalmente en este tipo de procesos. Por ejemplo, para la producción de biogás a partir de estiércol bovino, son las mismas bacterias presentes en el estiércol las que producen el biogás a través del proceso de metanización.

2.3.2.1 Parámetros analizables

La metanización es, en palabras simples, el proceso en el cual los desechos orgánicos se transforman en biogás. Este proceso puede ser analizado en distintos parámetros (**Figura 2.5**), otorgando la posibilidad de mejorar el rendimiento de los procesos y la producción de biogás.

Figura 2.5 *Parámetros analizados en las diferentes matrices en cada una de las etapas del proceso de metanización [9].*

2.3.3 El biogás

El biogás es un gas combustible producto de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso se conoce como digestión anaerobia o metanización y es realizado por distintos tipos de bacterias. El biogás está compuesto por un 50-80% de metano (CH4) y entre un 20 y 45% de dióxido de carbono (CO2) además de otros gases en menor cantidad como amoniaco o sulfuro de hidrógeno.

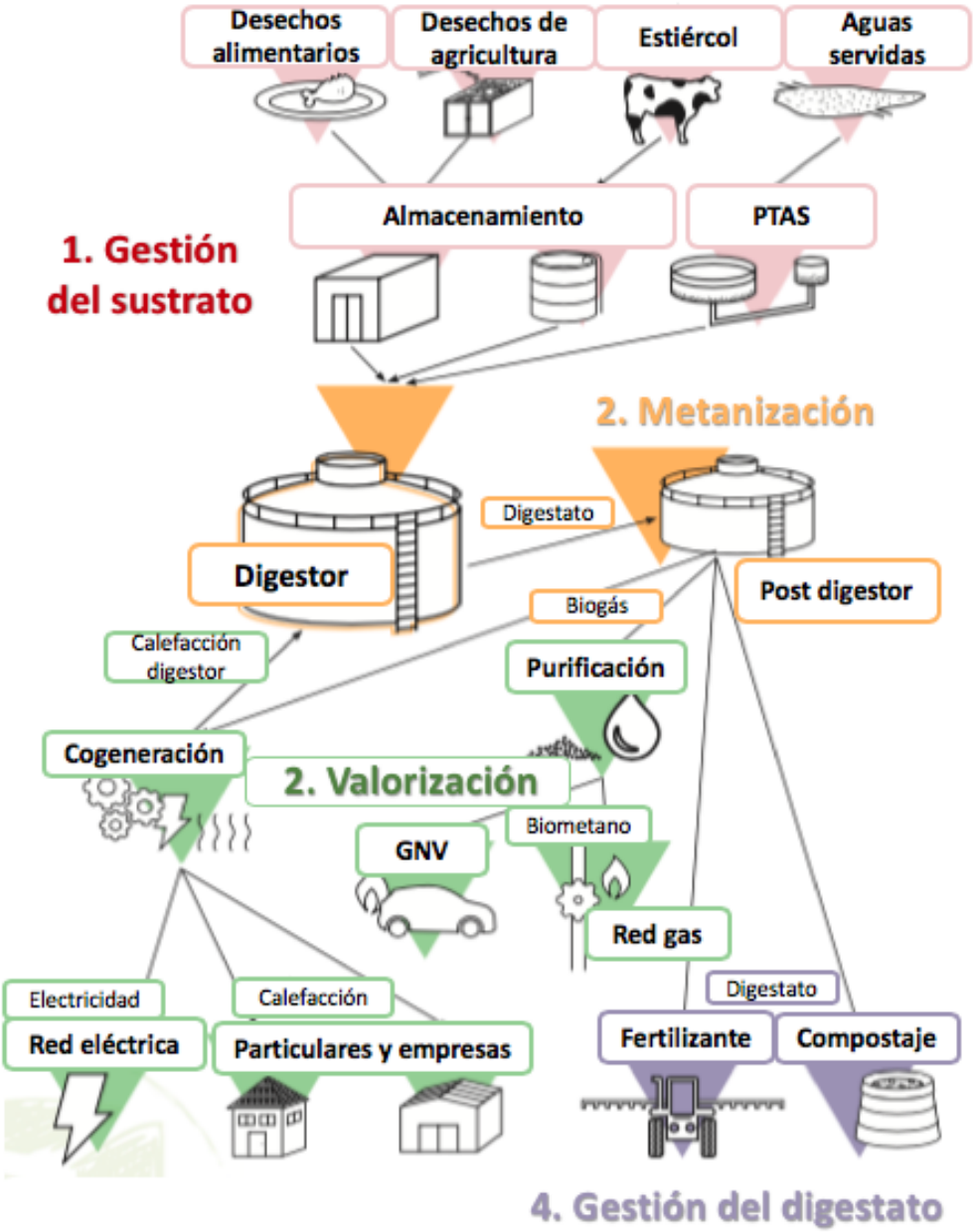


Figura 2.6 *Esquema general de las etapas de la generación de biogás [10].*

La producción de biogás constituye el principal parámetro de seguimiento de un metanizador. La medida del flujo, asociada a las medidas de la temperatura y de la presión del biogás, permite calcular el volumen normalizado del biogás producido. Estas medidas son generalmente realizadas *in situ*, con la ayuda de sensores especiales (flujómetros, másicos, volumétricos, o

manométricos, termocuplas, manómetro...), instaladas en las tuberías de colecta de biogás. Ellas permiten calcular los rendimientos de producción de biogás, en función de la cantidad de sustrato fresco o seco, de materia orgánica entrante o degradada. Estos rendimientos dependen de la naturaleza del sustrato (de sus potenciales de biogás), y condiciones de operación (tiempo de permanencia hidráulica, carga volumétrica aplicada).
Una aumentación de la producción de biogás resulta generalmente de una aumentación de la carga orgánica, y puede provenir en parte por el crecimiento de la actividad biológica. Esta puede tener origen en los fenómenos puramente químicos de conversión de carbonatos en dióxido de carbono debido a la acidificación del medio. Contrariamente, una caída del flujo de biogás puede tener múltiples causas: disminución de la carga orgánica, inhibición, carencia, toxicidad, etc. El monitoreo de sólo el parámetro de biogás no permite diagnosticar con exactitud una disfunción, pero constituye un indicador imprescindible para una estrategia de gestión basada en el monitoreo de otros parámetros complementarios, tales como la carga orgánica, la alcalinidad, la concentración de AGV y la composición del biogás.

2.3.4 El digestato

El digestato es el subproducto semi-líquido resultante de la digestión anaerobia y tiene un uso potencial como fertilizante orgánico. El digestato puede aplicarse de forma directa, o previa separación en dos fracciones, sólida y líquida.

Figura 2.7 *Digestato sólido producido por el metanizador de BioBeeBox® a base de los desechos orgánicos del mercado de frutas y verduras de Bordeaux, Francia (Fuente elaboración propia).*

2.3.5 El proceso de generación de biogás

2.3.5.1 Etapas de la digestión anaeróbica

La materia orgánica, en ausencia de oxígeno molecular, nitratos y sulfatos, es convertida en metano y dióxido de carbono por la combinación de la actividad de cinco diferentes grupos de microorganismos.
En el proceso intervienen microorganismos facultativos y anaerobios estrictos. En el siguiente esquema (**Figura 2.8**) se describe en forma general las tres grandes etapas de hidrólisis, acidogénesis de las grandes moléculas a las moléculas más simples y luego a metano y CO2 en la metanogénesis [11].
Durante los procesos de fermentación anaerobia cerca del 95% del carbono presente en el sustrato se convierte en biogás y solo el 5% en biomasa, mientras que en el proceso aerobio cerca del 50% del carbono contenido en el sustrato se convierte en CO2 y el otro 50% en biomasa.
En el proceso anaerobio, casi el 90% de la energía que existe en el sustrato original se transforma en biogás perdiéndose solo el 7% de la energía inicial como el calor de la reacción En cambio en el proceso aerobio cerca del 60% de la energía presente en el sustrato se consume en la producción de nuevas células, y el 40% restante se pierde como calor de reacción [11].

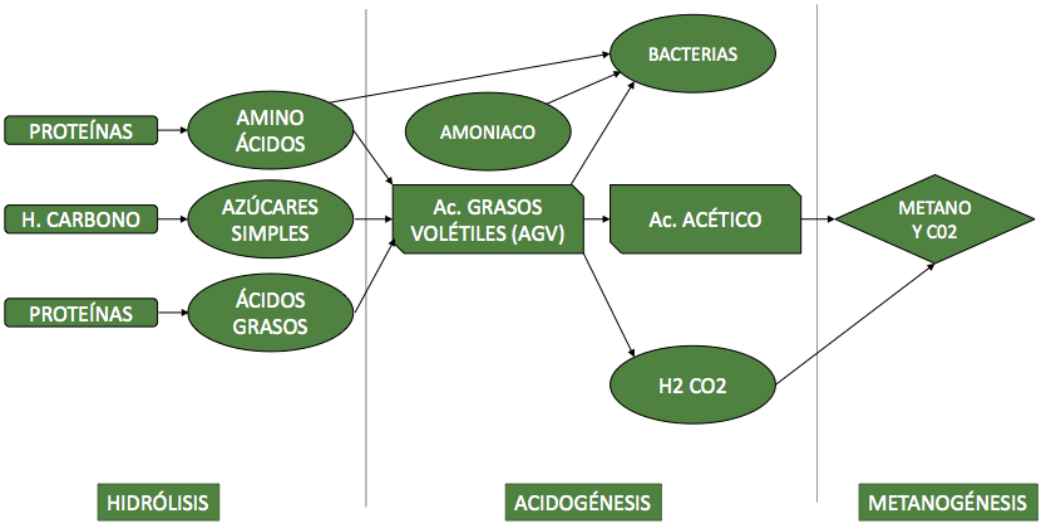


Figura 2.8 *Etapas de la digestión anaerobia [11].*

En general, las bacterias son incapaces de alimentarse de material orgánico particulado, por lo tanto, los biopolímeros como proteínas, carbohidratos y lípidos son inicialmente hidrolizados por enzimas extracelulares a compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos.
Estos a su vez, son utilizados como sustrato por organismos fermentadores que los transforman en acetato, hidrógeno, biomasa y productos intermedios como propionato y butirato. Estos últimos son degradados a acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocidas como OHPA o bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno, por sus siglas en inglés.
En la digestión anaerobia la mayoría de las bacterias son no metanógenas y tienen una gran importancia en el proceso anaerobio ya que las bacterias productoras de biogás no pueden

aprovechar directamente los compuestos orgánicos a no ser que estos hayan sido degradados y convertidos a compuestos más sencillos, de menor peso molecular por la acción de bacterias "no metanogénicas" [11].

Las bacterias metanógenas se dividen en dos grupos tróficos [12]:

a. Bacterias metanogénicas hidrogenofílicas, que utilizan el hidrógeno producido para reducir el CO_2 en CH_4.

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$$

b. Bacterias metanogénicas acetoclásticas, que transforman el acetato en CH_4. Esta vía de transformación contribuye en un 70% la producción de metano en los digestores.

$$CO_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$$

2.3.5.2 Microorganismos productores de metano

Son el grupo más importante de bacterias en la producción de biogás, aunque se encuentran en menor cantidad que las "no metanogénicas", se caracterizan por ser muy sensibles al oxígeno y los ácidos. En consecuencia, solo pueden usar como sustrato compuestos orgánicos e inorgánicos sencillos ya digeridos o metabolizados por otras bacterias hidrolíticas y acidogénicas. El crecimiento y reproducción de las bacterias metanogénicas es muy lento, y solo pueden doblar su población en periodos de 5 a 7 días, lo que se diferencia bastante a la media hora que que aproximadamente requieren las bacterias aerobias. El estudio del comportamiento biológico de las bacterias metanogénicas a avanzado lento dada la complejidad de aislarlas y conservarlas en medio anaerobio a nivel de laboratorio. Hasta el momento, se han podido aislar cerca de 25 cepas puras de bacterias anaerobias mediante estudios biológicos en laboratorios especializados. También hay microorganismos anaerobios termófilos que han sido aislados de los digestores anaerobios, y que pueden tener una aplicación práctica por operar en un rango específico de temperatura entre 50 y 75 ºC, estos microorganismos actúan en un pH neutro y son por lo general metanobacterias y eubacterias que utilizan sustratos [13] como azúcares (acetobacterium faecalis) o actúan sobre la mezcla hidrógeno anhídrido carbónico (methanobacterium thermoautotrophicum). Una característica importante de este grupo bacteriano que ha sido comprobada a escala real es la capacidad que presentan estos metanógenos en mantenerse activos luego de largos períodos de tiempo en ausencia de sustrato.

Tabla 2.1 *Clasificación de las bacterias metanogénicas [14]*

Orden	Familia	Género	Especie
Methanobacteriates	Methanobacteriaceae Methanothermaceae	Methanobacterium Methanobrevibacter Methanospera Methanothermus	Methanoformicium Methanobacterium sp. Methanothermoautotrophic Methanotumiantium Methanoarboriphilus Methanosmithil
Methanococales	Methanococcaceae Methanocaldaceae	Methanocoecus Methanothermococcus Methanocaldococcus	Methanococcus vannielli Methanovoltae
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae Methanocurpusculacea e Methanospirillaceae	Methanogenium Methanospiellum Methanomicrobium Methanoplanus	Methanocaraci Methanomarispigri Methanohongatei Methanomobile Methanospitullum hungatei
Methanosarcinales	Methamisarcinaceae Methanosaetaceae	Methanosarcina Methanohalopillus Methanosaeta	Methanosarcina barkeri
Methanopyrales	Methanopyraceae	Methanopyrus	

3. Estado del arte.

3.1 Estado del arte de la generación de biogás

3.1.2 Tipología y tecnologías de metanización

3.1.2.1 Tipología de los reactores de metanización

3.1.2.1.1 Contenido de materia seca

El contenido de agua en los digestores es un aspecto importante para la implementación del proceso de digestión anaeróbica. Existen dos tipos de tecnologías definidas por el contenido de materia seca (MS) presente en el medio reactivo:

- La digestión anaerobia por vía húmeda (<15% MS).
- La digestión anaerobia por vía seca (>15% MS).

La tecnología por vía húmeda está más adaptada a sustratos orgánicos con bajo contenido de materia seca directamente compatible con las condiciones de operación como los lodos de aguas servidas o ciertos desechos industriales. Sin embargo, otras biomasas más secas pueden igualmente ser tratadas con este tipo de proceso, pero necesitan una dilución de los sustratos. Esta operación es generalmente efectuada a través de una bomba y requiere una recirculación de la parte líquida del digestato, así como el aporte de agua fresca.
Para este tipo de sustrato más seco, la metanización por vía seca está más adaptada ya que permite limitar el aporte de líquido a los entrantes. Así, gracias a una menor dilución de los entrantes, la digestión anaerobia por vía seca permite una disminución de las necesidades de agua, de energía y del tamaño de las instalaciones (por una misma cantidad de sustrato) en comparación con la vía húmeda. Sin embargo, la digestión por vía húmeda posee un nivel de madurez superior.

3.1.2.1.2 Temperatura

Existen dos modos principales para la digestión anaerobia en relación con la temperatura: el modo mesófilo (35°C - 40°C) y el modo termófilo (~ 55°C). La implementación de condiciones termófilas necesita de un aporte de calor superior para calentar el digestor. En sistemas intensivos, una parte del calor producido de la cogeneración del biogás es utilizada con este objetivo. De un punto de vista global, las cinéticas microbianas, y particularmente la hidrólisis, pasan más rápidamente a termofilia, lo que representa una ventaja en términos de dimensionamiento de la instalación. No obstante, los digestores anaerobios pueden sufrir de problemas de estabilidad y de robustez relacionado con la presencia de nitrógeno amoniacal en el medio reactivo. En efecto, a una temperatura más elevada, el nitrógeno libre NH_3 inhibidor de la reacción biológica es favorecido por el amoniaco NH_4^+. Así, la selección de la temperatura de funcionamiento es un compromiso técnico-económico que depende del tipo de sustrato tratado, del tipo de proceso y del modelo global de valorización [9].

3.1.2.1.3 Procesos continuos/discontinuos

En el proceso continuo, el digestor es cargado diariamente de materia fresca y en consecuencia, la materia degradada es retirada. Este sistema induce una producción de biogás regular y relativamente constante desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo. Este modo de funcionamiento permite una automatización de la gestión de alimentación ayudada por la bomba.

En el proceso discontinuo, el digestor es cargado de materia y luego cerrado herméticamente por la duración del funcionamiento en curso en la cual la materia se degrada. Después de esta fase, el reactor es vaciado y para iniciar otro ciclo de digestión. Este tipo de alimentación necesita de un trabajo de mantención importante para la iniciación del ciclo. Además, el flujo de biogás producido e igualmente su composición, evolucionan en el transcurso del tiempo con la degradación del sustrato. Incluso si varios reactores desfasados en el tiempo son puestos en marcha en paralelo, el flujo de biogás no es estable, lo que puede causar problemas técnicos para la valorización del biogás. Por otra parte, durante las fases de alimentación, el biogás producido se mezcla con aire e importantes concentraciones de N_2 pueden ser encontradas en el biogás producido en la unidad de metanización, lo que afecta su valorización [9]. El modo de funcionamiento continuo requiere igualmente una inoculación adecuada en microorganismos anaerobios al comienzo del ciclo. Este tipo de funcionamiento puede ser recomendado en unidades de metanización de pequeño tamaño, o cuando la alimentación del sustrato es difícil de automatizar (problema de bombeo).

3.1.2.1.4 Reactores de una o dos etapas

En el reactor de una etapa todas las reacciones biológicas implicadas en la digestión anaerobia se hacen en el mismo reactor (**Figura 3.1**). En esta configuración, las condiciones de operación son optimizadas en relación con la etapa de metanogénesis que es la más sensible.
El principio del enfoque en dos etapas (**Figura 3.1**) es de separar el esquema reactivo de la digestión anaerobia en dos reactores físicamente separados, con el fin de optimizar cada compartimiento. En el primer reactor las fases de hidrólisis y acidogénesis tienen lugar donde la materia orgánica es separada en monómeros, AGV (ácidos grasos volátiles), H_2, CO_2. Este primer compartimiento es dispuesto en serie con un segundo reactor, en el cual se realiza la acetogénesis y la metanogénesis. Para implementar un digestor que transforma los desechos en dos etapas, son necesarias condiciones fisicoquímicas particulares en el reactor de hidrólisis y de acidogénesis:

- Limitar el tiempo de permanencia a unos pocos días (tiempo corto pero suficiente para la hidrólisis)
- Aumenta el PH de 5,5 a 6,0.

El segundo reactor trata los AGV producidos en el primer reactor y la parte de los sustratos más difíciles de bio-degradar. Para limitar las inhibiciones potenciales con los AGV y prolongar la degradación del sustrato, el volumen del segundo digestor y el tiempo de permanencia asociado son más grandes que en el primer reactor.

De manera general, un sistema de dos etapas presenta una ventaja cuando el sustrato a tratar es muy fermentable y es metabolizado rápidamente por microorganismos (sustratos ricos en azúcares y compuestos solubles) en AGV, en este caso la utilización de una primera etapa permite proteger el reactor de metanización de una acidificación ligada a la acumulación de estos compuestos inhibidores. Gracias a la optimización de la hidrólisis en la primera etapa, un sistema de “bi-etapa” puede permitir el aumento de las cinéticas y la performance global del

sistema. Finalmente, adicionando el H_2 y el CH_4 producidos en el primer y el segundo reactor respectivamente, este tipo de instalación puede permitir la producción de un vector energético, el hitano (hidrógeno + metano) compuesto de 5 a 20% de hidrógeno y que puede presentar rendimientos de combustión superiores al del metano solo [9].

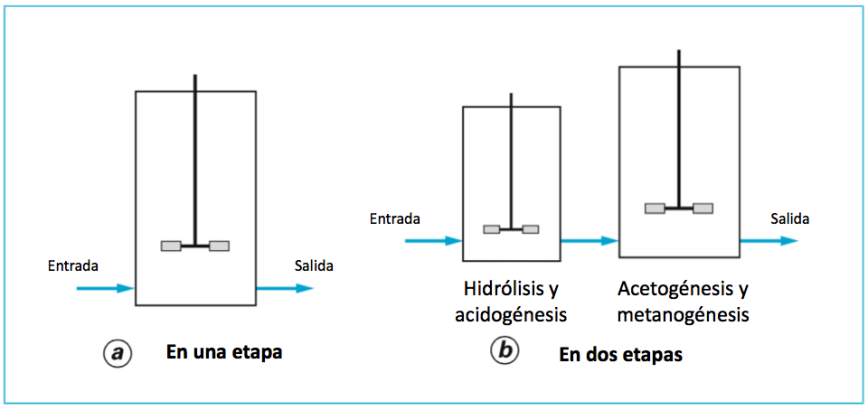


Figura 3.1 *Esquema simplificado de un reactor de metanización [9].*

3.1.2.2 Tecnologías de metanización

3.1.2.2.1 Tecnologías de vía húmeda

Esas tecnologías poseen principalmente un modo de funcionamiento continuo. El sustrato fresco o diluido es incorporado automáticamente en el digestor. Según los sustratos, una etapa de trituración/molienda es necesaria con el fin de reducir la granulometría de la biomasa y extraer los componentes indeseados. En efecto, en el reactor, una separación física de sólidos puede tener lugar con la aparición de una capa flotante en la parte alta de a instalación y una sedimentación de las fracciones más densas. Existen algunas soluciones tecnológicas generalmente implementadas para extraer estos compuestos. Estos digestores, dichos completamente mezclados, pueden ser agitados según dos estrategias:

1. **Agitación mecánica** por aspas situadas en el eje vertical central y/o hélices situadas en la periferia del digestor. Este tipo de mezcla requiere, sin embargo, una buena preparación del sustrato con el fin de eliminar los objetos que pudieran dañar las partes móviles.
2. **Agitación por inyección forzada de biogás:** el biogás es inyectado en un colector central. La diferencia de densidad al interior del tubo resulta de la mezcla del medio reactivo. La agitación por el biogás puede igualmente ser completada por una recirculación externa del medio reactivo utilizando bombas. En consecuencia, la agitación no es inducida por ninguna parte móvil al interior del digestor.

3.1.2.2.2 Tecnologías de vía seca

Este tipo de tecnología es principalmente adaptada por los sustratos que poseen grandes contenidos de sólidos. La **Tabla 3.1** muestra las principales ventajas y desventajas de este proceso en comparación con la vía húmeda.

Tabla 3.1 *Proceso por vía seca en comparación con la vía húmeda (para una misma cantidad de sustrato).*

Vía seca	Ventajas	Desventajas
Tecnología	Pocas partes móviles. Proceso robusto. Poca separación de fase.	Inadaptados a los líquidos. Baja automatización.
Reacción biológica	Gran carga	Débil contacto sustrato / microorganismos. Concentración de compuestos inhibidores. Cinéticas lentas.
Económico y ambiental	Pre-tratamientos del sustrato simplificado. Separación del digestato simplificada. Bajo consumo de agua. Bajo volumen del digestor. Calefacción reducida.	Necesidad de equipos robustos. Mano de obra requerida (modo discontinuo)

Las tecnologías de digestión anaeróbica por vía seca son variadas. Sin embargo, los procesos de una etapa son los más utilizados, mientras que la configuración (modo continuo o discontinuo) y el modo de mezcla son los parámetros más discriminantes tecnológicamente. La **Figura 3.2** presenta los modos de funcionamiento continuo y discontinuo.

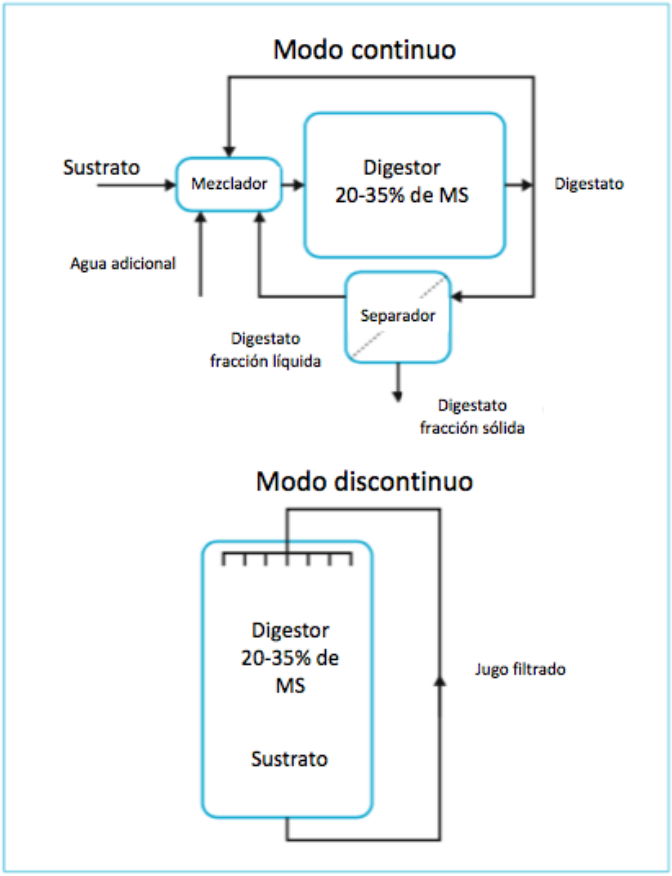


Figura 3.2 *Principio de funcionamiento de procesos de vía seca operados en modo continuo y discontinuo [9].*

Procesos continuos

Contrariamente a los procesos discontinuos, los procesos continuos tienen como principal objetivo la automatización de las instalaciones y la optimización de los rendimientos. Este modo de funcionamiento es particularmente adaptado a grandes unidades y a sido históricamente desarrollado para el tratamiento de desechos de colectividades domésticas. Por su funcionamiento y desarrollo, estas instalaciones se basan en la experiencia obtenida de los digestores anaerobios líquidos en modo continuo, pero necesitan, sin embargo, varias adaptaciones. Los ciclos de alimentación/salida no son realizados continuamente, pero se producen a intervalos regulares (una o varias introducciones por día). El punto en común entre todas las tecnologías recae en una configuración teórica de tipo pistón. Por definición, la configuración de tipo pistón induce una débil mezcla en el digestor durante la progresión del digestato. Una parte del digestato líquido obtenido del post tratamiento de los digestatos es reciclado y mezclado con el desecho fresco para disminuir la cantidad de materia seca si es necesario. Además, el digestato puede ser igualmente reintroducido a la cabeza de la instalación con el fin de aportar el inoculum microbiano y de obtener una consistencia adecuada de la materia entrante antes de su introducción en el digestor.

Desde un punto de vista tecnológico, los procesos continuos son dominados por tres procesos industriales: Kompogas®, Dranco® y Valorga®. Estas tres tecnologías se diferencian principalmente por el modo de mezcla. El proceso Kompogas® es un reactor horizontal principalmente mezclado gracias a la presencia de una agitación mecánica. El medio progresa en el digestor por la acción combinada de un mezclador y de la alimentación de sustrato. El proceso Dranco® (**Figura 3.3**) utiliza la gravedad y una fuerte recirculación de los digestatos para hacer progresar el medio en el reactor cilíndrico vertical. La alimentación es realizada por la altura del digestor. El proceso Valorga® es un proceso que tiene la particularidad de una implementación de circulación del medio por inyección de biogás bajo presión induciendo una agitación vertical y una circulación horizontal del medio reactivo.

Figura 3.3 *Digestor Dranco® con salida cónica [15].*

Procesos discontinuos

Los procesos de metanización discontinuos (también llamados "batch") se han desarrollado históricamente desde el conocimiento, a partir de centros de almacenamiento y depósitos de desechos domésticos. En estos procesos, la materia es introducida en un recinto hermético donde ocurre la biodegradación. Este tipo de funcionamiento no permite un control final de la reacción biológica. Una recirculación de jugos de filtración a menudo es empleada para controlar la reacción biológica (temperatura, inoculación, humidificación del sustrato). Para ciertos procesos, una parte del digestor queda sumergida en el jugo de filtración. El funcionamiento discontinuo es el modo preferido para los digestores en donde la inversión es reducida, existe una baja instrumentación y un bajo nivel de formación de los operadores. Los digestores son de esta forma cargados y sellados durante varias semanas, durante las cuales uno o varios reactores son alimentados. La limitación principal de los digestores discontinuos reside en los ciclos de carga/descarga que son realizados manualmente. Estas operaciones requieren el uso de maquinaria agrícola o de construcción y la abertura regular de los digestores. Estos procesos son preferidos en el medio agrícola o en las zonas de baja densidad industrial o urbana. Varias tecnologías de digestores discontinuos han sido desarrolladas para la metanización seca: Biocel®, SEBAC®, APS®, Bioconverter®, Bioferm®, Methajade®, Eribox®...

3.1.3 Valorización del biogás

Diferentes vías de valorización del biogás son posibles: generación de calor, cogeneración (electricidad y calor), combustible automóvil, inyección a la red de gas natural. La elección de la mejor opción depende fuertemente de los criterios económicos y técnicos relacionados con la calidad del biogás producido, el tamaño de las unidades de metanización, su localización geográfica y logística, pero igualmente a las políticas e incentivos de compra y venta de energía.

3.1.3.4 Calor

La valorización del biogás en forma de calor producido por combustión en caldera es una de las formas más antiguas y simples de implementar. Los quemadores pueden aceptar un gas de baja cantidad de metano, del orden de 20%. Además, las desventajas de la purificación del biogás pueden ser relativamente simplificadas en relación con las otras vías de valorización. La principal problemática está ligada a la presencia de vapor de agua y de sulfuro de hidrógeno que conducen a un riesgo de corrosión. La presencia de estos compuestos hace necesaria la protección o adaptación de ciertos elementos de instalación (tuberías, quemadores, compresores, etc.). Existen tecnologías de deshidratación y desulfuración de biogás que pueden ser instaladas a la salida del metanizador. Además de su utilización directa para el calentamiento del digestor, la energía térmica puede ser utilizada directamente en el sitio de producción para aumentar la concentración de los digestatos producidos (secado de residuos líquidos, deshidratación de lixiviados, etc.) o también exportada localmente para usos agrícolas, industriales o domésticos.

3.1.3.5 Electricidad (Cogeneración)

Después de una etapa de purificación, el biogás es enviado a una unidad de cogeneración constituida de motores a combustión o de turbinas a gas, con el objetivo de producir simultáneamente electricidad y calor. La elección del sistema de cogeneración depende principalmente de criterios técnicos ligados a la calidad del biogás producido (porcentaje de

metano en la composición, presencia de compuestos indeseados, variabilidad temporal de la composición del flujo de biogás, etc.) y de criterios económicos (tamaño de las instalaciones, tarifas de venta de la electricidad generada, costo del funcionamiento y de la mantención del cogenerador). Desde un punto de vista global, el rendimiento eléctrico está entre el 30 y 45% (rendimiento global de 70 a 85%), y la electricidad producida es a menudo entregada a la red de distribución eléctrica externa. A modo de ejemplo, en Francia, en 2016, 317 unidades de metanización que producen biogás a partir de residuos agrícolas, de desechos industriales o de colectividades, están conectados a la red pública de electricidad por una potencia de 123 MW [16].

3.1.3.6 BioGNV (Gas natural para vehículos)

La producción de gas natural para vehículos (GNV) a partir de biogás es posible hoy en día. El biometano combustible es utilizado localmente en forma comprimida (GNC) o licuada (GNL). El GNC es almacenado en forma de gas comprimido a 200 bar, y es apto para el transporte urbano, los vehículos poseen una autonomía de hasta 300 km. El GNL es obtenido luego de un enfriamiento a -161 °C y permite el almacenamiento de una gran cantidad de energía y una autonomía que puede llegar a los 1000 km.

En Francia a fines de febrero del 2016, 9 estaciones de GNV disponen de biometano combustible [9]. Este combustible es utilizado principalmente por las colectividades o empresas para abastecer su flota de vehículos pesados como camiones de basura o buses interurbanos. Sin embargo, en comparación con las vías de valorización mencionadas anteriormente, la utilización de BioGNV en los motores para vehículos necesita de una purificación más potente del biogás (deshidratación, desulfuración, descarbonización). Comparado a los vehículos de motor a gasolina o diésel, la utilización de biometano en los vehículos permite reducir las emisiones contaminantes (partículas finas, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno).

3.1.3.7 Inyección a la red de gas natural

La inyección de biometano a a red de gas natural está autorizada en Francia desde el 2010 [9]. En Chile aún no se implementa este sistema para uso público, sin embargo, el proyecto Biofactoria de Aguas Andinas prevé producir e inyectar biometano a la red de gas natural de Santiago, mediante la implementación de una instalación que permite la remoción de ácido sulfhídrico (H2S), de la fracción de dióxido de carbono (CO2) y otros residuos existentes en el biogás, lo cual permite obtener un gas compatible con el Gas Natural, según la Norma Chilena NCh 2264 [17].
Desde un punto de vista técnico, la fase de purificación del biogás permite obtener un valor mínimo de metano de un 98%. En relación con el BioGNV, la inyección permite superar las dificultades ligadas al almacenamiento de biometano y transportarlo hasta el lugar de consumo que puede estar alejado de la ubicación del metanizador.

3.1.3.8 Purificación del biogás

Consiste en eliminar los compuestos no deseados, para trazar y aumentar la proporción de metano con el fin de alcanzar las especificaciones técnicas para su valorización. Los procesos de tratamiento de biogás se basan en tecnologías de separación de gas que pueden ser clasificadas en diferentes familias. Cada tecnología posee ventajas e inconvenientes técnico-

económicos, y la elección de la unidad de metanización depende no solamente de la calidad y cantidad de biogás producido, sino que igualmente de especificaciones técnicas del biogás purificado en relación con su modo de valorización. Ciertos procesos permiten el tratamiento de varios compuestos indeseados. Por ejemplo, en una etapa de purificación, un gas pobre en metano y que contiene impurezas es igualmente producido después de pasar por etapas de biofiltración para minimizar las emisiones a la atmósfera.

3.1.4 Valorización del digestato

Durante proceso de digestión anaerobia, la naturaleza física y química de los sustratos es modificada. Una parte del carbono orgánico de los sustratos es transformada en biogás, el nitrógeno, el fósforo, el potasio, así como otros compuestos inorgánicos o biorefractarios (plásticos, compuestos leñosos, etc.) presentes inicialmente, son concentrados en las fracciones líquida y sólida del digestato. El digestato está compuesto mayoritariamente por agua (70 a 98% en función del proceso) y contiene igualmente microorganismos anaeróbicos.

Un tratamiento posterior del digestato puede ser aplicado en función de las necesidades de utilización y de la gestión de los elementos fertilizantes que contiene. Este permite la separación o concentración de los elementos fertilizantes pudiendo constituir un medio eficaz para el almacenamiento, el transporte y esparcimiento del digestato. Son varios los post-tratamientos del digestato que puede ser aplicados, por ejemplo: puede ser deshidratado, gracias a técnicas de separación física (filtración, centrifugación, evaporación) con o sin adición de reactivos químicos (coagulante, floculante). A su vez, pueden implantarse etapas de concentración de nutrientes (filtración, osmosis inversa, extracción gaseosa, formación de estruvita) o de post-compostaje en función de la naturaleza del digestato. Finalmente, se pueden estudiar los mercados potenciales de los productos extraídos, en un contexto regulatorio y ambiental.
La comparación de las características iniciales de los sustratos metanizados con las del digestato permiten establecer balances de entrada/salida y de calcular indicadores de performance del proceso (rendimiento de materia, tasa de degradación de sólidos volátiles, rendimiento de purificación, de metano...). Un seguimiento de este tipo es implantado cuando la digestión anaerobia es empleada para tratar una fuente de contaminación (desechos industriales, aguas servidas...). También es posible implementar un seguimiento de las tasas de rendimiento por fase del tratamiento (coagulación, floculación, deshidratación, separación, concentración o extracción de compuestos...) con el objetivo de controlar y optimizar la eficiencia su funcionamiento. En los procesos en que se necesita reintegrar una parte o la totalidad del digestato en fase líquida, es necesario un estudio regular del digestato con el fin de evitar la inhibición de las bacterias presentes o la acumulación de compuestos tóxicos presentes.
El digestato es actualmente considerado como un desecho [18]. Sin embargo, este posee un valor agronómico variable en función de la naturaleza de los sustratos de entrada, los procesos de metanización y del post-tratamiento. El digestato puede ser valorizado:

- Por riego directo en forma bruta en los suelos cultivados.
- Después de la separación de una fracción líquida rica en nitrógeno y potasio, que puede sustituir el uso de fertilizantes minerales. Y de una fracción sólida rica en materia orgánica y fósforo utilizable como abono.
- Después de la concentración de nutrientes y elementos fertilizantes.

En este contexto, la comparación de las características del digestato o de diferentes fracciones, permitirán, según las normas establecidas, evaluar la compatibilidad con los diferentes tipos de valorización. Los parámetros analizados comprenden:

- La presencia y enumeración de los microorganismos patógenos (salmonella, escherichia coli y enterococos).
- La presencia de impurezas y de elementos inertes no deseados (vidrio, metales, plásticos, y textiles)
- La dosis de compuestos orgánicos.
- La dosis de elementos metalicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn)
- La evaluación de la toxicidad (tests de toxicidad, test de germinación) y las complicaciones regulatorias impuestas en el cuadro del tratamiento de aguas servidas o de ciertos productos de origen animal (tamaño de partículas, duración y temperatura de tratamiento).

Toda o parte del digestato no valorizable en agronomía por razones técnicas o regulatorias puede ser orientado hacia un proceso de purificación, o hacia una filial de eliminación (vertederos). En el caso de eliminación en vertederos o almacenamiento prolongado, la estabilidad, o grado de madurez del digestato puede ser evaluado por la medida de su potencial metanógeno residual, los tests de respirometría aeróbia o de estabilidad biológica. En el caso de un post-tratamiento purificador, los análisis miden la tasa de materia en suspensión, el PH, la concentración de sales y nutrientes, los microorganismos contaminantes orgánicos y metálicos.

La presencia de microorganismos patógenos en los digestatos ha sido documentada [19]. Los riesgos directos ligados a la manipulación o indirectos vía las aguas fluviales, pueden ser corregidos y prevenidos. De hecho, para su utilización es necesario el control de inocuidad y la validación de etapas de higienización pre o post-metanización (pasteurización, compostaje). Hoy en día, la caracterización del digestato a través de herramientas moleculares y microbiológicas está poco desarrollado y las medidas regulatorias necesarias para su utilización como fertilizante comprenden únicamente la fracción agrícola. Las normas chilenas (NCh3375:2015 y NCh3376:2015) y francesas (NFU 44-051 y NFU 44-095) y la norma europea (reglamento 1774/2002/EC) definen las características sanitarias obligatorias para la utilización del digestato como fertilizante. En este contexto, los indicadores microbiológicos de contaminación (E. coli, enterococos intestinales, Clostridium perfringens) así como microorganismos patógenos (Listeria monocytogenes, Salmonella, enterovirus) pueden ser encontrados.

3.1.4.1 Fertilizantes

El digestato proveniente de la metanización posee una excelente calidad agronómica, mejor aún que las de las materias no metanizadas: una parte de los elementos se encuentra de forma mineral, lo que aporta un valor fertilizante y reparador para la tierra. Este además es un 98% menos odorizado que la materia bruta metanizada [20].

3.1.4.2 Compostaje

La parte sólida del digestato es revalorizada como compost. Para esto es necesario un tratamiento de al menos 2 meses, en donde el compost recupera el carbono a través de la descomposición aerobia de la materia. Sin embargo, también existe una tecnología de

compostaje electromecánico que permite reducir los tiempos de meses a solo semanas para lograr el compost normado. Finalmente, es imprescindible que los desechos orgánicos estén libres de cualquier elemento indeseado (plásticos, metales, vidrios...) para poder utilizarlo como compost, a modo de ejemplo la empresa "Compost In situ" permite hasta 0,1g de plástico por cada 1 kg de desechos orgánicos como límite para el compostaje.

3.2 Estado del arte del tratamiento de desechos orgánicos

3.2.1 La gestión de desechos orgánicos

Actualmente, la cantidad de desechos se mantiene en aumento en Chile (**Figura 3.4**) y en el mundo como consecuencia de factores como el crecimiento de la población y la urbanización. Es imperativo gestionar de buena manera los desechos para evitar la contaminación, las enfermedades y el desperdicio de materia prima. La gestión de desechos se define como la colecta, el transporte, la valorización y la eliminación de desechos y, más ampliamente, toda actividad que participa en la organización de asumir la responsabilidad de los desechos desde su producción hasta su tratamiento final, y que comprende las actividades de comercio o gestión y la supervisión asociada al conjunto de esas operaciones [18].

La gestión de desechos tiene como principal objetivo la disminución de la producción de desechos, y luego su reutilización. Esta noción puede condicionar toda la cadena de tratamiento de desechos. En una gestión de desechos óptima, los desechos son transportados en función de su naturaleza, hacia diferentes tipos de colectas y de procesos de tratamiento, valorización y eliminación.

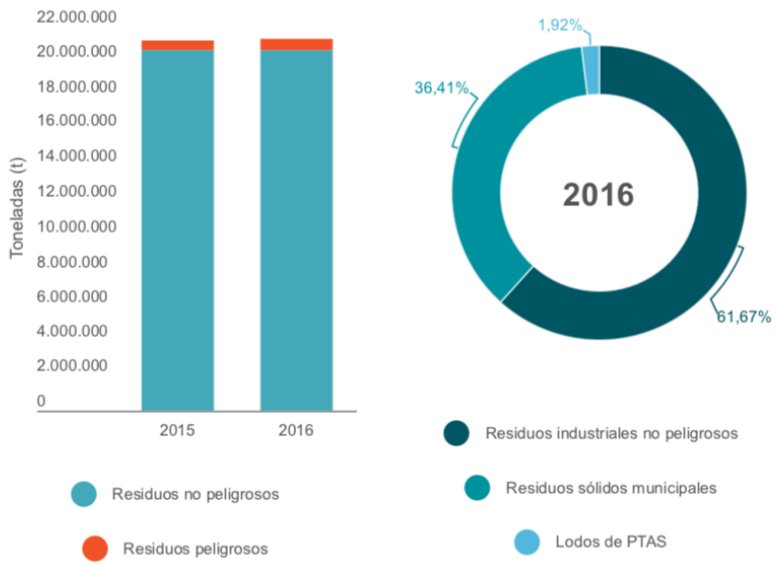


Figura 3.4 *Generación de residuos en Chile en 2015 y 2016 [3].*

La gestión de desechos corresponde a un término genérico que describe varias etapas (**Figura 3.5**), en consecuencia, para comprender el concepto descrito anteriormente, esta se puede dividir en dos etapas: la prevención y la gestión de desechos.

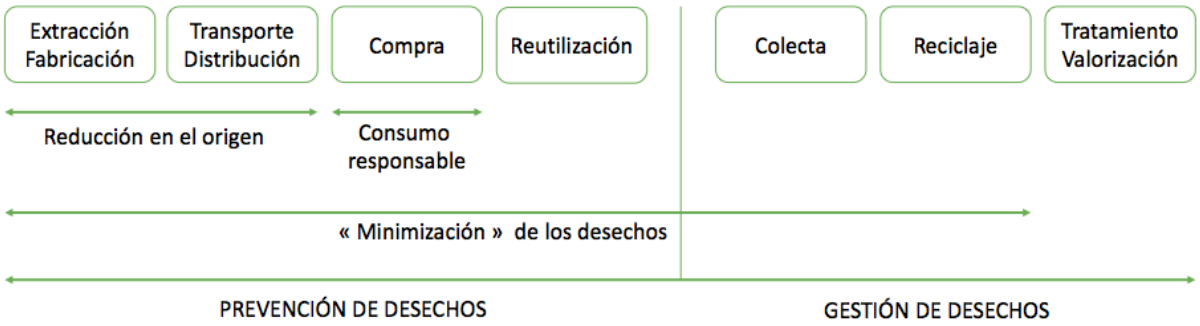


Figura 3.5 *Representación de las etapas que constituyen la prevención y la gestión de desechos [21].*

3.2.1.1 Problemas asociados

Cuando la gestión de los desechos es deficiente, se generan problemas ambientales, sociales y psicológicos para los vecinos. A continuación, se presentan dos problemas de la Región Metropolitana.

3.2.1.1.1 Caso de estudio: Relleno Sanitario Santiago Poniente

El relleno sanitario Santiago Poniente se aprobó en 2001 por la Comisión Regional de Medioambiente Metropolitana (Corema, actual SEIA) y recibe los desechos de las comunas Cerrillos, Peñalolén, Estación Central, San Bernardo, Padre Hurtado, Isla de Maipo, Peñaflor, Calera de Tango, El Monte y Cerro Navia. La implementación de este proyecto estuvo a cargo de Proactiva Chile, la cual está conformada por la multinacional francesa Veolia Environnement y la española Fomento Construcciones y Contratas, las que prestan servicios en el manejo de residuos sólidos en más de cien centros sanitarios distribuidos en el mundo. La iniciativa está ubicada en una superficie de novecientas hectáreas, de las cuales trescientas están destinadas al depósito de los residuos sólidos domésticos [22].

Problemas ambientales

El Relleno Sanitario Santiago Poniente ha recibido trece procesos sancionatorios, de los cuales al menos once han sido resueltos en multas [23]. Los componentes por los cuales ha sido sancionado son múltiples: calidad del aire, suelo, agua, vegetación, fauna, paisaje y prevención de riesgos.

Un estudio de 2006 [24] constató que el incesante tráfico de camiones ha contribuido a la contaminación acústica y del aire, que se traduce en problemas respiratorios, deficiencias de la audición, trastornos del sueño y de la conducta, merma en el rendimiento y disfunciones fisiológicas o mentales, etc. El camino Rinconada también se caracteriza por los malos olores que desprenden los desechos sólidos y los líquidos percolados que caen de los camiones que transitan hacia el relleno.

Desinformación

La gestión del sanitario cambia en ciertos periodos de tiempo, de manera que las sanciones al relleno sanitario quedan asociadas a la antigua gestión. Por ejemplo, en el caso del sanitario de Santiago poniente, existen 8 sanciones a lo largo de su construcción desde el 2001, gestionada por la empresa Proactica, que está conformada por la multinacional francesa Veolia Environnement y la española Fomento Construcciones y Contratas. Sin embargo, al realizar una búsqueda de la información, se presenta la actual gestión realizada únicamente por Veolia Environnement, los cuales no poseen ninguna sanción. En consecuencia, la información pública muestra que el relleno sanitario Santiago poniente no tiene sanciones.

3.2.1.1.2 Vertederos ilegales

En la Región metropolitana existen aproximadamente 67 vertederos ilegales de residuos sólidos (VIRS) [25]. Estos VIRS generan problemas sanitarios y ambientales sobre el entorno, debido a que dentro de ellos se realizan prácticas nocivas para el medio ambiente como la quema de basura y la disposición clandestina de distintos tipos de desechos. La disposición de estos desechos suele desarrollarse en las cercanías de canales y ríos, al costado de caminos, lugares cercanos a vías de ferrocarril, en los alrededores del aeropuerto Arturo Merino Benítez (AAMB) o en sitios eriazos. La **Tabla 3.2** muestra las siguientes subcategorías:

Tabla 3.2 *Tipologías de VIRS [25].*

Tipo	Total	%	Emplazado en
Públicos en ribera de río	20	30	Ribera de río o BNUP
Mixto	3	4	Sitios privados y públicos
Privado	28	42	Propiedad privada
Públicos en sitios eriazos urbanos	16	24	Propiedad fiscal o BNUP

3.2.2 Técnicas de colecta y separación

3.2.2.1 Técnicas de colecta

Las técnicas de colecta son establecidas en función de la naturaleza de los desechos y dependen de los tipos de tratamientos existentes. De hecho, son las técnicas de tratamiento de desechos las que determinan finalmente toda la cadena de gestión y en consecuencia los modos de colecta [8]. Estas técnicas de colecta son dos dependiendo si los desechos son recolectados de forma mezclada con otros desechos o separada.

Cuando los desechos son recolectados de forma mezclada, se definen dos categorías de desechos a separar: los desechos reciclables y el resto de los desechos (**Figura 3.6**). Esto exige un grado de distinción para el ciudadano que lo saca de su zona de confort, ya que debe reconocer qué desechos son reciclables. En países desarrollados como Francia, es este tipo de acción la que genera la mayor cantidad de problemas ya que, si bien la separación existe, son los ciudadanos quienes no hacen el esfuerzo de separar la basura.

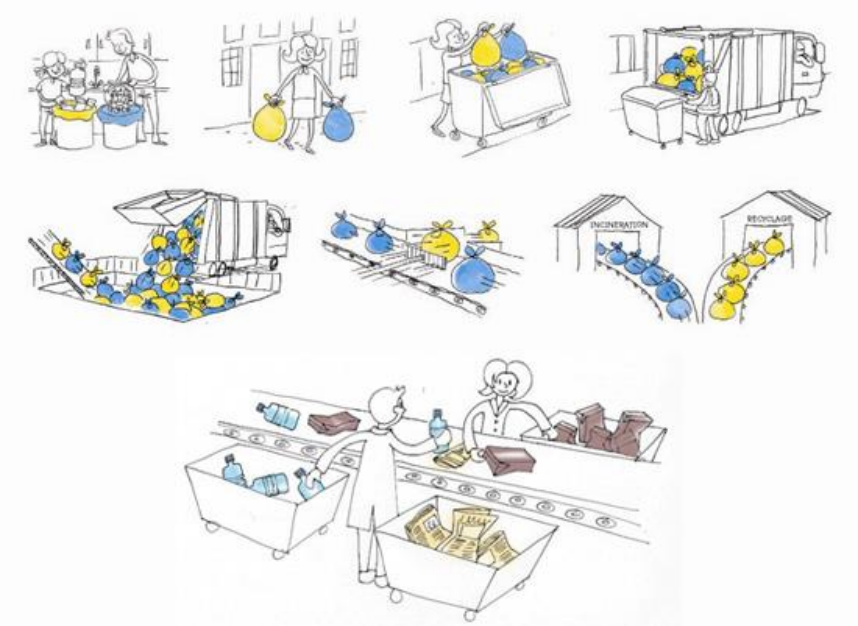


Figura 3.6 *Método ilustrativo de separación de basura en Nantes, Francia [26].*

Las bolsas amarillas y azules son repartidas por la municipalidad a cada residencia (casa, departamento, residencia universitaria, etc.) de la ciudad. Las bolsas amarillas contienen todos los desechos reciclables (metales, plásticos, cartones y papeles), mientras que las bolsas azules contienen el resto de los desechos. Al final del proceso las bolsas se separan para el reciclaje y la incineración respectivamente. Cuando la colecta es separada, se definen categorías específicas como el vidrio, cartón, metal, papel, plásticos, y el resto de los desechos. Esta demanda un esfuerzo aún mayor de parte del ciudadano, el cual no está acostumbrado a realizar esta acción, ni siquiera en muchos de los países desarrollados.

Posteriormente, los desechos separados son recuperados por los servicios municipales según dos tipos de colecta:

1. La colecta puerta a puerta: vehículos municipales se encargan de recoger la basura de forma regular en la comuna. En países desarrollados existen diferentes tipos de contenedores de basura (por ejemplo: amarillo y azul en el caso de Nantes, Francia) según el tipo de desechos.
2. La colecta "en aporte voluntario": implantación de contenedores para el uso ciudadano en lugares públicos (calles, estacionamientos, chatarrerías, etc.) en donde las personas vienen de forma voluntaria a verter sus desechos separados. Este tipo de colecta permite a los ciudadanos de valorizar sus desechos no recolectados en el puerta a puerta y evitar los basurales no autorizados.

Antes de implementar una estrategia de colecta, es imperativo identificar y caracterizar los desechos cualitativa y cuantitativamente. Esta caracterización permite evitar las mezclas de desechos peligrosos, optimizar la valorización e implementar una técnica de colecta adaptada a los desechos optimizando los costos de gestión. La elección depende también de los tipos de viviendas habitacionales, de la infraestructura de las rutas, de los procesos de tratamiento establecidos, del material a poner a disposición, así como de la frecuencia de colecta.

3.2.2.2 Técnicas de separación

Los desechos colectados en forma mezclada necesitan ser separados de otros flujos de desechos para ser valorizados. Las técnicas de separación se pueden adaptar según el objetivo de la separación. Es decir, la separación puede ser orientada a la valorización de desechos reciclables (valorización de la materia) o a desechos orgánicos (valorización energética o de retorno al suelo). En el caso de los reciclables, la técnica utilizada es la separación mecánica, mientras que en el caso de los desechos orgánicos se habla de una pre-separación, es decir, es el productor inicial quien debe hacerse cargo de la separación.

La separación mecánica consiste en separar los desechos reciclables de los desechos finales. Esta se acompaña de varias etapas con objetivos de separación específicos. Por ejemplo, una de las cadenas de separación constituye una banda imantada, la cual tiene por objetivo captar los desechos metálicos. Cada cadena es específica y única en función de sus objetivos de separación. Generalmente, una primera separación mecánica permite separar los cuerpos planos (cartones), los cuerpos huecos (botellas) y los metales (**Figura 3.7**). A continuación, los desechos son dirigidos hacia diferentes bandas de separación manual, la cual permite la valorización de los desechos, los cuales son retirados de forma manual. Los desechos reciclables son transportados a una planta de valorización, mientras que los desechos finales son eliminados por incineración o en rellenos sanitarios.

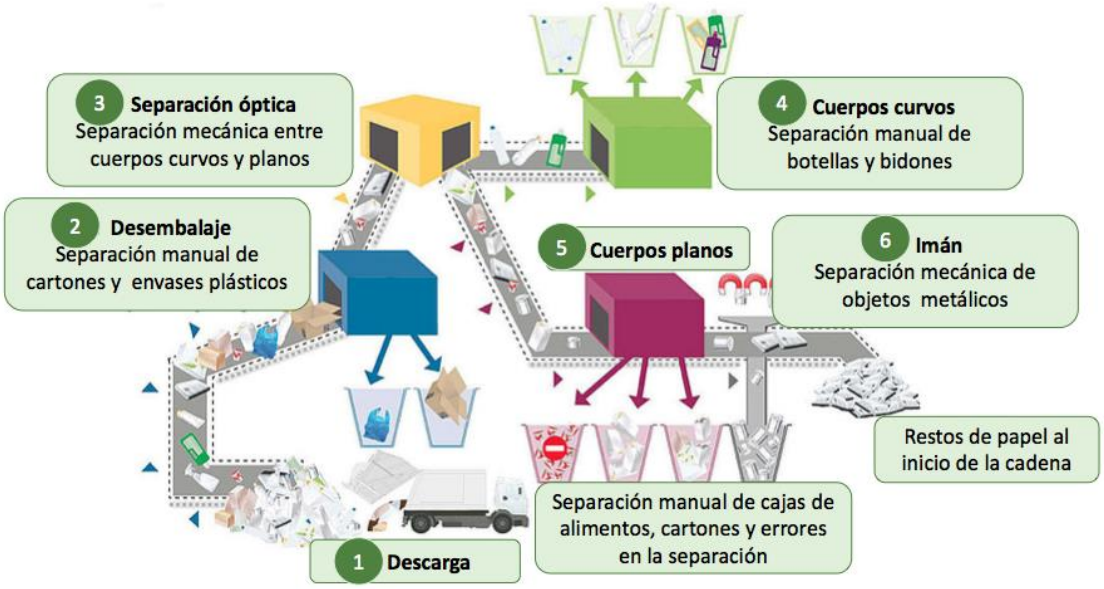


Figura 3.7 *Esquema típico de un centro de separación [27].*

La separación mecánica tiene por objetivo obtener desechos “limpios”, es decir, sin elementos indeseados, los cuales son eliminados a través de técnicas como la separación granulométrica, la separación por peso, por densidad, óptica, hidráulica, overband, entre otros.

La separación mecánica permite extraer diferentes fracciones, por ejemplo:

1. Los elementos reciclables: papeles, cartones, metales y vidrios.

2. Los desechos de poder calorífico inferior: estos pueden ser valorizados bajo la forma de combustibles sólidos de recuperación, estos poseen una energía entre 3000 a 5000 kcal/kg, y pueden ser objetivo de una valorización energética [28].
3. Los elementos biodegradables o fermentables, destinados a un tratamiento biológico.
4. Los desechos residuales, caracterizados por un bajo poder combustible y una pequeña tasa de materia orgánica, similar a los desechos "finales", en consecuencia, destinados a los rellenos sanitarios o instalaciones de almacenamiento de desechos no peligrosos.

Es importante mencionar que la separación mecánica de los desechos reciclables provenientes de las colectividades municipales se realiza en un centro de separación de desechos. Para otros flujos (diferentes a los de las colectividades municipales), la separación mecánica se encuentra generalmente al comienzo del proceso de tratamiento. Algunos ejemplos de cadenas de separación mecánica de desechos están presentes en las instalaciones de TMB de Launay-L'Antic y de la planta de Amethyste en Montpellier, Francia [8] comúnmente llamadas separación mecano-biológica.

3.2.3 Técnicas de valorización

A continuación, se presentan los tipos de valorización de los desechos orgánicos (**Figura 3.8**) y una descripción de las técnicas más utilizadas.

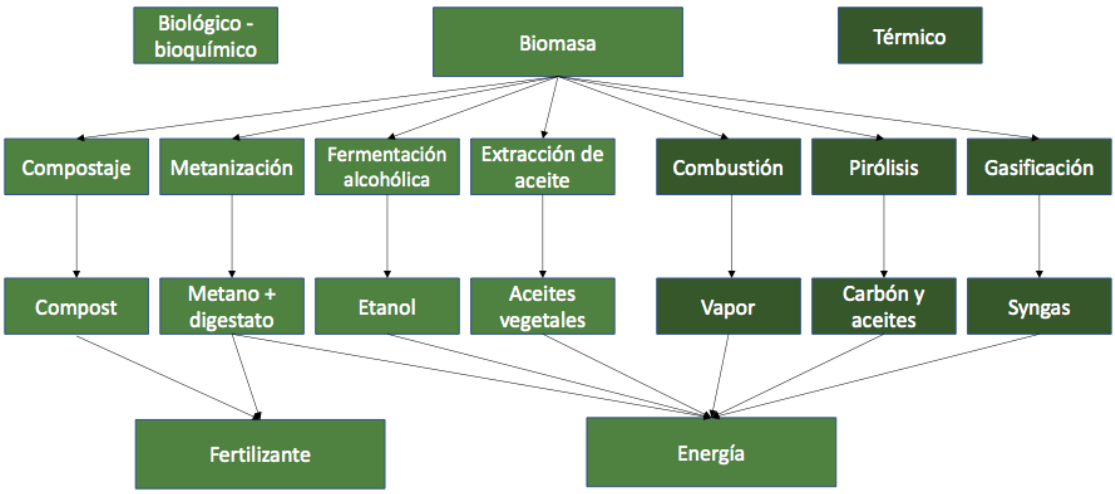


Figura 3.8 *Tipos de valorización de bio-desechos [8].*

3.2.3.1 Recuperación de alimentos para el consumo humano y animal

Los alimentos que ya no son comercializables, pero que son aptos para el consumo humano y animal pueden ser donados a asociaciones y organizaciones sociales, esta es una práctica cada vez más recurrente hoy en día. En Chile actualmente existen dos bancos de alimentos: Banco BioBío de la fundación Lepe y la Red de alimentos, una empresa privada que trabaja con voluntariado y posee varios socios de marcas reconocidas (Watts, Walmart, Nestlé, entre otros). El mercado Lo Valledor está también en proceso de formar un banco de alimentos, el cual pretende ser el 2do banco más grande de Chile.

3.2.3.2 Compostaje tradicional

El compostaje es un proceso que utiliza la acción de diferentes organismos aerobios para descomponer bajo control (aireación, temperatura, humedad), y de forma acelerada, la materia fermentable. Esto, con el objetivo de obtener un fertilizante orgánico rico en humus: el compost debe ser estable desde un punto de vista biológico y exento de organismos patógenos gracias al calor cedido en el proceso (aproximadamente 60 °C).
Existe diversas técnicas de compostaje en sistema abierto como el compostaje aireado estáticamente, de forma pasiva o el compostaje en silo. La calidad del compost depende de la calidad de los desechos entrantes. Existe una normativa en Chile y Francia para asegurar la calidad del compost las normas chilenas (NCh 3375:2015 y NCh 3376:2015) y francesas (NFU 44-051 y NFU 44-095).

3.2.3.4 Metanización

Como ya señalado anteriormente, la metanización es la digestión o fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, bajo la acción combinada de distintos tipos de microorganismos. Estos microorganismos están presentes naturalmente en este tipo de procesos. Por ejemplo, para la producción de biogás a partir de estiércol bovino, son las mismas bacterias presentes en el estiércol las que producen el biogás a través del proceso de metanización.

3.2.3.5 Gasificación

La gasificación es un proceso que transforma materiales orgánicos - o combustible fósil - ricos en carbono en monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono. Este se obtiene haciendo reaccionar el material a altas temperaturas (>700 ºC), sin combustión, con una cantidad controlada de oxígeno y/o vapor. Esta mezcla es combustible y recibe el nombre de syngas (gas de síntesis) o productor de gas. La potencia derivada de la gasificación y combustión del gas obtenido es considerada una fuente de energía renovable si se gasifica a partir de biomasa [26].

3.2.4 Técnicas de eliminación

3.2.4.1 Rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es un depósito controlado de residuos, que permite minimizar los efectos producidos por la degradación de la fracción orgánica de los residuos. Normalmente se construyen capas de residuos en las zonas previamente impermeabilizadas, junto con el depósito de residuos, dichas áreas deben ser desgasificadas mediante la instalación de pozos de venteo de biogás. Los residuos son cubiertos con tierra a lo menos una vez al día. Finalizada la disposición de residuos en una zona, se procede al cierre de ella mediante la capa de cobertura final. El manejo de los subproductos de la descomposición de los residuos se maneja en instalaciones cercanas al relleno, estas son: el tratamiento de líquidos percolados y el control o utilización del biogás. El tiempo que tarda en degradarse los residuos orgánicos del relleno es de en promedio 20 a 25 años en degradarse. La fracción inorgánica (plásticos, metales) puede demorar cientos de años en degradarse. Es importante señalar que no se pueden arrojar residuos peligrosos al relleno. Cuando este llega al final de su vida útil, el relleno sanitario es cerrado, alguno de sus usos posibles son construcciones de parques, áreas verdes, aeropuertos e incluso casas habitacionales [29].

Figura 3.9 *Etapa de construcción de un relleno sanitario por la empresa Veolia para el depósito de desechos domiciliarios [30].*

Es importante aclarar las diferencias entre un relleno sanitario, un vertedero y un basural. Un basural es un lugar en el que se disponen residuos, ya sea en forma espontánea o programada, sin ningún tipo de control o protección ambiental. Un vertedero es un lugar de disposición de residuos que fue planificado para ese uso, pero que no cuenta con las medidas sanitarias mínimas establecidas en el decreto supremo 189. Por esta razón, generalmente es foco de problemas ambientales [29].

3.2.4.1.1 Catastro Región Metropolitana

Tabla 3.3 *Catastro de rellenos sanitarios en la región Metropolitana [31].*

Nombre relleno sanitario	Razón social	Comuna
Santiago Poniente - Maipú	VEOLIA SU CHILE S.A.	Maipú
Santa Marta	CONSORCIO SANTA MARTA	Talagante
Cerro La Leona	GESTIÓN ECOLÓGICA DE RESIDUOS S.A.	Til til
Monte Pelan	BESALCO S.A.	Til til
Monorelleno El Rutal - Til til	AGUAS ANDINAS S.A.	Til til
El Rutal	AGUAS ANDINAS S.A.	Til til
Loma Los Colorados	KDM S.A. / KDM ENERGIA S.A.	Til til

3.2.4.2 Incineración

La incineración es un método de tratamiento térmico de desechos que consiste en una combustión (la tecnología y la temperatura varían según la naturaleza del desecho) con exceso de aire y un tratamiento del humo. Los desechos son quemados en hornos de tamaños industriales a una temperatura entre 800 y 1200 °C.

El incinerador tiene un rendimiento térmico del orden de 80% y un potencial de producción eléctrica de 400 a 700 kWh por tonelada de desechos, del cual un 50 % es utilizado en el autoconsumo para un proceso que dispone de un sistema de cogeneración. El costo de inversión de un proyecto como este se eleva a 1,48 M€/MWth de desechos entrantes [8].

4. Potencial teórico

En esta sección se presenta la formulación teórica energética de biogás. Además, a modo comparativo, se presentan los requerimientos energéticos de electricidad de Chile y Francia, concluyendo de qué manera puede influir la utilización de esta energía renovable no convencional a nivel nacional. Finalmente, se presenta el potencial teórico de producción de metano, es decir el potencial metanógeno de diferentes tipos de desechos.

4.1 Potencial teórico energético del biogás

El potencial teórico energético del biogás se calcula a partir de su potencial como gas combustible, es decir, su poder calorífico inferior (PCI). Para calcular el potencial energético que tiene la generación de biogás a través de la metanización de un tipo de desecho orgánico en particular, se debe tener en cuenta primero el poder metanógeno del sustrato, el caudal de CH_4 que la planta puede proporcionar y su valorización a través de los métodos descritos en la sección 3.1.3 (cogeneración, biometano, inyección a la red, producción de calor...).

En Chile, según las normas generales del Ministerio de energía, es necesario llevar registro de la potencia nominal para las plantas de biogás medianas y grandes [1].

La potencia nominal (Pnom) se calcula de la siguiente manera:

$$Pnom\ (Kw) = \frac{QNbiogás(\frac{Nm^3}{d})}{24\ (\frac{h}{d})} \times \%\ Metano \times PCI\ Metano\left(\frac{kWh}{Nm^3}\right)$$

Donde :

a) Las condiciones normales (N) corresponden a una temperatura de 0°C y a una presión atmosférica absoluta al nivel del mar siendo 1,013 bar absolutos.
b) QN biogás: Caudal promedio mensual de biogás producido en condiciones normales (Nm^3/d), y que se calcula de la siguiente forma:

$$QNbiogás(\frac{Nm^3}{d}) = \left(\frac{TN}{Tefec}\right) \times \left(\frac{Pefec}{PN}\right) \times Qefec$$

b.1) Pefec: Presión absoluta efectiva del biogás en las condiciones de la medición (en mbar)
b.2) PN: Presión absoluta del biogás en condiciones normales (1013 mbar)
b.3) TN: Temperatura en condiciones normales (273 K)
b.4) Tefec: Temperatura efectiva en condiciones de la medición (en K)
b.5) Qefec (m^3/d): Caudal efectivo promedio de biogás producido en condiciones de presión y temperatura de la ubicación de la instalación.

c) % Metano: Concentración de metano (CH_4) en el biogás en porcentaje volumétrico (%v/v)
d) PCI Metano: Es el poder calorífico inferior del metano, equivale a

$$PCI\ \left(\frac{kWh}{Nm^3}\right) = 9{,}94$$

e) Nm^3: Metros cúbicos en condiciones normales
f) $\frac{h}{d}$: Horas por día

En la sección 9 se calcula en detalle el potencial energético para una planta de biogás de desechos orgánicos alimentarios.

4.1.1 Requerimientos energéticos

El potencial técnico de biogás en Chile es de 9.750 GWh/año [32]. Sin embargo, la capacidad máxima instalada de biogás en Chile se desconoce [4]. Por otra parte, la capacidad en Francia es de 3612 GWh al año en producción eléctrica y 10 TWh en capacidad total (considerando otros tipos de valorización como energía térmica o biometano).

La **Figura 4.1** indica la producción y el consumo eléctrico anual en Chile y Francia.

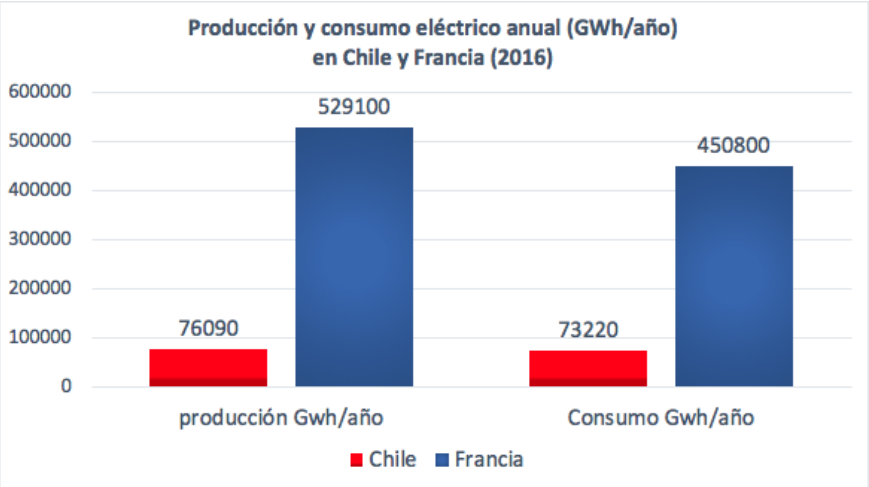


Figura 4.1 *Producción y consumo eléctrico anual (GWh) en Chile y Francia [2].*

Si bien la producción de biogás es baja comparada con los requerimientos energéticos de cada país, en valor del biogás recae en la posibilidad de gestionar los desechos orgánicos y en reducir las emisiones de gases a efecto invernadero (ver sección 6).

4.2 Potencial teórico de producción de metano

El potencial metanógeno, igualmente llamado BMP (Biological Methane Potential), corresponde a la cantidad de metano producido por un sustrato orgánico a través de su biodegradación en condición anaeróbica. Este volumen de metano, generalmente en relación con la cantidad de sustrato fresco, seco (MS) o volátil (MV) es a menudo el más experimentado en las condiciones normales de temperatura y presión (0°C, 1 atm). La ecuación de Buswell y Müller [33] completada por Boyle [34], que integra el azufre y el nitrógeno, permite predecir

la cantidad y la composición teórica de biogás producido en la biodegradación anaeróbica de un sustrato, donde la composición elemental es conocida.

$$C_nH_aO_bN_cS_d + (\boldsymbol{n} - \frac{\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{4}} - \frac{\boldsymbol{b}}{\boldsymbol{2}} - \boldsymbol{3}\frac{\boldsymbol{c}}{\boldsymbol{4}} + \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{2}})\boldsymbol{H_2O} \rightarrow (\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4} + 3\frac{c}{8} + \frac{d}{4})CO_2$$

$$+(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} + 3\frac{c}{8} + \frac{d}{4})CH_4 + cNH_3 + dH_2S$$

El potencial metanógeno teórico (PM_{th}en l.mol^{-1}) de un producto puede así ser calculado a partir de la ecuación precedente según la fórmula siguiente:

$$PM_{th} = \frac{\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}}{12n + a + 16b} \times 22{,}4$$

Esta aproximación teórica no tiene en cuenta el número de factores ligados a la biodegradabilidad de los productos y no debe ser sustituida por las medidas de potenciales metanógenos realizadas a tales productos. La mayoría de estos métodos de medida se basan en el cultivo, en biorreactor cerrado, de una cantidad conocida de la materia orgánica a caracterizar y de una cantidad igualmente conocida de microorganismos anaeróbicos (inoculum) situados en condiciones ideales para el desarrollo de una actividad biológica anaeróbica óptima [35]. En el transcurso del ensayo, los microorganismos degradan la materia orgánica aportada, lo que se traduce en producción de biogás. Al final de esta reacción, la velocidad de producción de biogás decae, signo del final de la biodegradación de la materia orgánica. La producción de biogás (o directamente de metano luego de la captura del CO_2) es medida en el curso de tiempo. y la composición de biogás es analizada. El potencial de metano de cada muestra es determinado a partir de la cantidad acumulada de metano producido en el ensayo. El ensayo es realizado en modo discontinuo a partir de una sola entrada de sustrato, fuertemente diluida en un medio reactivo en la cual la composición, ampliamente influenciada por la naturaleza del inoculum utilizado, varía de un ensayo a otro. Estas condiciones operatorias limitan la validez de la medida a solo el volumen de metano producido (BMP). Así, la velocidad de degradación de sustrato, el volumen, la composición y la cinética de producción de biogás medidos en el curso del ensayo, no constituyen en ningún caso datos reproducibles y no serán interpretados como representativos del funcionamiento de un metanizador que trata esos sustratos. Este tipo de datos cualitativos y cinéticos relativos a la producción de biogás, necesarios para dimensionar un proceso de metanización, solo pueden ser obtenidos gracias a la realización de ensayos en biorreactores continuos o semicontinuos.

A continuación, se muestra una gráfica con diferentes potenciales metanógenos experimentales en metros cúbicos de diferentes sustratos. Como se señaló anteriormente, estos datos no deben relacionarse con la ecuación del potencial metanógeno descrita más arriba, debido a que esta no tiene en cuenta los factores de biodegradabilidad.

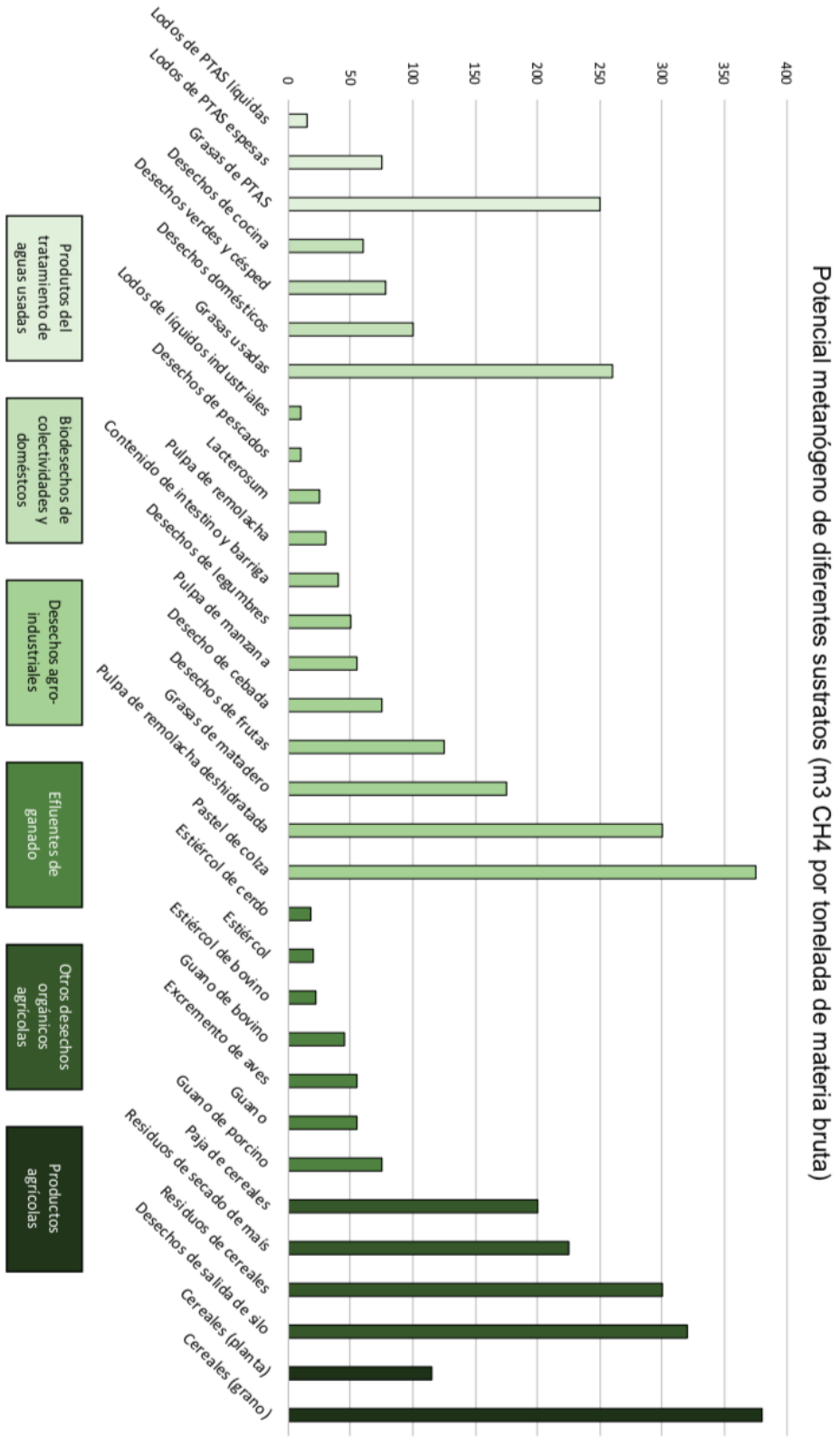


Figura 4.2 *Potencial metanógeno de diferentes sustratos (m^3 CH_4 por tonelada bruta de materia)* ***[36]***

4.2.1 Otros compuestos presentes en el biogás

El biogás es una mezcla gaseosa, saturada en agua, constituída de metano CH_4, dióxido de carbono CO_2 y de compuestos en baja cantidad: sulfuro de hidrógeno H_2S, hidrógeno H_2, amoniaco NH_3, siloxanos, hidrocarburos halógenos…
La **Tabla 4.1** presenta los contenidos en porcentaje volumétrico de los principales compuestos de diferentes muestras de biogás a partir de distintos sustratos. Estos representan valores promedio, indicativos, los contenidos medidos pueden ser más bajos o más altos, especialmente para el sulfuro de hidrógeno.

Tabla 4.1 *Contenido medio de los principales compuestos de diferentes biogases producidos a partir de sustratos típicos [37].*

Compuesto	Bio-desechos	Lodos activados	Residuos agrícolas
Metano (CH4)	55 a 65%	60 a 70%	45 a 70%
Dióxido de carbono (CO_2)	35 a 45%	30 a 40%	30 a 55%
Vapor de agua (H_2O)[a]	1 a 5%	1 a 5%	1 a 5%
Hidrógeno (H_2)	0 a 1.5%	0 a 1.5%	0 a 1%
Nitrógeno (N_2)[b]	0 a 1%	0 a 2%	0 a 5%
Oxígeno (O_2)[b]	0.1 a 0.5%	0 a 1%	0 a 2%
Sufuro de hidrógeno (H_2S)	0.01 a 0.6%	0.05 a 0.15%	0.005 a 0.5%
Siloxanos	1 - 2 $mg.m^{-3}$	< 50 $mg.m^{-3}$	< 2 $mg.m^{-3}$
Amoniaco (NH_3)	< 2 $mg.m^{-3}$	< 0.05 $mg.m^{-3}$	< 2 $mg.m^{-3}$
Hidrocarburos halógenos	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo

[a] La concentración en vapor de agua del biogás (generalmente en saturación) depende de su temperatura.
[b] La presencia de nitrógeno y de oxígeno en el biogás resulta de una introducción de aire, voluntaria (introducción de aire por la desulfuración biológica) o involuntaria (fugas en la red de almacenamiento del biogás)

El biogás es compuesto principalmente de dióxido de carbono y de metano. Para un sistema dado (proceso/sustrato/condiciones de operación), funcionando en condiciones estables, la relación CH_4/CO_2 permanece constante generalmente. Esta proporción, fuertemente dependiente de la naturaleza de los sustratos metanizados, de la temperatura, del pH, de la presión gaseosa y de la composición del consorcio microbiano, varía habitualmente de 1 a 3. Un pH básico tiene tendencia a favorecer la presencia de dióxido de carbono disuelto y así mantener una tasa de metano elevada. Contrariamente la acidificación del medio reactivo favorece la reducción de iones bicarbonatos y la liberación de dióxido de carbono. La producción de metano, así como la solubilidad en la fase líquida es baja y reacciona poco con los otros tipos de químicos en la solución, es un excelente indicador de rendimiento y estabilidad del proceso. Dispositivos basados en técnicas espectrométricas infrarrojas o cromatográficas, permiten medir *in situ* o en tiempo real la composición de metano y de dióxido de carbono. En una primera aproximación, considerando que el biogás contiene sólo dos compuestos, la única medida de la tasa de dióxido de carbono permite calcular la tasa de metano por simple diferencia. La precisión es del orden de ± 0,5 % en la medida que los otros compuestos del biogás estén en concentraciones generalmente inferiores a 0,1%.
El hidrógeno es un importante intermediario metabólico en la cadena trófica anaerobia. Este juega un rol determinante en la cadena de transferencia de electrones entre las especies fermentadoras, acetogénicas y metanogénicas. En el cuadro del funcionamiento normal del proceso de metanización, pueden aparecer variaciones rápidas y transitorias de la concentración de hidrógeno en el biogás, en una gama de 0 a 2000 ppm. Una aumentación

moderada en de la carga orgánica o la introducción de sustratos rápidamente biodegradables (en gran contenido de glúcidos por ejemplo), sin consecuencias sobre los rendimientos del proceso, resulta generalmente en una aumentación de la concentración de hidrógeno en el biogás. Tales variaciones aparecen igualmente luego de un stress de la población microbiana (inhibición, insuficiencia, toxicidad...) [9]. Sin información complementaria sobre el estado del proceso (tales como la carga orgánica, el flujo y la composición del biogás, la alcalinidad y la concentración en AGV), el monitoreo de la concentración de hidrógeno del biogás no permite diagnosticar con exactitud un disfuncionamiento del proceso.

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico y corrosivo, producido mayoritariamente por las bacterias sulfato-reductoras. El contenido de sulfuro de hidrógeno en el biogás depende de varios factores: la concentración en azufre de los sustratos metanizados, el pH y, en una menor medida, la presencia de iones metálicos, en el origen de la formación de sulfuros metálicos. Generalmente se puede presentar en un dos a tres por ciento en los casos de procesos donde los efluentes son ricos en azufre, esto es, desde unas centenas a unos miles de ppm. La aplicación de una estrategia de pilotaje basada en este parámetro puede en ese caso ser necesaria. Así mismo, la valorización energética del biogás implica una etapa de desulfuración (biológica gracias al aporte de oxígeno, por precipitación, absorción o lavado con soda), en la cual la eficacia debe ser controlada. Algunos constructores proponen sistemas de medida de la tasa de sulfuro de hidrógeno (sondas electroquímicas o infrarrojas), que pueden ser montadas con los analizadores de tasas de metano y dióxido de carbono en línea.

Las restricciones para el contenido de siloxanos y amoniaco en el biogás son impuestas por el modo de valorización. Los umbrales de tolerancia de estos compuestos varían fuertemente en función del sustrato y del proceso implementado (motor, calderas, turbinas...) en un intervalo de algunos miligramos hasta decenas de miligramos por metro cúbicos.

El término siloxano representa una familia de compuestos organosilícicos sintéticos, volátiles, poco soluble en agua, presentes en numerosos productos (aditivos alimentarios, detergentes, productos cosméticos, pinturas, lubricantes...). Luego de la combustión del biogás, los siloxanos son transformados en óxido de silicio, que se deposita en forma de película, causando un desgaste acelerado de los elementos mecánicos. El contenido de siloxanos en el biogás es medido en laboratorio a través de una cromatografía y ionización de flama o espectrometría de masa.

Los procesos biológicos y químicos al origen de la presencia de amoniaco libre NH_3 en forma gaseosa dependen fuertemente del pH y de la temperatura. El amoniaco es corrosivo y puede influenciar considerablemente las características de la combustión del biogás, incluso en bajas concentraciones. El amoniaco gaseoso puede ser dosificado *in situ* con la ayuda de un sensor electroquímico o un espectroscopio infrarrojo, o después de una extracción en laboratorio por cromatografía y espectrometría de masa.

5. Plantas de biogás

En este capítulo se desarrolla un catastro de las plantas de biogás en Chile y en Francia. Se exponen datos para su clasificación y se genera un levantamiento de la información técnica de las instalaciones.

5.1 Tipos de plantas de biogás

Las plantas de biogás pueden ser clasificadas según diferentes criterios, dentro de los más determinantes, se encuentran:

1. Tamaño de la instalación: Potencia eléctrica o térmica kWe y/o kWt, este criterio está en estrecha relación con el volumen de desechos tratado (ver capitulo Potencial metanógeno).
2. Tipo de sustrato: Agroindustrial, Riles, PTAS (planta de tratamiento de aguas servidas), RSU (residuos sólidos urbanos).
3. Modelo de valorización: autoconsumo (cogeneración), inyección a la red de gas, inyección a la red eléctrica, quema de antorcha y caldera.

A continuación, se presentan diferentes tipos o modelos clásicos de construcción:

5.1.1 Modelo chino

En el modelo chino (**Figura 5.1**) el sustrato permanece en el interior entre 30 y 60 días (retención), este modelo es utilizado para producir fertilizante o "bioabono". Es un modelo poco eficiente para la producción de biogás, posee un rango de 0.15 a 0.20 (volumen de gas / volumen del digestor) por día.

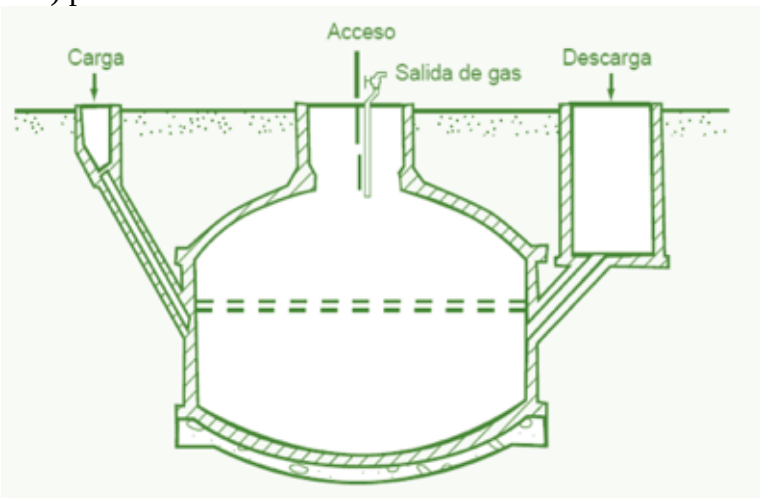


Figura 5.1 *Esquema de modelo de digestor chino [38, 38].*

Descripción: Consiste en una firme cámara de biogás construida de ladrillos, piedra u hormigón. La tapa y la base con semiesferas y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas para hacerlo firme. Hay un tapón de inspección en la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo

una presión de entre 1 y 1,5 metros de columna de agua. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor [39].

5.1.2 Modelo indio

En el modelo indio (**Figura 5.2**) el sustrato permanece en el interior entre 15 y 25 días (retención). Es un modelo eficiente para la producción de biogás, posee un rango de 0.5 a 0.1 (volumen de gas / volumen del digestor) por día.

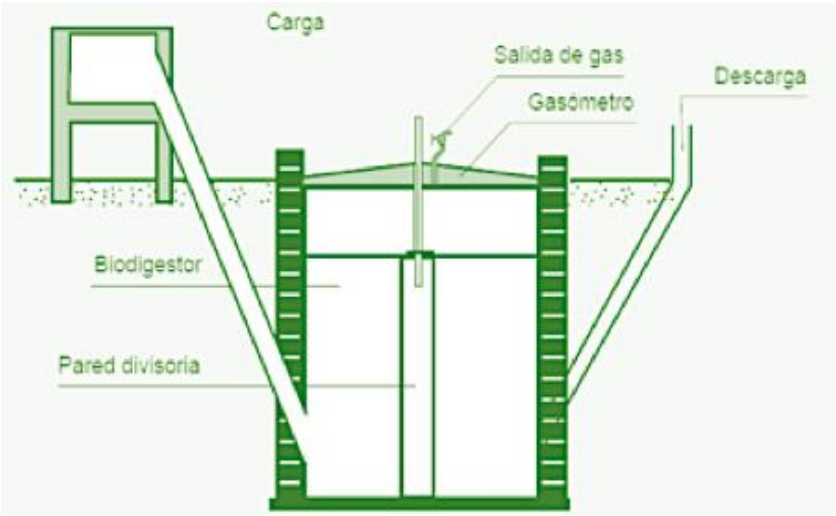


Figura 5.2 *Esquema de modelo de digestor indio [38].*

Descripción: Este biodigestor consiste en un tambor, fabricado con fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para evitar la corrosión (originalmente hechos de acero). Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, sin embargo, a veces se utiliza refuerzo en hormigón. El gas producido se entrampa bajo una tapa flotante que posee un movimiento vertical acotado por una guía central. La presión del gas disponible normalmente varía entre 4 a 8 cm de columna de agua [38]. El reactor se alimenta de forma semicontinua a través de una tubería de entrada.

5.1.3 Biodigestor de polietileno

El biodigestor de polietileno es muy utilizado en la producción agrícola de biogás debido a su facilidad de construcción y sus bajos costos, tanto en materiales como en mano de obra.

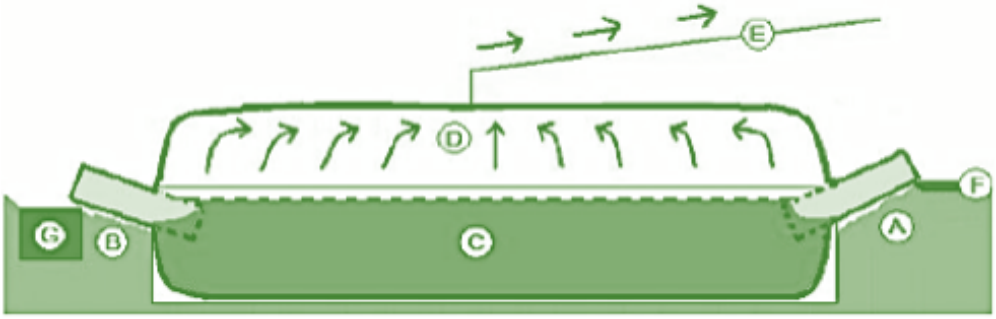


Figura 5.3 *Esquema de modelo clásico de un biodigestor de polietileno [38].*

Las etiquetas de la figura muestran, A: Tubería de entrada del biodigestor, B: Tubería de salida del biodigestor, C: Tanque donde se va a dirigir la mezcla de agua y estiércol, D: Cámara de colección de gas, E: Tubería de salida del gas, F: Recipiente de entrada para la carga, G: Recipiente de recolección de Biol.

Descripción: En este biodigestor, el gas es acumulado en la parte superior de la bolsa de polietileno. Este se encuentra con materia orgánica en fermentación y a una baja presión. La principal diferencia con los anteriores modelos es que las paredes con flexibles, lo que ayuda a mantener una baja presión [38].

5.2 Plantas de biogás en Chile

Chile posee un gran potencial para generar energía con biogás, es un país con una gran explotación agrícola, ambiente propicio para la generación de esta energía renovable. No obstante, los desechos agrícolas no son los únicos que pueden ser valorizados en biogás, los desechos orgánicos domésticos tienen un potencial enorme: se sabe que un 30% de la basura que produce una persona en promedio son desechos orgánicos [3].

El potencial técnico de biogás en Chile es de 9.750 GWh/año [32]. Sin embargo, la capacidad máxima instalada de biogás en Chile se desconoce, es por esto que el Ministerio de energía está realizando todos los esfuerzos posibles para realizar un catastro y registrar las plantas de biogás existentes.

Según la División de energías renovables del Ministerio de Energía, la política de energía para Chile en 2035 es llegar a un 60% de generación eléctrica con energías renovables, mientras que la meta para el 2050 es de 70% [4].

En Chile se han contabilizado más de 100 plantas de biogás, sin embargo, solo el 60% está operativa (**Figura 5.4**).

Región	Todos	Operando
Arica y Parinacota	1	-
Antofagasta	2	2
Atacama	1	1
Coquimbo	2	2
Valparaíso	11	5
Metropolitana	19	16
O'Higgins	15	8
Maule	12	5
Bío Bío	12	7
La Araucanía	7	2
Los Ríos	4	1
Los Lagos	17	12
Magallanes	1	1

Instalaciones grandes y medianas

Figura 5.4 *Catastro de plantas de biogás en Chile año 2017 [4].*

No es posible realizar una estimación de la capacidad eléctrica mínima del biogás en Chile con la información actual. Sin embargo, se cuenta con información del catastro de plantas de biogás y una estimación de la potencia de las plantas en operación, esta puede ser en energía eléctrica, térmica o calórica del biogás. Al sumar toda la potencia de las plantas operativas, se puede estimar que la potencia nominal en valorización del biogás es de 168,2 MW [5].

5.2.1 Catastro de plantas

Según las estadísticas del ministerio de energía el número de instalaciones en Chile en diciembre de 2017 asciende a 104 plantas de biogás. La clasificación de las instalaciones en Chile se muestra en la **Figura 5.5**.

Figura 5.5 *Clasificación de instalaciones de biogás en Chile [4]*

Tabla 5.1. *Plantas de biogás en Chile según tipo de sustrato y tamaño del proyecto [5].*

Sustrato / Tamaño de proyecto	Pequeño 0< kW<180	Mediano 180< kW<900	Grande kW>900	Sin información	Total
Agroindustrial	36	10	16	1	63
Riles	1	1	1	-	3
PTAS	2	-	5	-	7
RSU	2	-	8	14	24
Sin información	7	-	-	-	7
Total	48	11	30	15	104

Tabla 5.2. *Plantas de biogás en Chile según tipo de sustrato y modelo de valorización [5].*

Sustrato / Modelo	Autoconsumo	Inyección red media de presión	Inyección SIC	Quema antorcha	Mixto	Sin información	Total
Agroindustrial	42	-	5	11	2	3	63
Riles	2	-	-	-	-	1	3
PTAS	1	1	-	4	1	-	7
RSU	2	-	4	16	-	2	24
Sin información	6	-	-	-	-	1	7
Total	53	1	9	31	3	7	104

Debido al desconocimiento de la generación de biogás específica de cada planta, no es posible hacer una aproximación estimada de la capacidad máxima instalada en Chile. Sin embargo, para la investigación posterior, se sugiere consultar los datos al Ministerio de Energía, quienes están realizando desde el 2015 un catastro y reglamentación de las plantas de biogás, obligando a las nuevas plantas a partir del 2017 a registrar todos los datos de acuerdo con la normativa vigente [40].

5.2.1.1 Ejemplos de plantas de biogás existentes en Chile

Planta de biogás Fundo El Ánima en Purranque, Osorno: Localizada en Purranque, esta planta cuenta con una capacidad de 32 m^3/día, los desechos de entre 150 a 250 vacas son utilizados para la generación de energía térmica (**Figura 5.6**).

Figura 5.6. *Planta de biogás Fundo El Ánima en Purranque, Osorno [41].*

Planta de biogás Fundo El Coihue en Puyehue, Osorno: Localizada en Puyehue, esta planta posee una capacidad para tratar los desechos de entre 250 a 300 vacas, la potencia instalada es de 27 kVA (**Figura 5.7**).

Figura 5.7. *Planta de biogás Fundo El Coihue en Puyehue, Osorno [42]*

Planta de biogás Fundo El Maqui en Purranque, Osorno: Localizada en Purranque, esta planta tiene la capacidad de tratar los desechos de 180 vacas, obteniendo 21 kVA de potencia. El modelo de utilización de la energía es el autoconsumo.

Figura 5.8. *Planta de biogás Fundo El Maqui en Purranque, Osorno [43]*

5.3 Plantas de biogás en Francia

5.3.1 Catastro de plantas

Según las estadísticas de la asociación técnica del medioambiente y energía el número de instalaciones en Francia en julio de 2018 asciende a 788 plantas de biogás. La capacidad máxima instalada de biogás en Francia es de 10 Twh/año [44].

Tabla 5.3. *Plantas de biogás en Francia según tipo de valorización y tipo de sustrato [44].*

	Metanización	**PTAS***	**IADNP***	**Total**
Cogeneración	406	29	153	588
Biometano	44	7	3	54
Caldera	103	43	-	146
Total	553	79	156+	788

PTAS*: Plantas de tratamiento de aguas servidas
IADNP*: Instalaciones de almacenamiento de desechos no peligrosos.

En Francia los sistemas de cogeneración (producción de electricidad) acceden a facilidades, económicas y técnicas para la inyección en la red eléctrica a través de ayudas del estado y precios incrementados para la venta de energía, además, las empresas distribuidoras tienen la obligación de comprar la energía producida por fuentes renovables no convencionales.
Por otro lado, las plantas productoras de biometano necesitan de instalaciones de purificación y compresión del biogás lo que causa el aumento de los costos de producción. En la siguiente tabla se muestra la producción bruta de energía a partir de biogás.

Tabla 5.4. *Producción total de biogás en Francia [44].*

	Producción electricidad (Gwh)	**Producción biometano (Gwh)**	**Calor cogenerado (Gwh)**	**Calor industrial (Gwh)**	**Total (Twh/año)**
Producción total (mínima)	1898	464	1698	46	4
Capacidad máxima instalada	3612	366	6321	196	10

La diferencia entre la producción total y la capacidad máxima se explica por la incertidumbre ligada al censo, y la tasa de disponibilidad de las instalaciones (paradas por mantenimiento, pérdidas de producción...)

5.3.1.1 Ejemplos de plantas de biogás existentes en Francia

Planta de micro-metanización en Bordeaux, Francia: esta planta procesa alrededor de 300 t/año de desechos orgánicos obtenidos en el mercado de Bordeaux. Los desechos son introducidos a mano, luego estos pasan por las diferentes etapas obteniendo finalmente dos productos: electricidad y digestato seco.

Figura 5.9. *Micro-metanizador de hasta 300 t/año de la empresa BioBeeBox® en Bordeaux, Francia. El tamaño es comparable al de un contenedor de barco.*

5.4 Levantamiento de la información técnica

En esta sección se exponen los componentes técnicos (**Figura 5.10**) necesarios para conformar una planta de biogás de polietileno [45], se escoge este modelo ya que es el más rentable para fabricar en Chile y el más fácil de implementar cuando se tiene una cantidad regular de desechos de bovino.

Figura 5.10. *Componentes biodigestor de polietileno [45].*

1. **Biodigestor de flujo horizontal:** Está compuesto de una geomembrana de policloruro de vinilo (PVC) o de polietileno de alta densidad (HDPE). El tamaño de diseño del biodigestor depende de la cantidad de sustrato a introducir.
2. **Geotextil protector:** Su objetivo es proteger el fondo del biodigestor que está en contacto directo con el suelo.
3. **Tubería de ingreso** de estiércol y **tubería de salida** del digestato.
4. **Estanque de carga de estiércol:** Generalmente es construido de hormigón, su función es recibir el estiércol de vaca.
5. **Estanque de descarga del digestato:** Se encuentra generalmente adyacente al biodigestor. A menudo se construye de hormigón.
6. **Válvula de salida del biogás**.
7. **Válvula de alivio de presión** (incluye válvula de paso).
8. **Filtro para reducir sulfuro de hidrógeno** (H_2S)
9. **Línea de biogás de PVC**.
10. **Válvula de sobrepresión**.

Para la instalación de una planta de biogás de polietileno, debe considerarse además los siguientes componentes:

a. **Construcción del radier:** con el objetivo controlar el flujo del estiércol, los bovinos se encuentran estabulados en el radier, el cual posee cierto nivel de pendiente para que el estiércol fluya en dirección a una canaleta conductora que transporte el estiércol al foso de captación.
b. **Tubería conductora del estiércol:** este conecta el radier con el estanque de carga del biodigestor.
c. **Construcción de pozo de captación y salida del digestor:** las dimensiones dependen del tamaño del biodigestor.
d. **Construcción de la zanja del biodigestor:** Es posible hacer el foso mediante una retroexcavadora. Una vez compactado el piso y estabilizados los taludes se reviste de geomembrana de HDPE para evitar filtraciones. Con respecto a la cubierta del biodigestor es posible utilizar la misma geomembrana o también estructuras armadas de mayor firmeza en base a vigas de metal en función del diseño del biodigestor y su tamaño.
e. **Sistema de agitación electromecánico:** Para el contenido del biodigestor para mantener el proceso de digestión anaeróbica uniforme del sustrato.
f. **Depósito contenedor de biogás producido**.

g. **Instrumentos de medición:** sensor de temperatura, caudalimetro, compresor del gas, medición del pH.
h. **Separador de sólidos/líquidos**.
i. **Grupo electrógeno** (opcional si se quiere valorizar el biogás en electricidad).
j. **Conexión PMGD** incluído su empalme a la red de distribución en media tensión (opcional si se quiere valorizar el biogás en electricidad).

5.5 Conclusiones

Se puede apreciar que la cantidad máxima instalada en Francia (10 Twh/año) es cercana al potencial técnico de Chile (9.375 Gwh/año), lo que nos puede dar una ventana de estudio entre la inversión que se ha hecho en Francia en 788 plantas de biogás y la inversión que se podría implantar en Chile para aprovechar el máximo potencial técnico. No obstante, el consumo y la producción de electricidad en Chile y Francia poseen grandes diferencias. Esta comparación abre una posibilidad de estudio a la inversión que podría considerarse en Chile, pero no es concluyente, finalmente es necesario considerar aspectos tecnológicos, económicos, de población y de consumos energéticos de cada país respectivamente.

6. Emisiones CO_2

Con el fin de establecer una medida internacional de la duración de los gases a efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, el IPCC (grupo intergubernamental de expertos en el cambio climático, por sus siglas en inglés) ha aplicado una unidad común entre todos los gases, esta unidad es el PCG o potencial de calentamiento global, el cual tiene como objetivo convertir las diversas emisiones de gases a efecto invernadero a una unidad comparable a su equivalente en CO_2. En la **Tabla 6.1** se puede apreciar como el metano, es 62 veces más contaminante que el CO_2 a corto plazo (20 años).

Tabla 6.1. *Potencial de calentamiento global (PCG) y duración de los gases a efecto invernadero (GEI) en la atmósfera según el IPCC [46].*

Gas	Duración en la atmósfera (años)	PCG		
		20 años	100 años	500 años
CO_2 dióxido de carbono	**100 años**		**1**	
Metano	12 años	62	23	7,6
Óxido nitroso	114 años	289	298	153
PFC-14 (Tetrafluoruro de carbono)	50 000 años	5 210	7 390	11 200
HFC-23 (Trifluoruro de carbono)	260 años	9 400	12 000	10 000
Hexafluoruro de azufre	3 200 años	15 100	22 200	32 400

Es necesario definir el tipo de emisiones CO_2 que se considera para el estudio. Existen emisiones CO_2 provocadas por los seres humanos, por el hecho de respirar, consumir alimentos, botar basura orgánica, etc., este tipo de emisiones se denomina CO_2 biogénico (CO_{2b}) [47]. Por otra parte, el CO_2 producto de la generación de energía y las fuentes de combustibles fósiles, se denomina CO_2 fósil (CO_{2f}). Algunos autores [47] consideran que en los países industrializados, la deforestación es casi nula, por lo tanto el CO_2 biogénico es

contrarrestado con el CO_2 consumido por la forestación. Sin embargo, en los países donde aún se realiza deforestación, no es posible hacer esta consideración [47]. Finalmente, las emisiones de CO2 evitadas o producidas por generación eléctrica, se señalan como CO_{2e}.

En este capítulo se desarrolla una presentación de las distintas fuentes de CO_2 ligadas a entorno de los desechos orgánicos y la generación de energía a través del biogás, con el objetivo de dar una visión general de las cantidades de CO_2 relacionadas a los proyectos de biogás producido a partir de desechos orgánicos. Finalmente, a modo de reseña financiera, se realiza una breve descripción sobre los créditos de carbono y un pequeño análisis de su precio en el tiempo.

6.1 Emisiones ligadas a la energía

Existen grandes diferencias en las distintas fuentes de producción eléctrica instalada. En la **Figura 6.1** se puede apreciar los distintos porcentajes de la capacidad de producción eléctrica en Chile y en Francia.

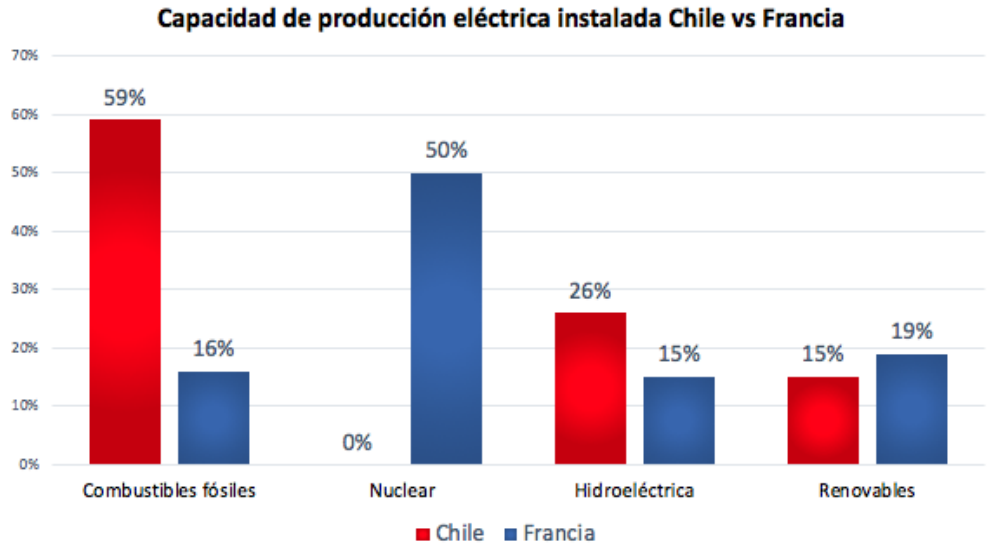


Figura 6.1. *Porcentajes de las fuentes de generación de electricidad en Chile y Francia [2].*

La diferencia más evidente es el uso de la energía nuclear en Francia (50% de la capacidad total), este tipo de energía, junto con la energía hidráulica, emiten considerablemente menos emisiones de efecto invernadero en comparación a otras fuentes de energía (**Figura 6.1**). En Chile el 59% de la energía eléctrica producida proviene de combustibles fósiles, lo que produce grandes emisiones de CO_2 (**Tabla 6.2**). En cuanto a las energías renovables, ambos países están entre el 15 y 20%, los objetivos para el 2050 son 70% de energías renovables en Chile y un 100% en Francia.

Tabla 6.2. *Emisiones de CO_2 por kWh producido por diferentes fuentes de energía [46].*

Emisiones de CO_2 des diferentes fuentes de producción de electricidad								
Modos de producción	Hidráulica	Nuclear	Eólica	Fotovoltaica	Ciclo combinado	Gas natural	Gasolina	Carbón
CO2 / kWh	4g	6g	3- 22	60 - 150	427g	883g	891g	978g

En la **Tabla 6.2** se puede observar que la energía generada a partir de gas natural o combustible gasolina, emite hasta 140 veces más CO_2 que la energía nuclear o la hidráulica. A nivel de emisiones CO2, el biogás es comparable con el gas natural, en consecuencia, si bien el biogás genera más emisiones CO_2 que otros tipos de energía, su principal virtud es solucionar el problema de la gestión de la basura; se sabe que los rellenos sanitarios legales e ilegales emiten una gran cantidad de emisiones a efecto invernadero, no solamente CO_2, sino que también CH_4 (metano) y otros gases nocivos. Estos gases pueden durar muchos años en la atmósfera terrestre (figura iv). Si se tiene en cuenta este factor de emisiones CO2 evitados, las emisiones totales de la energía del biogás corresponden a 77 $kgCO_2e$ por tonelada de desechos orgánicos domésticos metanizados [47].

Si bien la energía eléctrica consumida en Chile emite más CO_2 en su producción, las emisiones CO_2 de Chile con 4 veces inferiores a las de otros países desarrollados como Francia (**Figura 6.2**), esto se debe principalmente a las diferencias de consumo eléctrico.

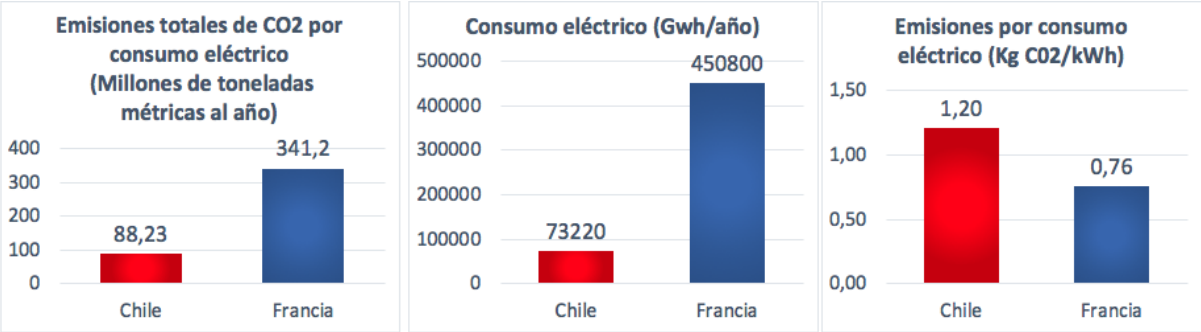


Figura 6.2. *Emisiones de CO_2 ligadas al consumo de energía eléctrica [2].*

Se observa que las emisiones de Chile por kWh eléctrico consumido es 1,2 $kgCO_2$, mientras que en Francia las emisiones alcanzan 0,76 $kgCO_2$ por kWh, esto se debe principalmente al uso de la energía nuclear en Francia, la cual emite muy pocas emisiones de carbono (**Tabla 6.2**).

6.2 Emisiones ligadas a los desechos orgánicos

6.2.1 Descomposición natural

Existe un impacto de emisiones CO_2 producto de la descomposición de los residuos orgánicos al aire libre, por ejemplo, en un relleno sanitario abierto. Estos desechos emiten principalmente CH_4, el cual es alrededor de 23 veces más contaminante que el CO_2.

Tabla 6.3. *Emisiones brutas de metano según el tipo de desechos (equivalente en CO_2) [47].*

Tipo de desecho	Emisiones brutas CH_4 ($kgCO_{2e}$/ton)
Cartón	2933
Papel	3040
Desechos alimentarios	1899

6.2.2 Metanización

La metanización corresponde a la producción de biogás a partir de desechos orgánicos en condiciones favorables, es decir, después de una separación y sin materiales no deseados (plásticos, metales, etc.). Las emisiones CO2 de la metanización provienen de fugas o del funcionamiento de la instalación (transporte, energía para la planta, construcción y mantención, etc.).
En el caso de las fugas las hipótesis son las siguientes [47]:

a) 125 m3 de biogás por tonelada de residuos domésticos
b) 60% de metano en el biogás producido
c) Densidad del CH4 de 0,717 kg por m3 en condiciones normales
d) 0,5% de fugas (hipótesis por defecto)

A partir de estas hipótesis se llega a un valor de 8 $kgCO_{2e}$/ton. Es necesario añadir :

a) 7 $kgCO_{2e}$/ton por el funcionamiento de la instalación
b) 18 $kgCO_{2e}$/ton por la colecta

Finalmente, el factor de emisión es de **33 $kgCO_{2e}$/ton** por tonelada metanizada.

6.2.3 Compostaje industrial

El compostaje tiene por objetivo abonar la tierra a partir de materia orgánica fermentada en aerobia. Se considera :

a) las emisiones de metano “accidentales” que son del orden de 0,5% del carbono inicial según la literatura [47]
b) las emisiones de N_2O
c) la colecta de desechos y el funcionamiento del centro de tratamiento

Para el metano y el N_2O, los valores por defecto son:

a) 952 g de CH_{4b} emitido por tonelada de materia bruta compostada, es decir 26,7 $kgCO_{2e}$
b) 162 g de N_2O emitido por tonelada de materia bruta compostada, es decir 43 $kgCO_{2e}$

Para la colecta, se conserva el valor por defecto de 18 $kgCO_{2e}$/ton, y por el funcionamiento del centro las emisiones son 18 $kgCO_{2e}$/ton. Finalmente, el total de emisiones es de 106 $kgCO_{2e}$/ton (**Tabla 6.4**).

Tabla 6.4. *Emisiones del compostaje industrial [47]*

Gases de emisión	kgCO2e/tonelada de materia bruta
CH4	26,7
N2O	43
Colecta	18,3
Funcionamiento	18,3
Total	**106,3**

6.2.4 Compostaje doméstico

Un estudio de la ADEME en 2016 [48] a permitido caracterizar diferentes tipos (**Tabla 6.5** y **Tabla 6.6.** Emisiones CO_2 por kilogramo de desechos orgánicos.) de compostaje doméstico.

Tabla 6.5. *Casos de compostaje típicos según la ADEME [48].*

Caso	Tipo de compostaje	Composición	Remoción	Duración
Caso 1	Al aire libre	Desechos de jardín	Trimestral	1 año
Caso 2	Al aire libre	Desechos de cocina + desechos verdes (proporción 2:1)	Trimestral	1 año
Caso 3	Al aire libre	Desechos de cocina + desechos verdes (proporción 2:1)	No	1 año
Caso 4	Caja cerrada	Desechos de cocina + desechos verdes (proporción 2:1)	Trimestral solo la mitad superior de la caja	1 año
Caso 5	Caja cerrada	Desechos de cocina + desechos verdes (proporción 2:1)	No	1 año

Tabla 6.6. *Emisiones CO_2 por kilogramo de desechos orgánicos.*

Unidad	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
$KgCO_2$/kg biodesechos	0,39	0,06	0,24	0,10	0,16

6.3 Emisiones ligadas al transporte

En el transporte en camión, una tonelada transportada un kilómetro, emite 0,0584 kg de CO_2 (equivalente GEI) [49].

Tabla 6.7. *Emisiones por transporte, los datos unitarios son expresados por una tonelada transportada un kilómetro.*

	Transporte por camión	Transporte por barco	Transporte por barcaza	Transporte por tren a diesel	Transporte por tren eléctrico
Energía (MJ)	0,7326	0,1052	0,5072	0,2167	0,2482
GEI* (kg eq CO_2)	0,0584	0,0079	0,0402	0,0168	0,0025

*: Las emisiones tomadas en cuenta son el CO2, CH4, N2O, mientras que los factores de impacto son CO2:1, CH4:21, y N2O:310.

6.4 Emisiones CO_2 evitadas

6.4.1 Emisiones ligadas al almacenamiento de desechos

Los centros de almacenamiento de desechos pueden producir grandes cantidades de metano (ver sección 6.2.1), el cual puede ser valorizado. La captura de metano promedio para estos rellenos (**Figura 6.3**) es de 70% [47].

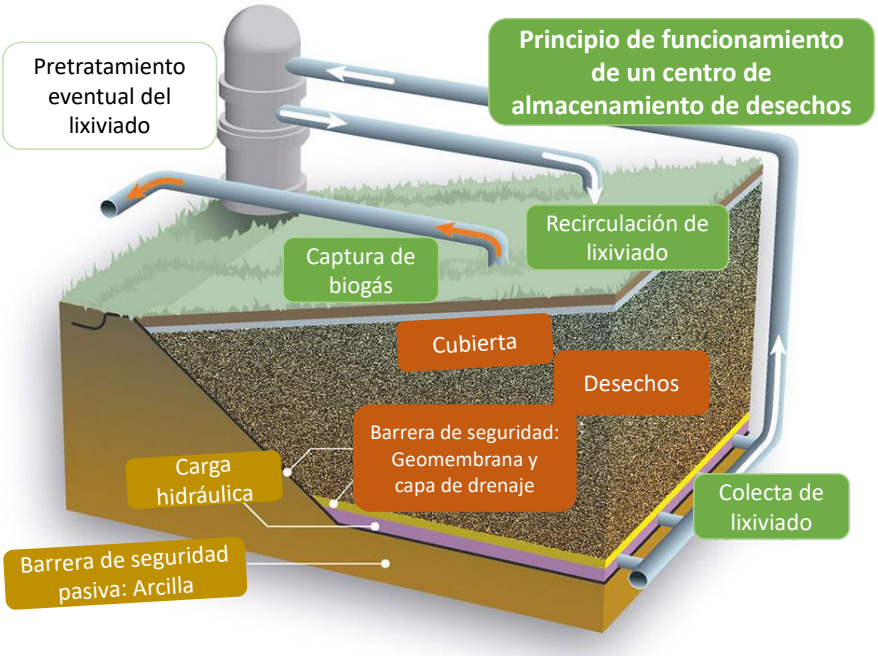


Figura 6.3. *Principio de funcionamiento de un centro de almacenamiento de desechos [50].*

Muchas veces el metano de los rellenos sanitarios no es valorizado, por lo tanto, los datos de emisiones evitadas (**Tabla 6.8**), sólo aplican en el caso de valorizar a través de la generación de electricidad y/o calor. En otros casos el metano se quema en antorcha, este no es un tipo de

valorización, sin embargo, ayuda a reducir las emisiones que se producirían liberando el metano naturalmente a la atmósfera.

Tabla 6.8. *Emisiones evitadas ligadas almacenamiento de desechos a través de la valorización del metano [47].*

Tipo de desecho	Emisiones brutas CH4 (kgCO2e/t)	kgCH4 captado por tonelada	kWhPCI combustión	kWh eléctrico solo	kWh térmico solo	kWh eléctrico cogene-ración	kWh eléctrico cogene-ración
Cartón	2933	82	1133	374	963	374	510
Papel	3040	85	1175	388	998	388	529
Desechos alimen-tarios	1899	53	734	242	624	242	330

Para obtener las emisiones evitadas en cada caso, basta con multiplicar los kWh por el contenido de CO2 del kWh evitado. Se considera un rendimiento eléctrico de 33% en el caso de valorización eléctrica sola o de cogeneración, mientras que, para la conversión térmica se considera un 85% si es valorización térmica sola o 45% en caso de cogeneración. Por ejemplo, en el caso de valorizar el metano recuperado de los desechos alimentarios a través de la electricidad solamente, basta multiplicar 242kWh por las emisiones de CO_2 de consumir esta energía; el valor promedio de emisiones por kWh eléctrico consumido es de 1,2 kgCO2 en Chile y 0,76 en Francia (ver sección 6.1).

6.4.2 Emisiones ligadas a la metanización

La metanización produce dos tipos de productos que evitan emisiones CO_2: a) del metano, valorizado en calor o electricidad; b) del compost (una vez la fermentación terminada), valorizado como fertilizante (en sustituto de las emisiones de producción de la producción de fertilizante). La producción media es de 510kg por tonelada de desechos metanizados. Según estudios realizados en Francia por la ADEME, en el primer caso las emisiones evitadas ascienden a 44 kgCO2e/tonelada, mientras que, en el segundo caso estas alcanzan las 44 kgCO2e/tonelada (**Tabla 6.9**) [47].

Tabla 6.9. *Emisiones evitadas ligadas a la metanización.*

Emisiones evitadas ligadas a la metanización	$kgCO_{2e}$ evitado / tonelada
Metanización	44
Fertilizante	33
Total	**77**

6.4.3 Emisiones ligadas al compostaje

Para el calculo de las emisiones CO2 evitadas debido al compostaje, se presentan las siguientes hipótesis: a) la producción de compost evita el empleo de fertilizantes nitrogenados sintéticos, lo que permite evitar las emisiones de producción de este abono (las emisiones de N_2O luego del riego son consideradas como invariantes), b) una fracción de CO2 contenida en el compost esparcido será absorbido por el suelo, creando una reserva orgánica. La **Tabla 6.10** presenta los nutrientes que se encuentran en el compost, la cantidad del elemento por tonelada de

compost, las emisiones de fabricación cuando se trata de productos sintéticos o de la extracción minera, el total evitado utilizando una tonelada de compost en vez del fertilizante sintético o de extracción minera [47].

Tabla 6.10. *Emisiones evitadas debido al compostaje relacionadas con la producción sintética o extracción minera de nutrientes.*

Nutrientes	Kg de nutrientes por tonelada de compost	Emisiones de fabricación sintética kgCO2e/ kg de nutriente	Total evitado (kgCO2e / tonelada de compost)
Nitrógeno (ácido nítrico)	6,2	5,28	32,6
Fósforo (P2O5)	2	0,51	1,1
Potasio (K2O)	4,5	0,37	1,8
Total			**35,6**

Se debe tomar en cuenta que se necesitan 3,3 toneladas de desechos fermentables para hacer una tonelada de compost, esto significa que, por una tonelada de desechos fermentables, las emisiones evitadas son 35,6 / 3,3 ≈ 11 kg eq CO_2 por tonelada de desechos compostada.

Para la proporción absorbida por el suelo, se considera un 8% de CO_2 [47]. Este dato conteniendo en promedio 660 kgCO2e por tonelada. Entonces, 660 [$kgCO_{2e}$ por tonelada de compost] × 8% / 3,3 [toneladas de desechos por tonelada de compost] ≈ 16 $kgCO_{2e}$ por tonelada de desechos (**Tabla 6.11**).

Tabla 6.11. *Emisiones evitadas ligadas al compostaje.*

Emisiones evitadas ligadas al compostaje	$kgCO_{2e}$ evitado / tonelada compostada
Producción de nutrientes para fertilizante	11
Absorción de CO_2 por el suelo	16
Total	**27**

6.5 Créditos de carbono

Los créditos de carbono son un tipo de unidad que comúnmente equivale a una tonelada de CO_2 y que permite hacer transacciones entre empresas o países con el objetivo de reducir las emisiones de CO_2 totales a la atmósfera a través del incentivo monetario. Es decir, si una empresa excede el máximo de emisiones CO_2 permitidas por la autoridad competente, esta empresa tiene la posibilidad de comprar créditos de carbono a otra empresa, para "reducir" sus emisiones, de esta forma el objetivo es que las empresas evalúen la conveniencia de utilizar energías renovables para no verse en la obligación de pagar créditos de carbono o multas. Por otro lado, las empresas que pueden vender créditos de carbono se benefician monetariamente de contar con una energía limpia. Para poder vender créditos de carbono, la empresa o institución debe someterse a una certificación entregada por la autoridad competente.

Existen principalmente dos tipos de créditos de carbono: Los EUA o European Union Allowances, créditos de carbono que pueden ser intercambiados solo en Europa, y los CERs o Certified Emission Reductions, que pueden ser intercambiados a nivel mundial y que son

emitidos por el consejo ejecutivo del Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM por sus siglas en inglés). Las reducciones para las que se emita un CER son conseguidas a través de un proyecto CDM y verificado por una Entidad Operacional Designada (DOE por sus siglas en inglés) bajo las reglas del protocolo de Kioto [51].

En Chile, los créditos de carbono obtuvieron gran éxito entre 2008 y 2012, posicionando al país como uno de los referentes mundiales de la venta de créditos de carbono CERs [52] debido a su confiabilidad. Posteriormente, otros países de Sudamérica se unieron a esta distribución de CERs.

6.5.1 Precios créditos de carbono (EUA vs CER)

En la **Figura 6.4** la curva azul muestra el precio de los créditos de carbono EUA, solo intercambiables en Europa, mientras que la curva roja muestra los CER, créditos de carbono intercambiables a nivel mundial. Se puede apreciar una caída significativa del precio de venta de créditos de carbono CER en 2012. Esto se debe a que el protocolo de Kioto (ver sección 6.4.2), acuerdo donde se gestionan los Mecanismos de Desarrollo Limpio (CDM) y que compromete a diferentes países del mundo a tomar responsabilidad por el cambio climático, finaliza en el año 2012. Existe una extensión de este acuerdo que actúa entre el 2012-2020, sin embargo, esta extensión está inválida hoy en día, ya que faltan países que ratifiquen su participación en el protocolo [53].

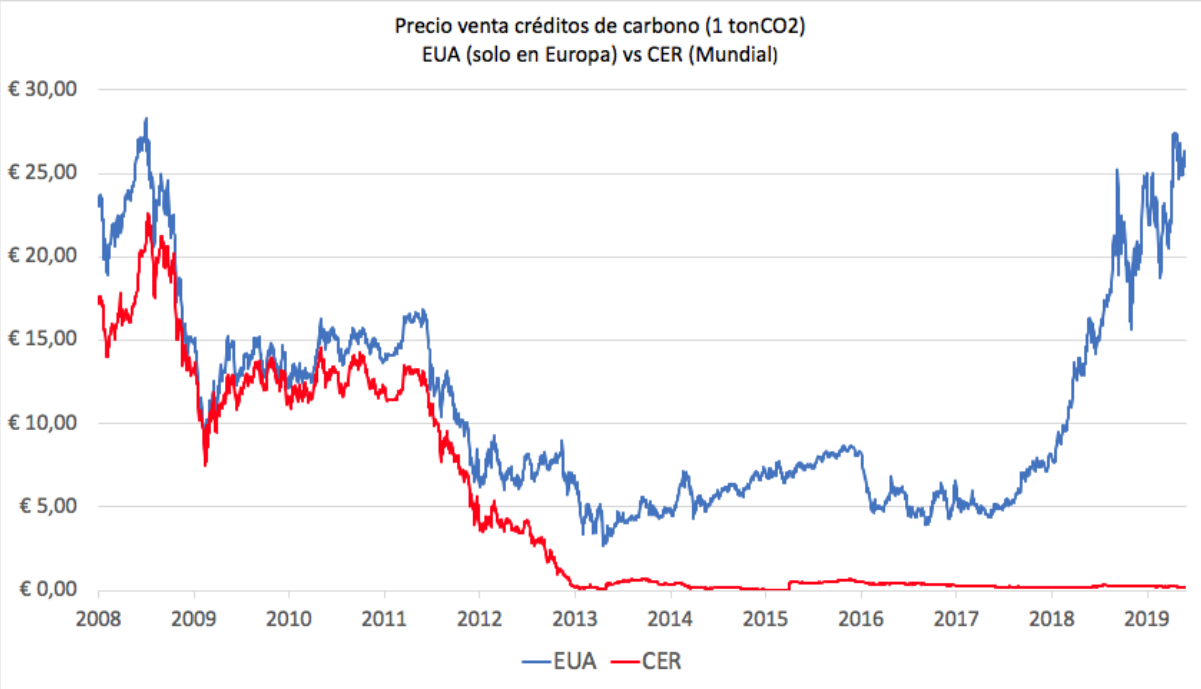


Figura 6.4. *Precio de venta de créditos de carbono en Euros (€) [54].*

6.5.2 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto (**Figura 6.5**) es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Es firmado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón y efectivo el 16 de febrero de 2005.

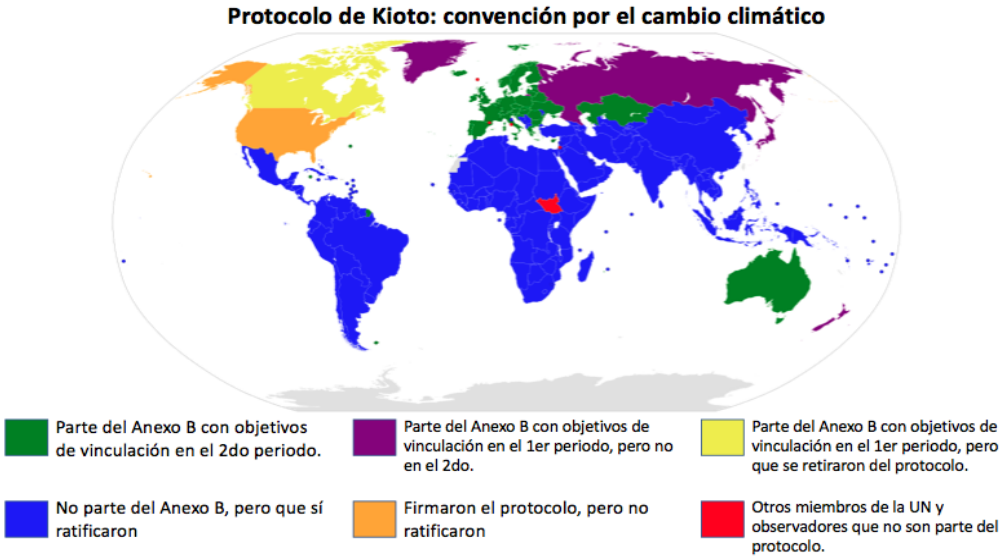


Figura 6.5. *Participación en el protocolo de Kioto [55].*

El Anexo B, compromete a los estados que lo firman a disminuir sus emisiones CO_2 en el periodo estipulado. Por otra parte, Estados Unidos decidió no participar, alegando que China e India contaminan en mayor cantidad y que el hecho de participar tendría consecuencias negativas para la economía del país. Canadá decidió retirarse del protocolo, al obtener resultados contrarios a los objetivos de disminuir las emisiones [55].

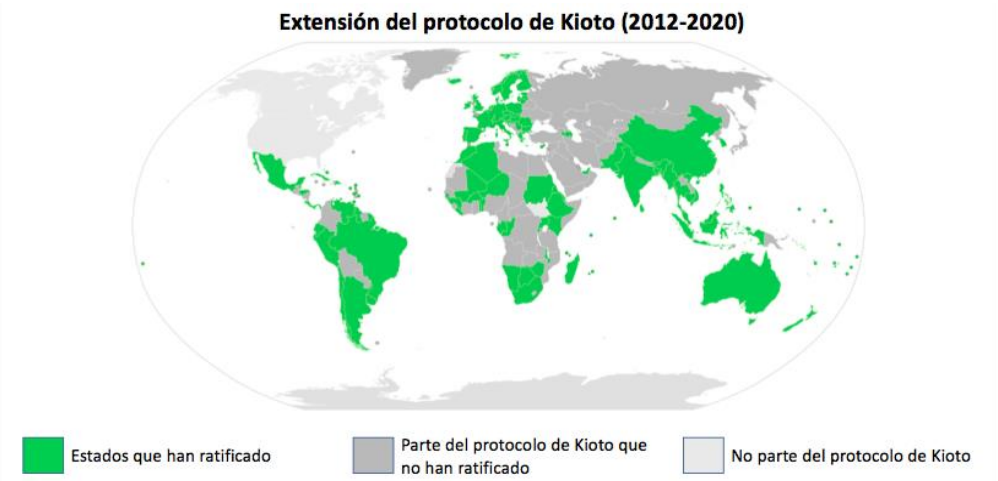


Figura 6.6. *Participación en la extensión del protocolo de Kioto [55]*

La extensión del protocolo de Kioto (**Figura 6.6**) se firma el 11 de diciembre de 1997, la condición para su validación es la ratificación de 144 estados de un total de 192. A la fecha son 128 estados los que han ratificado [53].

7. Caso de estudio: Sector la Beaujoire en Francia

En el cuadro de un estudio realizado para el proyecto de opción de la Escuela de ingenieros del IMT-Atlantique y desarrollado en conjunto con el proyecto de emprendimiento ALTHA, se presenta a continuación un estudio de implementación de una planta de micro-metanización para los desechos orgánicos del sector la Beaujoire que contempla dos grandes cadenas de supermercados: Carrefour y Leclerc la Beaujoire, Nantes, Francia.

Este caso de estudio se presenta con el objetivo de seleccionar una tecnología y capacidad de la planta, generando una descripción valorizada del proceso y los componentes. Para simplificar la información presentada, se han omitido los análisis ambiental y legal, los cuales son esenciales para llevar a cabo un proyecto de este tipo.

7.1 Introducción

En el sector la Beaujoire en Nantes existen dos supermercados de gran área capaces de generar una importante cantidad de desechos orgánicos. Por un lado, Carrefour la Beaujoire en la ciudad de Nantes (**Figura 7.1**), posee un área de venta de 14500 m^2 y con alrededor de 3 millones de visitas al año. Por otro lado, E. Leclerc la Beaujoire cuenta con un área de 12000 m^2 y una cantidad de visitas similar a Carrefour.

Figura 7.1.*Ubicación de la ciudad de Nantes y Carrefour la Beaujoire (Fuente: elaboración. propia).*

7.2 Cuantificación de desechos orgánicos

7.2.1 Metodología

Con el fin de estudiar la tipología y el volumen de bio-desechos generados por los diferentes productores del sector la Beaujoire, ha sido generada una lista de estos últimos. La metodología para la cuantificación de los desechos se trata de establecer contacto con los actores para explicar el proyecto, preguntar si existe un potencial interés en participar, y finalmente

preguntar por la cantidad de bio-desechos que generan y si tienen implantado un sistema de gestión de estos. Esta información es recopilada en una tabla mostrada a continuación. Para las empresas con restaurantes, el tonelaje anual de bio-desechos generados es calculado estimando 200 gramos en promedio el peso de los desechos correspondiente a cada plato de servido (restos de comida y restos de la cocina), para un número de días de servicio de 300 días al año. Esta estimación por los 200 proveniente del informe de investigación llamado "Implantación de un sistema de separación de bio-desechos y su generalización" publicada por la Ademe en 2015. Los entregables corresponden a un estudio de cuantificación de bio-desechos y una cartografía del sector la Beaujoire que resume visualmente los tonelajes anuales por cada actor participante del proyecto.

7.2.2 Resultados obtenidos

En la **Figura 7.2** se presenta una cartografía que muestra la localización de diferentes empresas de alimentación (restaurantes, comida rápida...) y de gran distribución (centro comercial, supermercados...) que participan en el estudio, así como las cantidades de bio-desechos respectivamente.

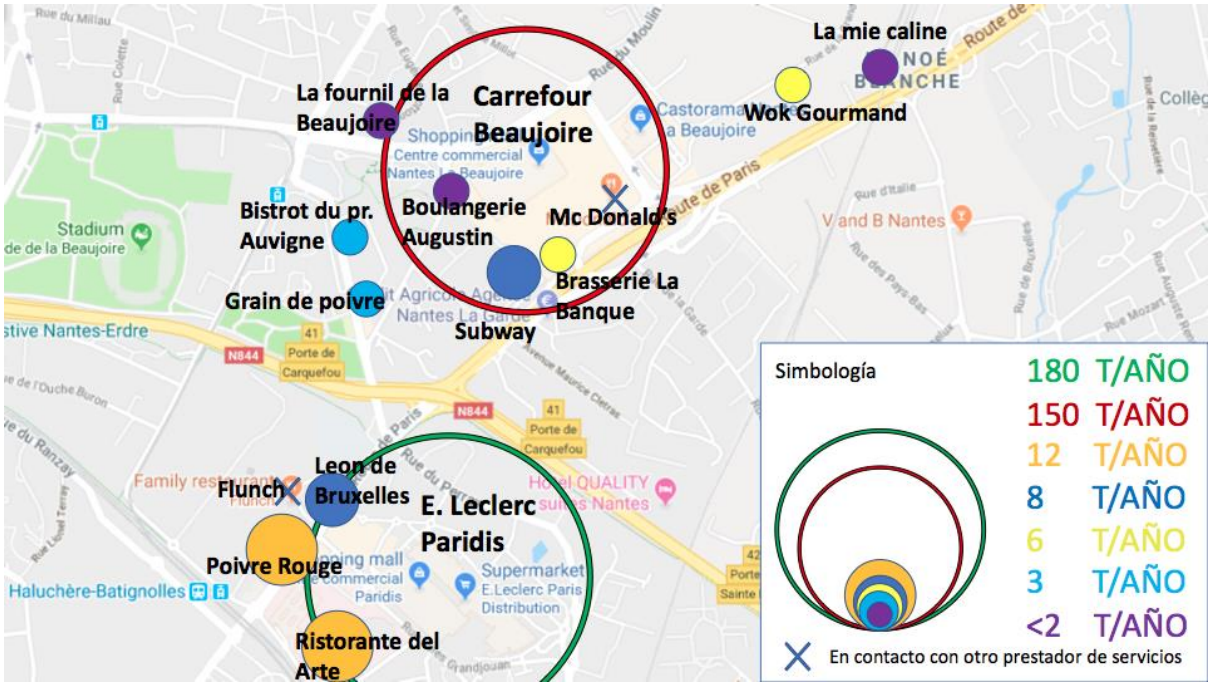


Figura 7.2. *Cartografía de los productores de desechos del sector la Beaujoire y sus cantidades de bio-desechos en toneladas por año (Fuente: elaboración propia).*

Los productores marcados con una "cruz azul", dígase Mc Donald's y Flunch, no han participado en el estudio debido a un contrato legal permanente con otros prestadores de servicio de gestión de desechos alimentarios.

La información obtenida se recapitula en la **Tabla 7.1.** Recopilación de la cantidad, tipo e implementación de separación de bio-desechos del sector la Beaujoire.

Tabla 7.1. *Recopilación de la cantidad, tipo e implementación de separación de bio-desechos del sector la Beaujoire.*

Supermercados	Número de platos servidos/día	Tonelaje de bio-desechos (t/año)	Tipo de bio-desechos	Separación de desechos implementada
Carrefour	-	150	a granel + envasados	Sí
Leclerc	-	180	a granel + envasados	Sí
Restaurantes				
Boulangerie Augustin	-	1,56	Masas de pan	No
Brasserie La Banque	100	6	Sobras	No
Subway	140	8,4	Sobras + cáscaras de verduras	No
Wok Gourmand	100	6	Sobras + desechos de cocina	No
La mie câline	-	1,5	Pan + masas	No
Ristorante Del Arte	200	12	Sobras	No
Poivre Rouge	195	11,7	Sobras	No
Léon de Bruxelles	130	7,8	Sobras + conchas de almejas	No
Au bistrot du professeur Auvigné	60	3,6	Sobras	Sí
Le fournil de la Beaujoire	-	1,5	Pan + masas	Sí
Le grain de poivre	40	2,4	Sobras	Sí
TOTAL TONELAJE		392,5		

7.2.3 Análisis y conclusiones

La cantidad total de bio-desechos generados por los productores de La Beaujoire que respondieron positivamente a participar en el estudio es cercana a las 400 toneladas por año, cabe señalar que Carrefour y Leclerc contribuyen con la mayor parte, aproximadamente 150 y 180 toneladas anuales.
Estos desechos son de tipos variados, especialmente por el hecho de que una parte está "a granel" y la otra parte embalados, generalmente en paquetes plásticos, lo que obliga a implementar un sistema de desembalaje para introducir estos desechos en el metanizador.

En el caso de **Lerclerc Paridis**, los bio-desechos son almacenados en cajas de 770 litros. El retiro de una de estas cajas cuesta 22€ y 16€, para los desechos con embalaje y sin embalaje respectivamente, lo que corresponde a un monto total para la empresa de 25k€ para el año 2016-2017 y de 18k€ para el año 2017-2018, ya que Lerclerc realizó una campaña interna para bajar el volumen de desechos producidos. Los bio-desechos envasados representan de 57 a 58% de los desechos alimentarios totales generados por la tienda.

Por otro lado, para **Carrefour Beaujoire** se presenta un diagrama (**Figura 7.3**), que detalla la tipología de los desechos generados en 2017 y sus cantidades. En la simbología de este

diagrama, “PBOX” corresponde a las cajas de desechos de dimensiones nombradas, “MO CONDITIONNE” corresponde a materia orgánica envasada, y “C3 VRAC” corresponde a los desechos “a granel” que no son ni frutas ni verduras (pan, pasteles...) En el eje horizontal se muestra el mes del año y en el eje vertical el número de cajas recolectadas por artículo.

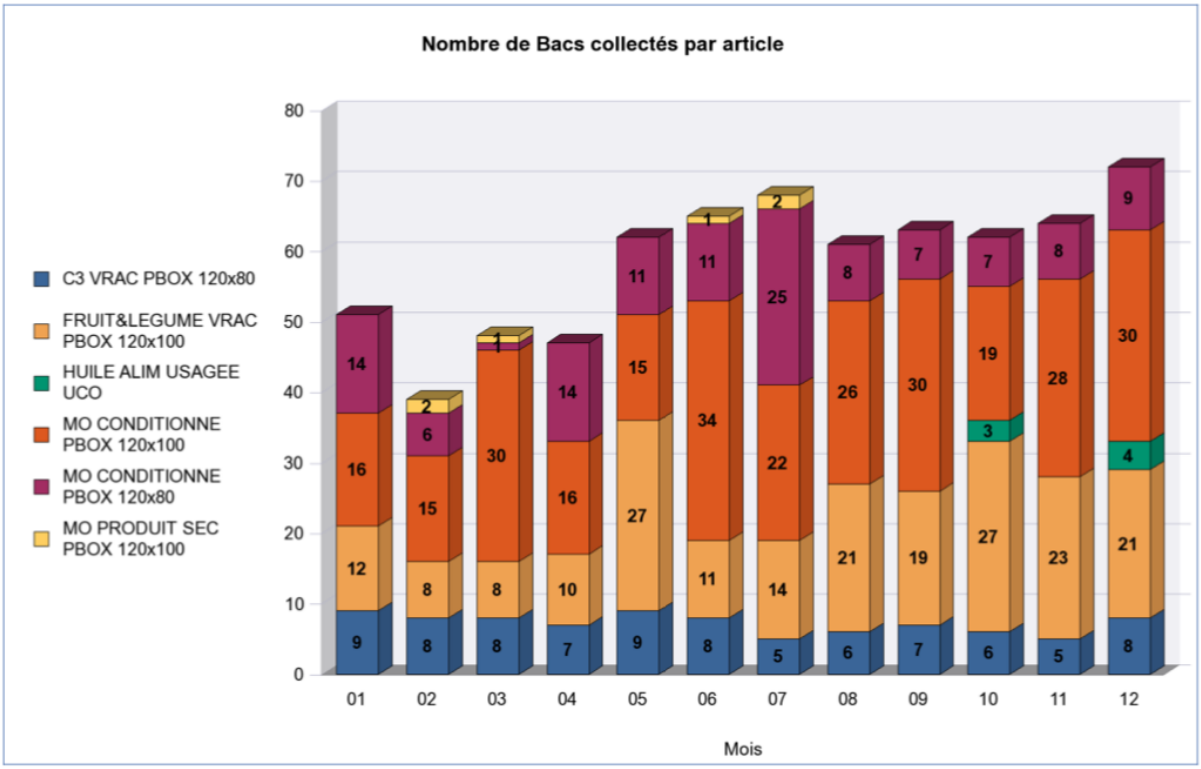


Figura 7.3. *Tipología y cantidad de desechos generada por Carrefour Beaujoire en 2017 (Fuente: M. Lionel Egonneau, jefe técnico de Carrefour Beaujoire).*

La mayor parte de los desechos de Carrefour se presentan en cajas de 120 cm de largo y de ancho variable, como lo muestra la **Figura 7.4**. Los alimentos que todavía pueden ser consumidos son donados a asociaciones sociales con el objetivo de evitar el desperdicio de alimentos. A la izquierda se muestran desechos envasados o “conditionnés” (en francés) y a la derecha se muestran “a granel” o “en vrac” (en francés).

Figura 7.4. *Cajas de bio-desechos generadas por Carrefour Beaujoire.*

En conclusión, la cantidad máxima de bio-desechos generados por los productores del sector de la Beaujoire es estimada en 400 toneladas anuales, información que permite dimensionar la implantación del metanizador. En consiguiente, debido a que cerca de la mitad de los desechos están envasados, es necesario considerar una inversión extra en el sistema, es decir, una máquina de desembalaje o un operador a sueldo que efectúe esta operación con el fin de poder valorizar estos desechos.

7.3 Diagnóstico energético

7.3.1 Metodología

Un diagnóstico energético ha sido establecido para el centro comercial y supermercado Carrefour Beaujoire. Para lograr esto, se programó una visita con el director técnico Sr. Lionel Egonneau, con el fin de comprender el funcionamiento de la red eléctrica y de calor instalada, y obtener datos en cifrados del consumo del edificio y sus equipos.

7.3.2 Resultados obtenidos

El supermercado Carrefour es alimentado por dos grandes fuentes de energía: la electricidad y el gas natural. La electricidad es entregada por EDF, una compañía de eléctrica en Francia, sin embargo, también poseen dos grupos electrógenos en caso de corte de energía. Carrefour también está realizando un proyecto de paneles solares para el autoconsumo. Finalmente, el gas natural es entregado por ENI.

Un estudio de los datos de consumo de los últimos 3 año ha permitido estimar el precio medio de la electricidad y del gas que utiliza Carrefour. En promedio, la provisión de energía para el edificio tiene un costo de 7c€ por kWh. En comparación, la tarifa de compra de electricidad impuesta por el gobierno y producida por un metanizador es de 17,5 c€ por kWh. Así mismo, el costo de la calefacción a gas se eleva a 4c€ por kWh. Estos precios son bastante estables de año a año y varía sólo en pequeños porcentajes que pueden ser despreciables para un estudio comercial.

El gas natural es utilizado de dos formas: directamente en los hornos de la panadería-pastelería de la tienda y en la red de calefacción. Existen dos calderas de 700 kW de potencia que alimentan el edificio. El agua calentada a 60 ºC circula en 3 redes: para la tienda, para el centro comercial y para las oficinas, que están conexas a intercambiadores de placas permitiendo mantener una temperatura de 20 ºC. Por otro lado, existen 32 centrales de tratamiento de aire instaladas en el techo de la tienda, de las cuales 21 permiten la climatización (enfriamiento) y 11 permiten la climatización y calefacción a la vez.

La electricidad es utilizada para varios fines: producción de frío para refrigeración de los alimentos, lo que representa un 25% del consumo total, la alimentación de diferentes hornos y la luminosidad LED de la tienda. Además, puede producir calor en caso de necesidad.

La tienda consume en promedio 676 kW de electricidad en a semana y 230 los fines de semana para mantener la producción de frío. Esta proviene de una línea de alta tensión de EDF a 20 kV, la cual es transformada a 380 V. Dos grupos electrógenos son instalados en los locales con

el fin de alimentar en caso de emergencia. Estos son probados dos veces por mes durante una hora.

Finalmente, un proyecto de instalación de paneles fotovoltaicos en el techo de un estacionamiento semicubierto permitirá la generación de 500 kW de electricidad. El grupo Carrefour se encuentra en una dinámica de transición energética y se compromete a una reducción del 40% de sus emisiones de CO_2 de aquí al 2050.

7.3.3 Análisis y conclusiones

El diagnóstico energético ha permitido establecer las posibles conexiones a la red de Carrefour para analizar los diferentes escenarios posibles. Se considera a la cogeneración la fuente energética más adaptable según el tipo de consumo de la tienda. De esta forma, una vez que los precios están definidos, la producción de electricidad será vendida y el calor generado será utilizado para el autoconsumo.

7.4 Selección de la tecnología y capacidad

7.4.1 Presentación general

Con el fin de concretizar el proyecto, uno de los puntos primordiales es la elección del modelo de metanizador a implementar en función de las características y necesidades de las empresas de gran distribución y de los restaurantes de la Beaujoire, especialmente en términos de las cantidades de bio-desechos a tratar. En consiguiente, un benchmark de constructores locales ha sido realizado. Con el fin de disminuir los costos de transporte e instalación, y fomentar una economía local, se han seleccionado empresas francesas y europeas en primera instancia. Dos entrevistas a empresas francesas e inglesas fueron realizadas por llamada telefónica entre ellas Qube Renewables® (**Figura 7.5**) y SEaB®, además de una visita al micro-metanizador de BioBeeBox® en Bordeaux, Francia. A continuación, se muestra una tabla con las empresas constructoras consultadas.

Tabla 7.2. *Recapitulativo des capacidades y precios de metanizadores de cuatro constructores consultados.*

Empresa	QUBE renewables	SEaB energy	TRYON Environnement	Bee & Co
Estado de desarrollo	Bien establecido	Bien establecido	Demostrador	Demostrador
País	Inglaterra	Inglaterra	Francia	Francia
Producto	**BioQube®**	**Flexibuster®**	**Module'O®**	**BioBeeBox®**
Capacidad	Modelo pequeño: 183 t/año Modelo grande: 441 t/año	200 a 1000 t/año	1000 a 6000 t/año	80 a 1000 t/año

Figura 7.5. *Metanizador Biocube® 40 localizado en Howard Tenens, Inglaterra [56].*

Este metanizador genera 93 m^3 de biogás por tonelada de desechos alimentarios. El flujo de alimentación es de 500 kg/día y genera 44,683 kWh/año en electricidad y 60,532 kWh/año térmico. Estas tecnologías son emergentes, y el medio es muy competitivo, por lo que los datos de las cotizaciones obtenidas son confidenciales y han sido recolectadas con cierta dificultad. A su vez, el contacto con un tesista de doctorado del IMT-Atlantique, que trabaja en un demostrador de metanizador en el laboratorio, ha permitido comparar las datos y tecnología con el fin de analizar y tener una visión crítica de los datos entregados por los constructores.

7.4.2 Dimensionamiento

7.4.2.1 Metodología

Para el dimensionamiento del proyecto, se determinan de manera cuantificada diferentes escenarios para el tratamiento de los bio-desechos. Estos, dependen de la fuente de los desechos (si son envasados o no), su ubicación y su equivalencia energética, así como la cantidad de compost generado del proceso de metanización. Para lograr esto, se establecen diferentes casos de estudio que permiten deducir las magnitudes deseadas. Así mismo, es importante reflexionar sobre la zona en la que el metanizador será instalado, se debe tener en cuenta que la normativa exige una cierta distancia entre la planta y cualquier edificio.

7.4.2.2 Hipótesis

Una lista de parámetros variables del proyecto toma en cuenta las diferentes posibilidades de cantidades de bio-desechos a revalorizar en función de los productores de la zona (**Tabla 7.3**): La cantidad y la fuente de los desechos, el número de plantas a instalar, el tipo de valorización del biogás y la valorización o no del digestato.

Tabla 7.3. *Lista de parámetros a definir para el dimensionamiento de una unidad de metanización.*

Fuentes de bio-desechos	Modelo valorización del biogás producido	Número de metanizadores a implementar	Valorización del digestato producido
1. Carrefour 2. Leclerc 3. Pequeños productores del sector 4. Particulares	1. Caldera 2. Cogeneración 3. Inyección en la red 4. Almacenamiento	1. Un metanizador en Carrefour 2. Un metanizador en Carrefour y otro en Leclerc	1. Relleno agrícola 2. Compostaje 3. Fertilizante

A partir de esta lista de parámetros, la selección para el estudio es la siguiente:

Fuentes de bio-desechos: En primera instancia se consideran los productores de bio-desechos Carrefour y Leclerc debido a la cantidad que estos aportan y a la dificultad de sumar a los pequeños actores en la conformación del proyecto.
Debido a que el sector la Beaujoire es bastante amplio y ambas cadenas de distribución son competencia directa, es necesario abordar diferentes escenarios de participación en el proyecto. Es decir, en qué lugar se implementará la planta, que tipo de desechos serán tratados (envasados o no), y quien recibirá la energía producida en el caso de una mutualización de los desechos. A continuación, la **Tabla 7.4** representa los escenarios posibles con o sin mutualización y utilizando solo los desechos a granel o también los envasados.

Tabla 7.4. *Escenarios propuestos para micro-metanización con sus volúmenes correspondientes.*

Escenario	1		2	3		4
	Carrefour	Leclerc	Mutualización	Carrefour	Leclerc	Mutualización
Descripción	Desechos a granel	Desechos a granel	Desechos a granel Carrefour y Leclerc	Desechos a granel + envasados	Desechos a granel + envasados	Desechos a granel + envasados, Carrefour y Leclerc
Desechos a granel (toneladas /año)	80	115	195	80	115	195
Desechos envasados (toneladas /año)	0	0	0	74	65	139
Total desechos (toneladas /año)	80	115	195	154	180	334

Estos escenarios implican cada uno organizaciones logísticas diferentes y generan diferentes costos de transporte, análisis y de desembalaje.

Modelo de valorización: la valorización por cogeneración es retenida por razones técnico-económicas: la caldera a gas es útil sólo en invierno, ya que la tienda no tiene necesidad de calefacción en verano. La inyección o el almacenamiento de gas no se presenta como una solución viable a esta escala, ya que por la cantidad reducida de bio-desechos, los costos de tratamientos son muy altos y los puntos de inyección en Francia son reducidos. El calor es utilizado para calentar el metanizador y secar el digestato para obtener un compost sólido. Los excedentes son utilizados a través de un intercambiador de calor para calentar el agua sanitaria,

evitando una parte del consumo de gas para calefacción. Toda la electricidad es vendida a la red a una tarifa impuesta por el estado. El consumo de electricidad del metanizador es suministrado por la electricidad disponible en la red.

Número de metanizadores a implementar: La elección del escenario final se efectúa luego de una reunión con los productores en cuestión. Un balance técnico económico descrito en la siguiente sección permite evaluar la viabilidad y tener una idea de costos de inversión, de mantenimiento y de logística, que tendrán lugar en el proyecto.

Valorización del digestato: En todos los escenarios previstos es necesario realizar al final del proceso un análisis al digestato, en consecuencia, son posibles tres opciones para su valorización:

1. Puede ser acondicionado en el sitio y ser vendido a particulares bajo la forma de sacos de compost, lo que requiere hacer un análisis para cumplir con las normas impuestas.
2. Puede ser recuperado por una empresa de compost, la cual proveerá luego a los agricultores para utilizarlo como relleno y fertilizar las tierras.
3. Finalmente, es posible reutilizarlo directamente en la tienda del centro comercial como nutriente para las plantas en el sitio. Esta es la solución menos costosa y la más sostenible ya que promueve una economía circular.

7.4.2.3 Conclusiones

Se han presentado de manera cuantificada diferentes escenarios para la revalorización de los bio-desechos, la elección final es presentada luego del balance técnico económico descrito a continuación.

7.4.3 Balance técnico económico

7.4.3.1 Metodología

En el balance técnico económico de los diferentes escenarios, se consideran los diferentes costos asociados al proyecto. De este modo, se presentan los ítems y los valores (**Tabla 7.5**) para determinar los costos de inversión inicial (CAPEX), los costos de operación anuales (OPEX), la utilidad de la instalación proviene principalmente de la “colecta evitada”, es decir, los ahorros en transporte de los bio-desechos, y a su vez de los productos de la metanización, permitiendo finalmente un balance económico de la instalación a través del margen neto anual y del RSI (retorno sobre la inversión) por año. En consiguiente, se presentan los datos para establecer un balance energético de cada una de las soluciones previstas. La **Tabla 7.5** entrega datos para simular cada uno de los escenarios, según las tecnologías propuestas por los constructores.

Tabla 7.5. *Costos y balance considerado en el balance técnico económico de cada uno de los escenarios.*

ESCENARIO X	**Descripción**			
Datos				
Colecta actual	**A granel Carrefour**	**Desembalados Carrefour**	**A granel Leclerc**	**Desembalados Leclerc**
Tonelaje valorizado (toneladas)				
Precio de colecta (€/tonelada)				
Costo electricidad (€/kWh)				
Tarifa de venta electricidad (€/kWh)				
Tarifa de venta del compost (€/tonelada)				
CAPEX	***SEaB Energy (Flexibuster)***	***QUBE Renewables (BioQube)***	***Bee&Co (BioBeeBox)***	***Tryon (Modul'O)***
Sistema (€)				
Desembalador (€)				
CHP* (€)				
Instalación (€)				
Formación				
Estudio prefactibilidad (€)				
Desembarco (€)				
Total				
OPEX				
Consumo de calor (€/año)				
Consumo de electricidad (€/año)				
Supervisión				
Colecta del digestato				
Mantención y reparación (€/año)				
Transporte				
Total				
Balance energético				
Factor de carga				
Potencial metanógeno (M^3 CH_4 / tonelada)				
Composición biogás				
Eficiencia eléctrica				
Eficiencia calórica				
Electricidad producida (Kwh/año)				
Calor producido (kWh/año)				
Consumo en electricidad (kWh/año)				
Calor neto disponible (kWh/año)				
Digestato disponible (tonelada/año)				
Agua consumida (tonelada/año)				
Compost disponible (tonelada/año)				
Aguas usadas (toneladas/año)				
Utilidades				
Colecta evitada (€/año)				
Electricidad vendida (€/año)				
Calefacción ahorrada (€/año)				
Compost vendido (€/año)				
Total				
Balance				
Margen neto				
RSI (años)				

*CHP: Combined heat and power (cogenerador)

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten la generación de gráficos comparativos para tomar decisiones en cada uno de los escenarios en relación con las tecnologías a utilizar. Luego, una comparación de los diferentes resultados permite una conclusión.

Se han establecido las siguientes hipótesis:

1. El consumo del sistema BioBeeBox es estimado por la media del consumo en electricidad y en calor del sistema BioQube y Flexibuster.
2. Los costos de envío y reparto para SEaB son estimados en relación con los propuestos por Qube Renewables, ambas tecnologías son ensambladas en Inglaterra y transportadas a Francia en barco.
3. Se estima que es posible separar la fase líquida y la sólida del digestato en un 85% para cada una de las tecnologías. Solo la BioBeeBox permite un secado para venderlo en forma de compost. Para los otros, se estima poder revalorizar el digestato solo en un 25% del precio de compost por tonelada.
4. Los costos de mano de obra no son considerados en este estudio, ni antes del proceso ni durante la alimentación del metanizador, ni tampoco en el acondicionamiento del digestato.
5. No existen costos de supervisión.
6. No se toma en cuenta la colecta del digestato, ya que existen pocas soluciones disponibles en la región, pero un acondicionamiento y una reventa en el sitio son posibles.
7. Solo Qube Renewables y Tryon ofrecen un desembalador. Entonces, es supuesto encontrar otra tecnología de desembalador cuando sea necesario, a nivel de 1.4 veces el precio considerado para Qube Renewables.
8. No existe información del volumen másico de los envases de los desechos. Se considera que el peso de los desechos desembalados corresponde a la masa de materia valorizable energéticamente.

7.4.3.2 Resultados obtenidos

Se efectúa una simulación en Excel para cada uno de los escenarios con cada una de las tecnologías disponibles. El detalle de cada una de las simulaciones está disponible en el anexo. Los resultados se presentan como gráficos donde se comparan los Payback de cada una de las tecnologías, este es el criterio más determinante para los clientes.

Escenario 1.

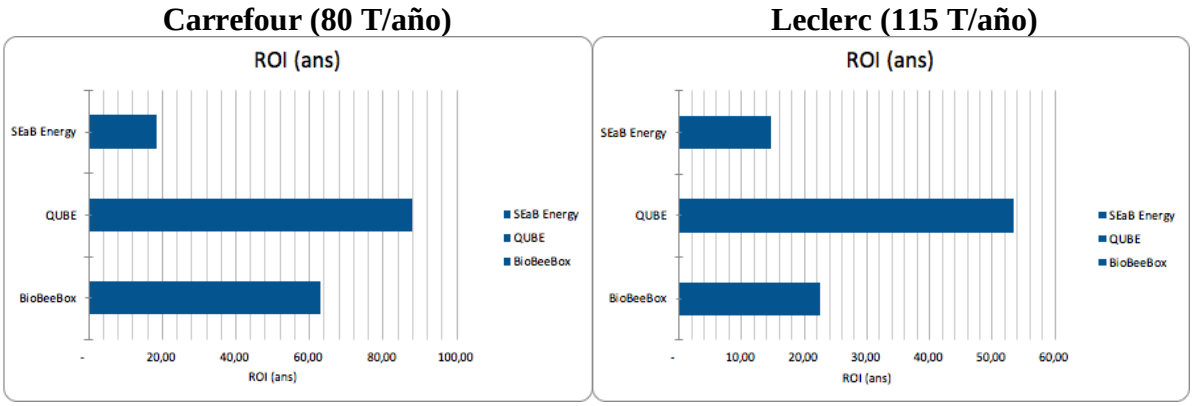


Figura 7.6. *Payback o ROI (return on investment) de las tres tecnologías consideradas para el escenario 1.*

A la izquierda el RSI de Carrefour y a la derecha Leclerc, el eje de las abscisas se muestra en años.

Escenario 2.

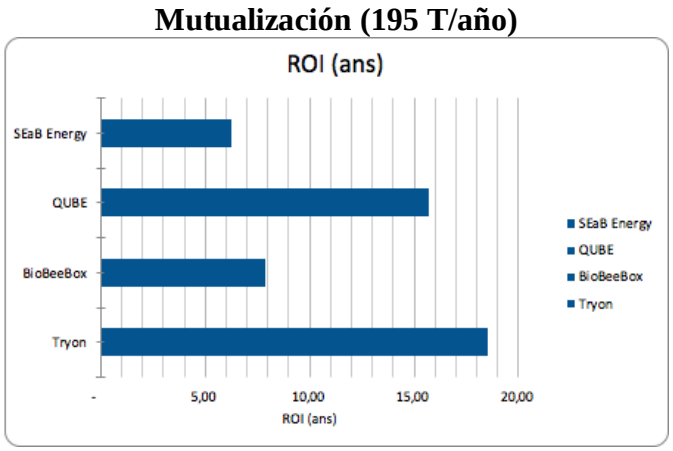


Figure 7.7. *Payback o ROI (return on investment) de las cuatro tecnologías consideradas para el escenario 2 en mutualización en Carrefour.*

Escenario 3.

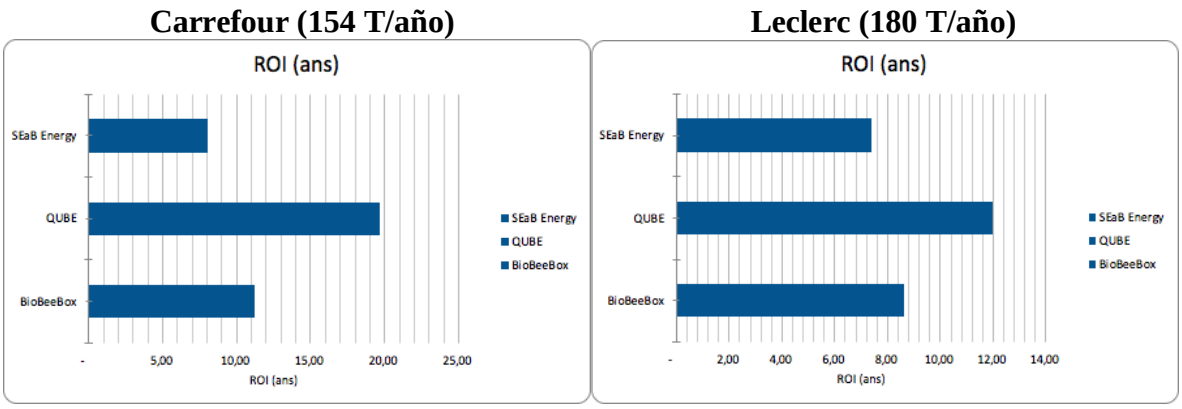


Figura 7.8. *Payback o ROI (return on investment) de las tres tecnologías consideradas para el escenario 3. A la izquierda el RSI de Carrefour y a la derecha Leclerc.*

Escenario 4.

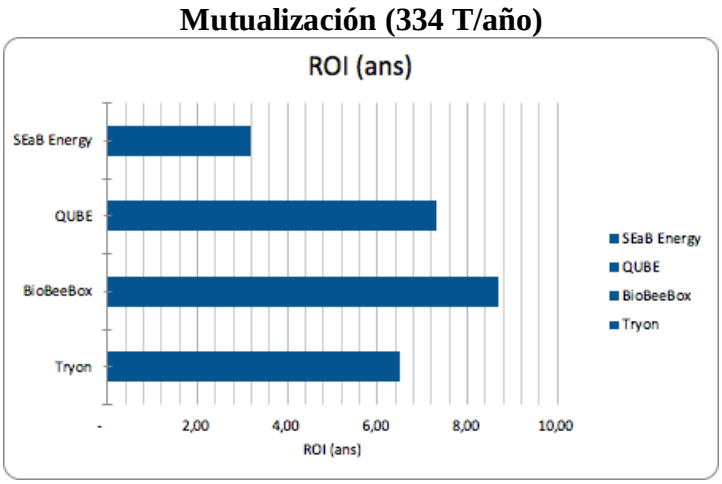


Figura 7.9. *Payback o ROI (return on investment) de las cuatro tecnologías consideradas para el escenario 4 en mutualización en Carrefour.*

7.4.3.3 Análisis y conclusiones

Se observa desde un principio en las comparaciones, que la tecnología que aporta SEaB Energy es la más rentable, con un RSI de menor cantidad de años. Esto confirma que su oferta es la más desarrollada y madura, con un OPEX más competitivo. Sin embargo, es necesario tomar esta consideración con cautela. En efecto, las ganancias energéticas son mejores que la competencia debido al alto potencial metanógeno considerado en sus cotizaciones, esto puede llegar a ser hasta un 20% más elevado según el tipo de bio-desechos considerados.

A continuación, se aprecia que el **escenario 1 no es rentable.** Basado en un volumen bajo de desechos entrantes, en este caso la mayoría de las tecnologías funcionan con una cierta tasa de carga muy inferior a su valor óptimo. La BioBeeBox que parece la opción más adaptada pudiendo tratar un volumen de 80 a 120 t/año, no ofrece una solución viable. Para el **escenario 2**, las tecnologías de SEaB y BioBeeBox ofrecen un RSI de 6 y 8 años respectivamente. Para el **escenario 3**, solo la tecnología de SEaB oferce un RSI ligeramente inferior a 8 años. La BioBeeBox en el caso de Leclerc ofrece un RSI de 8,6 años. Sin embargo, en el caso de clientes

como supermercados o centros comerciales, aunque las tecnologías puedan tener una vida útil de más de 20 años, este tipo de inversiones son muy costosas y no consideradas rentables.

Finalmente, solo el **escenario 4 presenta valores de RSI interesantes:** SEaB presenta el mejor RSI de 3 años, considerable e interesante para el cliente. No obstante, es necesario implantar un acuerdo de inversión mutua entre dos empresas competidoras como Carrefour y Leclerc.

7.5 Proceso y componentes

El proceso y los componentes descritos en los sistemas de cada uno de los constructores presentados anteriormente es muy similar, en consecuencia, se presenta el modelo realizado por Qube Renewables®. A continuación, se muestra una imagen del proceso (**Figura 7.10**) y la descripción de las distintas etapas del sistema con una valorización de los componentes. Datos obtenidos de Qube Renewables®.

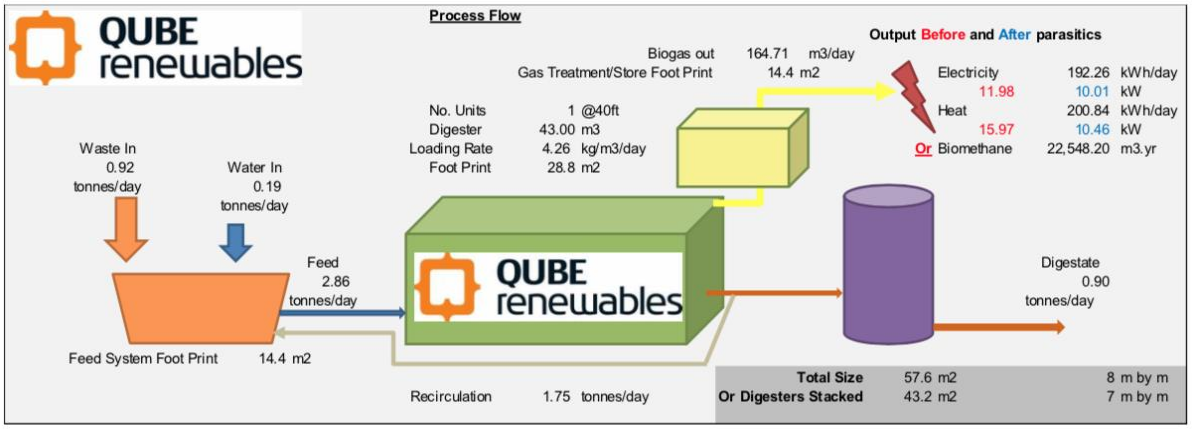


Figura 7.10. *Esquema del proceso de funcionamiento de una unidad de micro-metanización de BioCube 40 construída por Qube Renewables®.*

7.5.1 Descripción del proceso

Etapa 1: suministro del metanizador.
Los bio-desechos deben ser provisionados por personal autorizado hasta la unidad de metanización. A su vez, una ayuda mecánica puede ponerse a disposición para asistir el volteo de las cajas de bio-desechos en la reserva. El metanizador puede ser alimentado todos los días, o bien con menos frecuencia en función de las restricciones del cliente. En todos los casos existe una automatización de la alimentación de manera que esta se realice regular y continuamente hacia el digestor.

Etapa 2: Trituración y mezcla.
Una vez introducidos, los bio-desechos son triturados con el fin de facilitar el trabajo de las bacterias. Generalmente, son mezclados con agua y a veces una fracción del digestato es reintegrada con el fin de optimizar el rendimiento de la digestión.

Etapa 3: Higienización/Pasteurización.
Un tanque de higienización asegura luego el aumento de la temperatura de los entrantes hasta 70 ºC durante una hora con el objetivo de eliminar las bacterias que puedan causar una potencial contaminación. Esto asegura cumplir con las restricciones de regulación de la metanización de bio-desechos de base animal.

Etapa 4: Tanque de digestión.
Una vez higienizado, la mezcla de entrantes alimenta continuamente el tanque de digestión. En anaerobia, el medio es mantenido a una temperatura constante de 37 ºC gracias a un sistema de calentamiento con agua caliente que circula uniformemente entre dos paredes del tanque. El pH en esta etapa debe mantenerse entre 6,5 t 7,5 para asegurar el buen desarrollo de las bacterias metanogénicas y evitar la competencia con el desarrollo de otro tipo de bacterias desfavorables para la producción de metano. En función de los procesos considerados, el tiempo de permanencia de los desechos en el tanque varía entre 20 y 30 días.

Etapa 5: Valorización del biogás.
Durante la etapa de digestión de los bio-desechos, el biogás es liberado en el tanque. Este es almacenado temporalmente por una membrana flexible en la parte superior del tanque. Cuando se alcanza una cierta presión cercana a 1,4 bar, el biogás es transportado hacia la etapa de valorización que puede ser producción de calor en caldera, cogenerador, o purificador, después de haber sido analizada. Solo la caldera y la cogeneración son propuestas por los constructores. Cabe señalar que los costos aumentan considerablemente al implementar la purificación del biogás, lo que reduce la rentabilidad del proyecto cuando la cantidad de bio-desechos es relativamente baja (< 1000 t/año).

Etapa 6: Tratamiento del digestato.
El digestato es extraído automáticamente del tanque una vez al día, con el fin de asegurar el funcionamiento continuo del digestor. Algunos constructores proponen un tratamiento directo *in situ* del digestato. Un separador de fase permite eliminar una gran parte de la fracción líquida del digestato, que es evacuada en las aguas usadas y reutilizada para otros requerimientos, como por ejemplo el lavado de las cajas. Solo el constructor Bee&Co propone un sistema de aireación forzada permanente (patentada) que permite, durante 15 días, el secado del digestato de manera de obtener un fertilizante seco y de acuerdo con las normas para ser comercializado directamente o revalorizado de manera local.

7.5.2 Valorización de los componentes

A continuación, se presenta una lista de los componentes y su valor (**Tabla 7.6**), además de su costo anual estimado en mantención.

Tabla 7.6. *Listado de componentes de una unidad de metanización BioQube40 de Qube Renewables®. Valores en libras esterlinas.*

Ítem	**Valor (£)**	**Estimado anual en costos de mantención (£)**
Alimentador	£10,816.40	£649
Desembalador/separador/triturador	£17,304.00	£1,038
Tanque mezclador	£18,169.68	£363
Digestor (43 m^3)	£37,777.73	£756
Macerador con flujo de salida de líquidos y gases	£18,172.81	£363
Panel de control, Software, GSM y monitoreo de seguridad	£23,380.00	£701
Antorcha	£16,995.00	£170
CHP/Cogenerador/conexión a la red/Caldera/Colector de calor (7 kW)	£29,718.68	£2,972
Pasteurizador	£28,000.00	£2,240
Almacenador de gas, tratamiento, Mezclador de gas y monitoreo (10 m^3)	£33,289.00	£999
Tanques de digestato (12 m^3)	£2,800.00	£112
Instalación/testeo/entrenamiento	£13,944.00	£139
Configuración, diseño y 1er año de soporte remoto	£14,000.00	£0
Reparto	£4,410.00	£0
Total	**£268,777.49**	**£10,503**

8. Regulación

A continuación, se presenta el análisis del marco regulatorio para la implantación de un proyecto de gestión de desechos orgánicos para generación de biogás. A modo de conclusión, se establece un análisis comparativo entre la regulación en Chile y Francia, y se ofrecen algunas recomendaciones.

8.1 Levantamiento de la información

En Chile, todas las plantas de biogás (industriales o domiciliarias) deben estar registradas en la SEC y cumplir la normativa vigente. En términos generales, la regulación está a cargo de 5 instituciones nacionales:

1. Impacto ambiental (SEIA, SMA)
2. Salud (SEREMI de Salud)
3. Obras públicas (SISS)
4. Agricultura (SAG)
5. Energía y condiciones de seguridad (SEC)

No todas las plantas de biogás serán reguladas por todas estas entidades, las condiciones para la regulación dependen de factores de potencia, tamaño, tipo de sustrato, entre otros. Sin embargo, toda planta de biogás, de cualquier tamaño (incluso domiciliaria) debe registrarse en el SEC y atenerse a la normativa vigente [40].

Por otro lado, existen normas que no son necesariamente obligatorias para la construcción y operación de una planta de biogás, pero que sí entran en vigor dependiendo del modo de valorización del biogás y sus subproductos. Entre ellas, están:

Inyección a la red de gas natural:
NCh 2264. c97: Norma que aplica al gas natural. Esta norma se debe cumplir siempre que se requiera un estudio de inyección del biogás a la red de gas natural. En otros casos, por ejemplo, si el biogás es para la cogeneración, esta norma se puede prescindir.

Venta del digestato como fertilizante o compost:
NCh3375:2015: Requisitos de calidad del digestato. Esta norma se puede prescindir en el caso de no desear comercializar el digestato.

Residuos domésticos como sustrato para el biogás:
NCh3376:2015: Norma que regula los residuos sólidos municipales - Diseño y operación de instalaciones de recepción y almacenamiento. Esta norma se debe cumplir siempre y cuando la planta de biogás decida trabajar con residuos sólidos (ejemplo: residuos domésticos).

Venta de la electricidad producida por la cogeneración:
DFL N°4 (2006) Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE): En Chile la operación de todos los servicios de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica están regulados por esta ley.

Para obtener más información detallada acerca de la normativa ligada a la cogeneración, se recomienda visitar el sitio cogeneracioneficiente.cl/normativa/.

8.2 Análisis comparativo: Regulación en Chile y Francia

Tabla 8.1 *Comparación de los tópicos normados en Chile y Francia (Fuente: elaboración propia)*

TOPICO NORMADO	CHILE	FRANCIA
SEGURIDAD	✓	✓
TAMAÑO DE LA PLANTA	✓	✓
OLORES	X	✓
HIGENIZACIÓN	X	✓
DIGESTATO SE CONSIDERA UN DESECHO	Sí	Sí
DIGESTATO COMERCIALIZABLE	✓	✓
SEPARACIÓN DE LA BASURA	X	✓
VENTA CRÉDITOS DE CARBONO	✓	✓
PRECIO DE VENTA ESPECIAL KWH - eléctrico	✓	✓

A modo de conclusión, esta comparación puede ser utilizada para extraer distintas recomendaciones de mejoras en Chile:

1. **Olores:** Si bien el proceso de metanización de biogás no genera olores, es el proceso de almacenamiento del sustrato el que los genera, debido a que no es posible introducir la totalidad del sustrato inmediatamente al ser recibido. Este debe almacenarse en un contenedor, o al aire libre en el caso agrícola, antes de alimentar el digestor. El hecho de introducir todo el sustrato podría ocasionar bajas en el rendimiento de producción de biogás o incluso la muerte de las bacterias por sobrecarga.
2. **Higienización:** Para evitar que agentes patógenos puedan permanecer en el digestato, y solo en el caso de que el sustrato tenga origen de base animal, se considera una pasteurización de este antes de introducirlo en el digestor. Un tanque de higienización asegura el aumento de la temperatura de los sustratos hasta 70 ºC durante una hora. Esto asegura cumplir con las restricciones de la metanización de bio-desechos de base animal.
3. **Separación de la basura:** Para poder tratar desechos domésticos y generar biogás, es necesario implementar una gestión de separación de la basura. Si bien es posible metanizar los desechos orgánicos con contenido de material indeseable (plásticos, metales, etc.), para generación de biogás, esto causa bajas en el rendimiento y finalmente ocasiona que el digestato quede inutilizable para fertilizante o compostaje.

La normativa SEC permite el uso de normativa extranjera aprobada y certificada, nacional o internacionalmente [40].

9. Aplicación: Implementación de una planta de metanización de biogás a partir de desechos orgánicos en el Mercado Lo Valledor

9.1 Introducción

El mercado mayorista Lo Valledor (**Figura 9.1**) representa el principal canal de comercialización para micro, pequeños y medianos productores agrícolas, feriantes y almaceneros, optimizando la distribución y venta de sus productos a una importante población de Chile.

Figura 9.1. *Vista satélite y panorámica del mercado Lo Valledor (Fuente: elaboración propia. Derechos de autor: Google Maps y El Mercurio).*

Este mercado se ubica en Santiago de Chile y cuenta con más de 1200 locales que reciben más de 30.000 visitas diarias. Siendo el principal Mercado Mayorista Privado de comercio Hortofrutícola del País. En Lo Valledor, existen dos tipos de usuarios: vendedores y compradores, los cuales anualmente transan más de 2.100.000 toneladas de productos hortofrutícolas al interior de las instalaciones [57].

9.2 Cuantificación de los desechos orgánicos

Al interior del mercado Lo Valledor se producen 2000 toneladas por mes de biodesechos, las cuales corresponden a frutas y verduras no comercializables, cáscaras y restos de estas, hojas de coliflor y otras similares, etc. No se toma en consideración los desechos orgánicos que puedan venir de origen humano como aguas servidas, ya que estas van directamente al alcantarillado.

La empresa multinacional Veolia Environnement se encarga de gestionar 1500 toneladas de los desechos orgánicos al mes, esta empresa gestiona el relleno sanitario Santiago Poniente, siendo capaz de transportar esta cantidad de desechos a través de dos camiones tolva por semana, los cuales recogen los desechos desde dos "puntos verdes" (**Figura 9.2**) en el centro del mercado.

Figura 9.2. *Puntos verdes del Mercado Lo Valledor.*

Además, la empresa Megambiente en colaboración con KDM, es la encargada de gestionar 250 toneladas al mes, con el objetivo de hacer compost. La gestión de los desechos orgánicos compostables es revalorizada por Megambiente, mientras que la parte no compostable es gestionada por KDM, quienes revalorizan en la ciudad de Til til, en su propio centro de recuperación, relleno sanitario y planta de generación de biogás.

2000 ton/mes = 1500 Veolia + 250 Megambiente + 250 Recuperados

Finalmente 250 toneladas al mes son revalorizadas mediante la donación a asociaciones como bancos de alimentos para el consumo humano, y los desechos no aptos para el consumo humano, son destinados a alimento animal. Además, existen alrededor de 20 camionetas particulares autorizadas para entrar al mercado y recogerla hojas de coliflor que son recuperadas y posteriormente destinadas al consumo de los animales (generalmente bovinos y porcinos).

Para efectos prácticos, considerando que los desechos recuperados por Megambiente ya están siendo valorizados, solo se toman en cuenta 1500 toneladas de desechos destinadas al relleno sanitario Santiago Poniente.

Desechos orgánicos disponibles para generación de biogás = 1500 toneladas

9.3 Estimación del potencial metanógeno

Para efectos prácticos, se considera que los desechos orgánicos del mercado Lo Valledor son 50% desechos verdes (hojas de verduras, tallos…) y 50% desechos de frutas.

El poder metanógeno de los desechos verdes y desechos de frutas (**Figura 9.3**) corresponde a 75 m^3 CH_4/ton y a 125 m^3 CH_4/ton respectivamente.

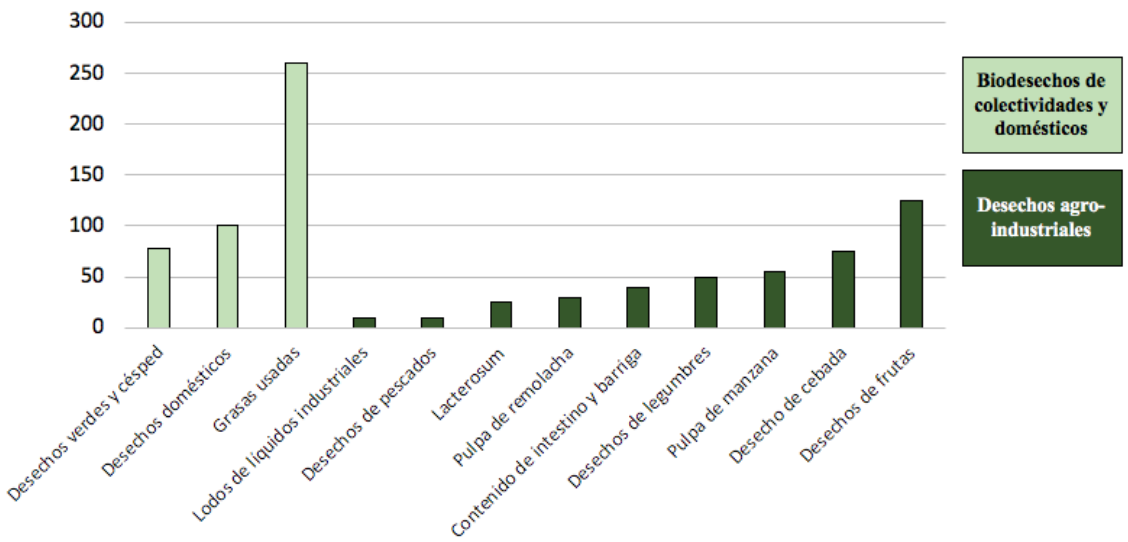


Figura 9.3. *Potencial metanógeno de diferentes sustratos en m^3 de metano por tonelada de materia bruta.*

Luego el potencial metanógeno nominal mensual (1500 toneladas) se puede calcular de la siguiente forma:

Potencial metanógeno nominal = 0,5 x 1500 x (75 + 125) = 150 000 m^3CH_4 /mes

9.4 Estimación del potencial energético

En la sección anterior se calcula que el potencial metanógeno nominal de los desechos orgánicos del mercado Lo Valledor (1500 toneladas) es de 150 000 m^3CH_4 /mes.

Se consideran las condiciones normales de temperatura y presión (ver sección 4.1). En consecuencia, el potencial energético nominal ligado a los desechos orgánicos es calculado de la siguiente forma:

Potencial energético nominal = PCI Metano x Potencial metanógeno nominal

Donde :

a) PCI Metano: $9{,}94\,\frac{kWh}{Nm^3}$ (ver sección 4.1)
b) Potencial metanógeno nominal: 150 000 Nm^3CH_4 /mes.

Calculando:

Potencial energético nominal = $9{,}94\,\frac{kWh}{Nm^3CH4}$ x 150 000 Nm^3CH_4 /mes = 1491 MWh/mes*

*Se considera un caudal efectivo promedio de biogás equivalente a 150 000 m^3CH_4 por mes producido en condiciones de presión y temperatura normales.

Observaciones :

a) Normalmente el biogás producido por los desechos de este tipo (ver sección 4.2.1) posee un contenido de CH_4 que varía entre un 55% y un 65%, esto significa que el caudal de biogás que circula en la planta es hasta un 45% mayor que el valor nominal del caudal de CH_4 calculado, es decir, el caudal de biogás puede llegar a alrededor de 272 000 m^3/mes. Este 45% del caudal total proviene de los otros compuestos presentes en el biogás (CO_2, H_2O, H_2, N_2, O_2...).

b) El valor del potencial energético nominal está ligado al poder calorífico inferior (PCI) del metano, por lo tanto, es comparable al poder calorífico de otros combustibles, como el diésel o el gas natural. Para utilizar su potencial energético eléctrico o térmico, este debe ser valorizado mediante alguna de las formas descritas en la sección 3.1.3. En consecuencia, debido a que el mercado Lo Valledor posee requerimientos eléctricos y térmicos, se selecciona la cogeneración como método de valorización del potencial energético del biogás.

9.5 Estimación de emisiones CO_2

9.5.1 Emisiones ligadas al transporte

Existen 2 instituciones principales que se encargan de los desechos orgánicos en el mercado Lo Valledor: Veolia Environnement y Megambiente, este último está asociado con la empresa KDM. Los desechos recuperados por Veolia Environnement equivalen a 1500 toneladas por mes. Estos desechos comúnmente son transportados al relleno Sanitario de Santiago Poniente. El transporte es realizado a través de camiones tolva, los cuales recuperan los desechos desde los puntos verdes en el centro del mercado Lo Valledor. La distancia que recorren estos camiones hasta el relleno sanitario es aproximadamente 24 km (**Figura 9.4**). Por otro lado, los desechos recuperados por Megambiente equivalen aproximadamente a 250 toneladas por mes, los cuales son transportados de la misma forma aproximadamente 60 Km (**Figura 9.4**) hasta la planta de tratamiento y generación de biogás de KDM en Til til.

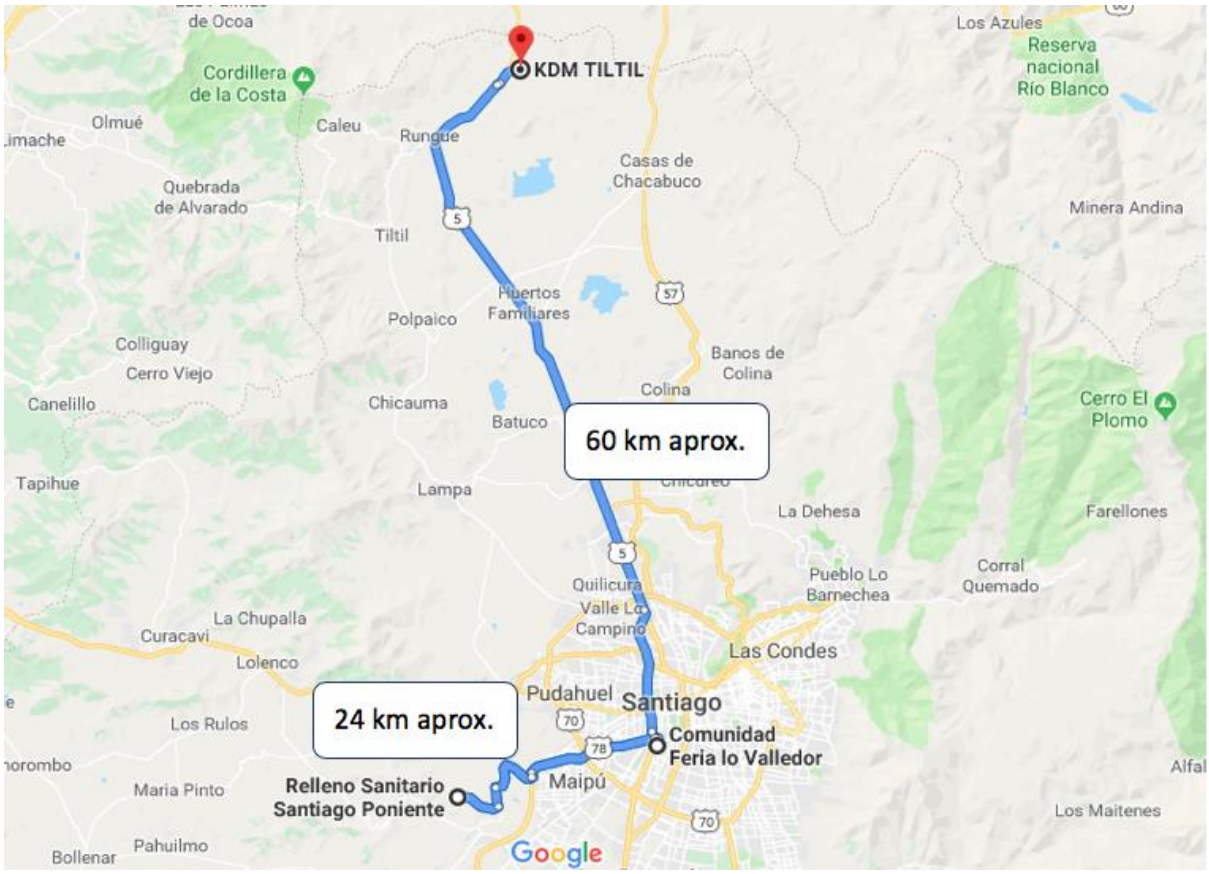


Figura 9.4. *Distancia aproximada total que recorren los desechos orgánicos desde su punto de generación hasta el lugar de valorización [Fuente: Google Maps].*

En consecuencia, los desechos son transportados hacia:
El relleno sanitario Santiago Poniente = 1500 toneladas, 24 km aproximadamente.
La planta de valorización KDM Til til = 250 toneladas, 60 km aproximadamente.

En el transporte en camión, una tonelada transportada un kilómetro, emite 0,0584 kg de CO_2 (equivalente GES) (ver sección 6.3).

Entonces, el impacto del transporte bajo la gestión de Veolia Environnement y Megambiente es: Veolia: 24 Km X 1500 ton X 0,0584 $KgCO_2$/Km/ton = 2102,4 $KgCO_2$/mes. Megambiente: 60 Km X 250 ton X 0,0584 $KgCO_2$/Km/ton = 876 $KgCO_2$/mes. En resumen:

Tabla 9.1. *Emisiones ligadas al transporte de desechos del Mercado Lo Valledor.*

Emisiones CO2 ligadas al transporte de desechos	$tonCO_2$/mes
Veolia	2,10
Megambiente	0,87
Total	**2,97**

9.5.2 Emisiones ligadas al almacenamiento de desechos

Existe un impacto de emisiones CO_2 producto de la descomposición de los residuos orgánicos en el relleno sanitario. Estos desechos emiten principalmente CH_4 y N_2O los cuales son alrededor de 21 y 301 veces más contaminantes que el CO_2.

Una tonelada de desechos orgánicos (ej. desechos alimentarios) descompuesto al aire libre, equivale aproximadamente a 1899 $KgCO_2$ (equivalente GES) en emisiones de metano (ver sección 6.2.1). Considerando la hipótesis de que en el relleno sanitario Santiago Poniente los desechos están al aire libre, se calculan las emisiones de CO_2 mensuales:

Relleno sanitario Santiago Poniente: 1500 ton X 1899 $KgCO_2$/ ton = 2848,5 $tonCO_2$/mes

9.5.3 Emisiones ligadas a la producción de energía

En cuanto a la metanización y la generación de biogás, se debe tomar en cuenta la cantidad de CO_2 emitida y la cantidad evitada. Las emisiones de CO_2 producidas equivalen a 33 $kgCO_2e$ por tonelada metanizada (ver sección 6.2.2), mientras que las emisiones evitadas son 77 $kgCO_2e$ por tonelada de desechos metanizados (ver sección 6.4.2). Finalmente, por cada tonelada de desechos metanizados, las emisiones evitadas son 77 $kgCO_2e$ - 33 $kgCO_2e$ = 44 $kgCO_2e$. Calculando:

Metanización de los desechos orgánicos del Mercado Lo Valledor: 1500 ton X 44 $KgCO_2$ evitado / ton = 66 $tonCO_2$ evitadas /mes

9.6 Selección de la tecnología y capacidad de la planta

En esta sección se selecciona la tecnología que aplica para la metanización de los desechos orgánicos del Mercado Lo Valledor. Se considera el contenido de materia seca de los desechos y los requerimientos de agua a través del cálculo de los volúmenes de los estanques. Además, se selecciona el tipo de proceso (una o dos etapas) con el objetivo de aumentar la eficiencia el sistema de generación de biogás.
La capacidad de la planta se calcula en base a la cogeneración, es decir se considera una potencia eléctrica y una térmica. Las pérdidas de potencia (cañerías codos, bombas, compresión, etc.) se consideran de manera global adicionadas con las pérdidas propias del cogenerador.

9.6.1 Tecnología

Debido al contenido de materia seca de los desechos, se escoge una tecnología de vía seca en modo continuo (ver sección 3.1.2.2.2), esta tecnología permite menores requerimientos de agua y considera una posible reinyección del digestato líquido, lo que ayuda no solamente a diluir el sustrato, sino que también regula la flora bacteriana, optimizando la digestión. Por otra parte, se escoge el proceso en dos etapas, es decir dos biodigestores separados físicamente para aumentar la eficiencia y producción de biogás (ver sección 9.7.2.2). La **Figura 9.5** muestra un esquema del proceso de metanización en dos etapas y cogeneración.

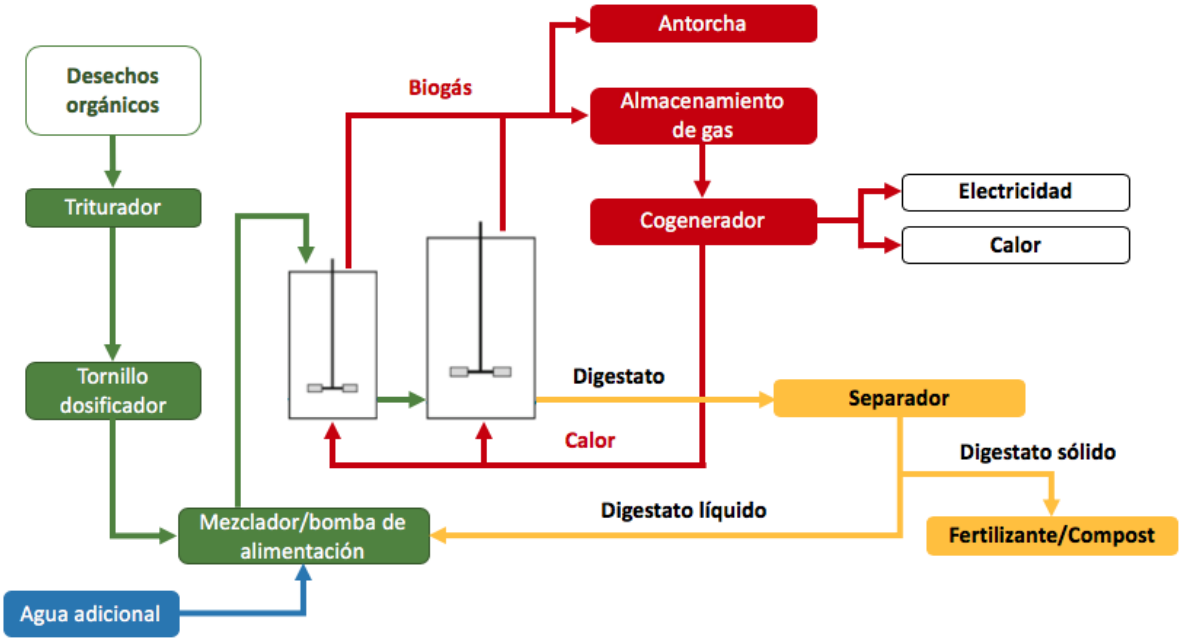


Figura 9.5. *Esquema del proceso (Fuente: elaboración propia)*

9.6.2 Volumen de los estanques

A continuación, se calculan los volúmenes nominales de los estanques para la planta piloto de biogás. Estos son el estanque de mezclado del sustrato, los biodigestores, el almacenador de gas y el contenedor del digestato.

9.6.2.1 Estanque de mezclado del sustrato

Los desechos orgánicos como frutas y verduras se consideran desechos con gran contenido de materia seca. El estanque se selecciona con una proporción de 35% de materia seca y un 65% de agua (**Figura 9.6**). Es necesario mantener una alimentación constante para optimizar la digestión (ver sección 3.1.2.2.2). Debido a que los desechos del Mercado se recogen diariamente, se estima conveniente la alimentación del digestor una vez por día.

Requerimiento de agua: 2800 toneladas = 2800 m^3/mes

El requerimiento de agua puede disminuir, si se reutiliza el digestato líquido en el mezclador (**Figura 9.6**) para su recirculación automatizada. Se sabe que a lo menos un 85% del digestato total corresponde a la parte líquida. Además, se considera un 5% de pérdidas de agua en evaporación y filtraciones. En consecuencia:

Requerimiento de agua con reinyección del digestato líquido: 2800 X 20% = 560 m^3/mes

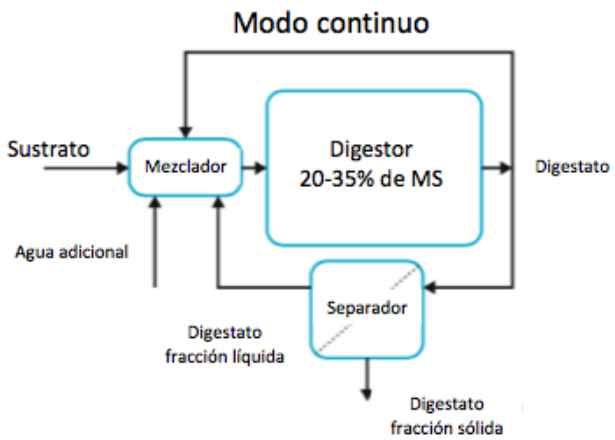


Figura 9.6. *Principio de funcionamiento de procesos de vía seca operados en modo continuo [9].*

Finalmente, se consideran 50 toneladas de desechos por día y 93 m^3 de agua.

Volumen del estanque: 150 m^3.

9.6.2.2 Biodigestores

Al calcular el volumen del digestor, se debe considerar el tiempo de retención o fermentación del sustrato. Este es el tiempo que el sustrato debe permanecer en el digestor, de manera de obtener el mayor flujo de biogás posible. Se determina que el flujo de retención óptimo es de 20 días para una temperatura de 35 grados centígrados.

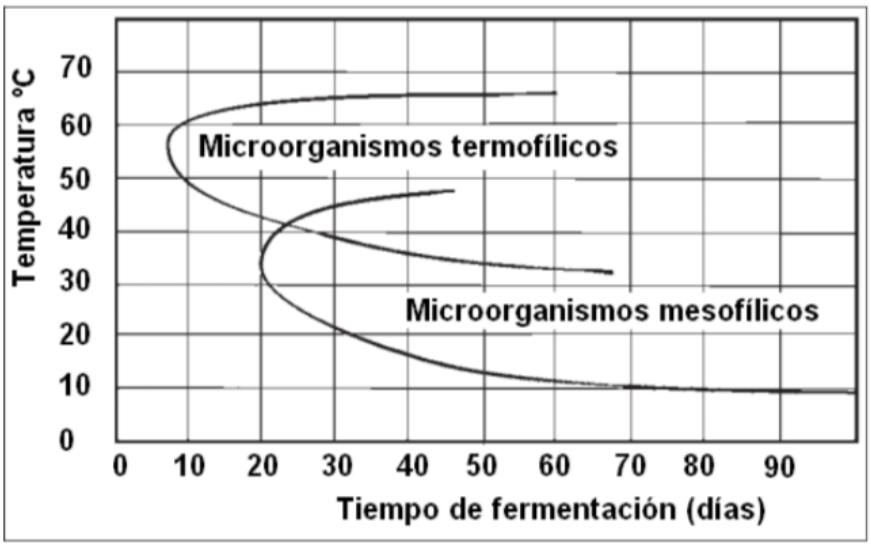


Figura 9.7. *Tiempo de retención hidráulico según temperatura del biodigestor [39].*

El biodigestor posee tres conexiones: entrada de sustrato, salida de biogás y salida del digestato. El material que ingresa al biodigestor permanece allí durante todo su tiempo de retención, por razones bioquímicas, el último flujo de sustrato que entra es el último es salir. El sustrato no saldrá antes de ser completamente digerido, ni permanecerá más tiempo del debido [39].

El volumen de trabajo corresponde a aquel necesario para almacenar el sustrato que ingresa al biodigestor durante el tiempo de retención en cada estanque, la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$Volumen\ de\ trabajo: V_b = Q_s * \frac{T_r}{B}$$

Tabla 9.2. *Volumen de trabajo para el diseño de los biodigestores.*

Variable	Descripción	Cantidad		Unidad
B	Biodigestor (1 y 2)	1	1	-
T_r	Tiempo de retención	5	15	Días
Q_s	Flujo de sustrato	45	45	m^3/día
V_b	**Volumen de trabajo**	**225**	**675**	**m^3**

Se utilizan dos biodigestores: **el primero de 225 m^3 y el segundo de 675 m^3**, puesto que un sistema en dos etapas (**Figura 9.8**) mejora la eficiencia de la digestión. El sustrato estará 5 días en un biodigestor y 15 días en próximo digestor.

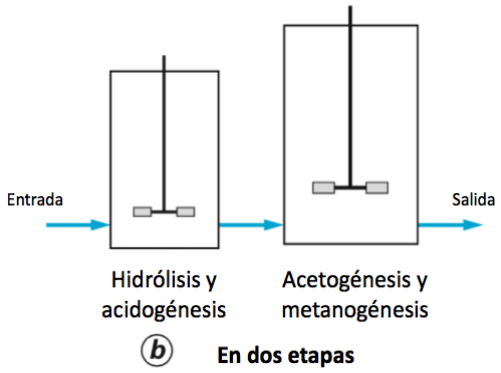


Figura 9.8. *Proceso de digestión en dos etapas.*

El principio del enfoque en dos etapas es de separar el esquema reactivo de la digestión anaerobia en dos reactores físicamente separados, con el fin de optimizar cada compartimiento. En el primer reactor las fases de hidrólisis y acidogénesis tienen lugar. Este primer compartimiento es dispuesto en serie con un segundo reactor, en el cual se realiza la acetogénesis y la metanogénesis.
Para limitar las inhibiciones potenciales con los ácidos grasos volátiles y prolongar la degradación del sustrato, el volumen del segundo digestor y el tiempo de permanencia asociado son más grandes que en el primer reactor.

9.6.2.3 Almacenador de gas

Por otro lado, para evitar riesgos de accidentes debido a explosión del biogás, se selecciona un almacenador para el tratamiento mezcla de gas y monitoreo equivalente al 20% del volumen de cada digestor.

El volumen de trabajo necesario es de 180 m^3.

9.6.2.4 Digestato

El estaque para el digestato contiene la descarga de los biodigestores. Además, separa las fases sólida y líquida permitiendo la recirculación. El proceso de separación de fases se estima en 7 días [39], luego de esto la fase líquida es reintroducida en el sistema de biodigestores, permitiendo el ahorro de agua.

El volumen de trabajo necesario es de 315 m^3.

9.6.3 Capacidad de la planta

Para la selección del cogenerador de la planta, se opta por el cogenerador JMS 320 GS-N.L. (**Figura 9.9**) ya que posee una gran eficiencia global (82,5%) y está capacitado para trabajar directamente con biogás.

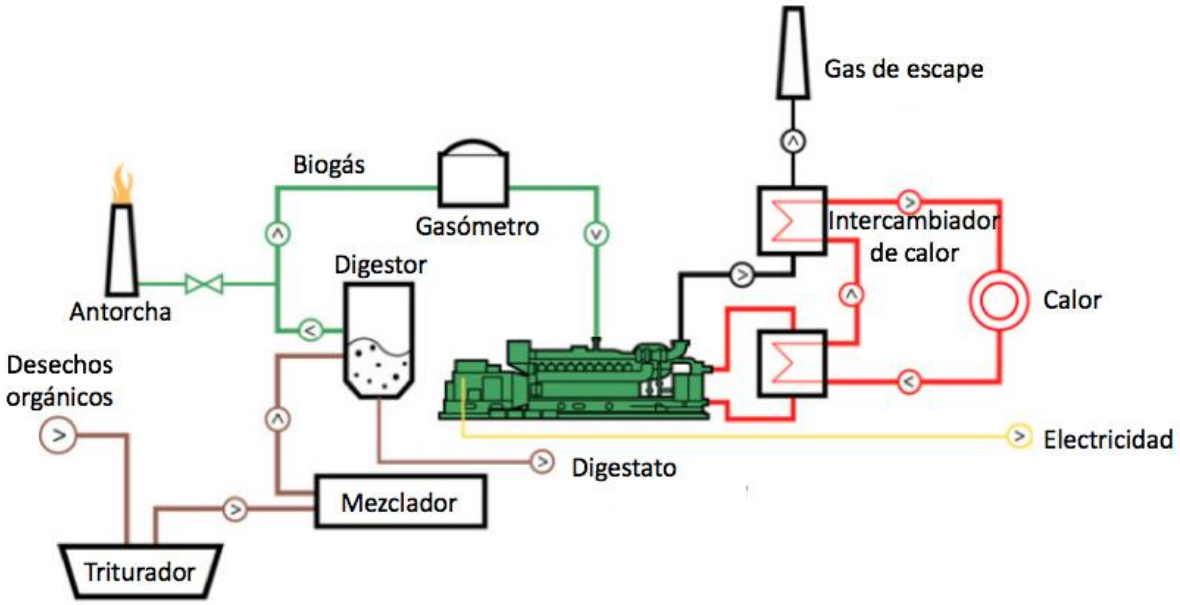


Figura 9.9. *Principio de utilización del calor del cogenerador JMS 320 GS-N.L.*

Como se ha calculado anteriormente, se cuenta una cantidad de 1491 MWh/mes de combustible (CH_4) disponible. Considerando un rendimiento de 40,8% eléctrico y de un 41,7% térmico (**Figura 9.10**), la producción disponible nominal es de 608,3 MWh eléctrico y 621,7 MWh térmico mensualmente.

JMS 320 GS-B.L
Biogas 1.063kW el.

CO-GEN Module data:		
Electrical output	kW el.	1.063
Recoverable thermal output (180 °C)	kW	1.088
Energy input	kW	2.607
Fuel Consumption based on a LHV of		
5 kWh/Nm³	Nm³/h	521
Electrical efficiency	%	40,8%
Thermal efficiency	%	41,7%
Total efficiency	%	82,5%
Heat to be dissipated (LT-Circuit)	kW	65

Emission values:

NOx < 500 mg/Nm³ (5% O2)

Figura 9.10. *Especificaciones técnicas del cogenerador JMS 320 GS-B.L.*

Suponiendo un funcionamiento continuo de 24 horas al día, 30 días al mes, la cantidad de energía disponible (input) es de 2070,8 kW. En consecuencia,

La potencia disponible nominal es de 0,84 MW eléctricos y 0,86 MW térmicos.

A partir de los cálculos de diseño de proyectos similares [39], se estima que un 30% de la electricidad generada es destinada a solventar las pérdidas de presión en cañerías, uso de bombas, compresores, monitoreo, etc. Esta cantidad es considerada un egreso en el balance económico y no es descontado de la potencia disponible ya que es posible obtener distintos precios para la compra y venta de electricidad cuando esta es producida de fuentes renovables como pequeño medio de generación distribuida (PMDG).

Por otro lado, se sabe que la cantidad de biogás producido depende de las condiciones de temperatura y de la calidad de las bacterias digestoras, en este caso se considera una temperatura de 35 grados Celsius, lo que supone un tiempo de retención 20 días. La temperatura de la ciudad de Santiago varía en alrededor de 12 grados centígrados en la temporada otoño-invierno (**Figura 9.11.** Temperatura promedio en Santiago de Chile).

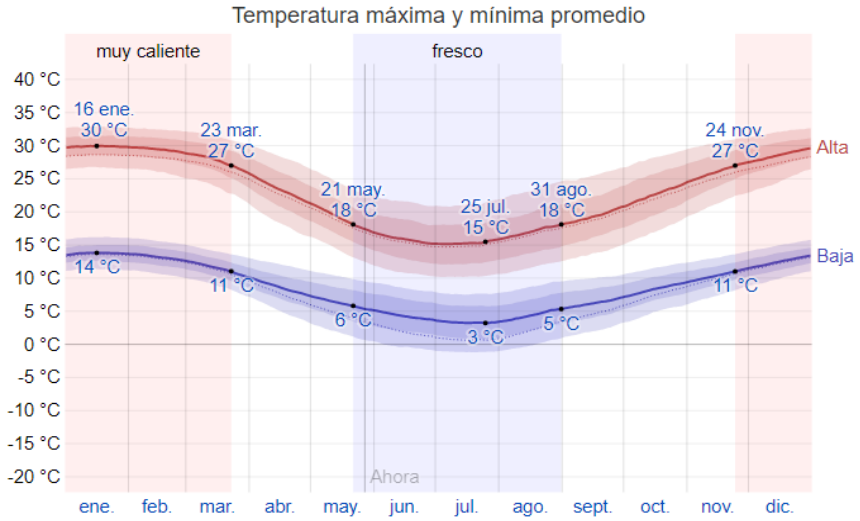


Figura 9.11. *Temperatura promedio en Santiago de Chile [58].*

Para asegurar la estabilidad de la temperatura, es necesario inyectar parte del aporte térmico de vuelta al digestor, en consecuencia, durante la temporada de mayo a agosto, se considera un aporte del 20% térmico extra para el recalentamiento del digestor. Finalmente, la potencia térmica entre mayo y agosto es de 0,86 X 0,8 = 0,69 MW_t (**Figura 9.12**).

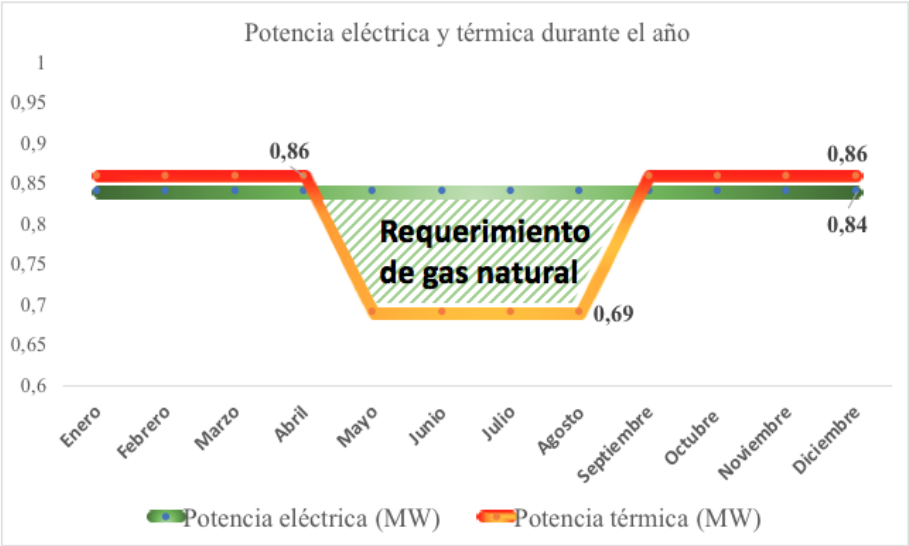


Figura 9.12. *Potencia eléctrica y térmica durante el año.*

Para cumplir con los requerimientos energéticos, es decir el potencial energético nominal planteado igual a 1491 MWh/mes y una estabilidad en la potencia térmica y eléctrica (**Figura 9.12**), es necesario contar con disponibilidad de gas natural hacia el cogenerador en los meses de más baja temperatura. Además, en el caso de una baja en el caudal de biogás, ya sea por motivos de temperatura o por degradación de los microorganismos metanógenos, es necesario poseer una reserva de gas natural a modo de factor de seguridad. A su vez, esta reserva puede ser utilizada cuando se realice la mantención de la maquinaria. La reserva se estima de manera de asegurar el funcionamiento completo de la planta durante un mes.

En el primer caso, los requerimientos de gas natural (**Tabla 9.3**) son equivalentes a 0,86 – 0,69 = 0,17 MW ╳ 24 h ╳ 30 d ╳4 meses/año = 489,6 MWh/año. Si se hace la equivalencia, 1000 ╳ 489,6 MWh/año ÷ 10,1 kWh/m^3 (PCI gas natural) = 48 475,2 m^3/año.

Luego la reserva de gas natural, la cual debe suplir la demanda energética de la planta durante 1 mes, es la siguiente: requerimiento = 1491 MWh/mes ╳ 1000 ÷ 10,1 kWh/m^3= 147 623, 8 m^3. Esta reserva solo se renueva cuando es utilizada, por lo tanto, se considera un gasto fijo y único en la inversión.

Tabla 9.3. *Requerimientos de gas natural para la planta de metanización*

Requerimientos de gas natural		Unidad
Por baja de temperatura (mayo-agosto)	**48 475,2**	m^3/año
Reserva de emergencia (1 mes cap. total)	**147 623, 8**	m^3

9.6.4 Listado de los componentes

Tabla 9.4. *Listado de componentes requeridos en la unidad de metanización.*

Ítem
Alimentador (Tornillo dosificador)
Triturador
Tanque mezclador (150 m^3)
Biodigestor (225 m^3)
Biodigestor (675 m^3)
Macerador con flujo de salida de líquidos y gases
Panel de control, Software, GSM y monitoreo de seguridad
Antorcha
CHP/Cogenerador/conexión a la red/Caldera/Colector de calor (1063 kWe)
Almacenador de gas, tratamiento, Mezclador de gas y monitoreo (180 m^3)
Tanque de digestato (315 m^3)

9.6.4 Terreno y distancias de seguridad

El terreno es pensado de manera de utilizar el área disponible dentro del mercado Lo Valledor, esto tendría efectos positivos en los egresos por transporte y sobretodo, en la comercialización del compost ya que los productores del mercado suelen tener terrenos de cultivo. Por otro lado, la reutilización de la energía térmica local puede ser utilizada para hornos, restaurantes y calefacción.

Debido a que el biogás es un combustible, es necesario tomar medidas de seguridad, por lo que en la selección de la ubicación se debe tener en cuenta las distancias mínimas de seguridad para la instalación (**Tabla 9.5**).

Tabla 9.5. *Distancias mínimas de seguridad entre almacenamientos de biogás y estructuras adyacentes.*

Estructuras adyacentes	**Distancias mínimas al almacenamiento de biogás (metros)**	
	Volumen de biogás ≤ 100m^3	Volumen de biogás > 100m^3
Los edificios e instalaciones **fuera** de la propiedad donde se ubica la planta de biogás, que presentan una densidad de carga de combustible media **inferior o igual** a 1000 MJ/m^2	5m	15m
Los edificios e instalaciones **fuera** de la propiedad donde se ubica la planta de biogás, que presentan una densidad de carga de combustible media **superior** a 1000 MJ/m^2	10m	20m
Los edificios e instalaciones **dentro** de la propiedad donde se ubica la planta de biogás, que presentan una densidad de carga de combustible media **inferior o igual** a 1000 MJ/m^2	1m	5m
Los edificios e instalaciones **dentro** de la propiedad donde se ubica la planta de biogás, que presentan una densidad de carga de combustible media **superior** a 1000 MJ/m^2	5m	10m
Calles, caminos u otro lugar destinado al tránsito hasta su borde más cercano.	5m	5m
Líneas eléctricas aéreas.	10m	10m
Líneas de ferrocarriles o autopistas hasta su borde más cercano.	15m	15m
Bosques hasta su borde más cercano.	30m	30m

9.7 Balance económico

A continuación, se presentan los costos de inversión, ingresos, egresos y los indicadores económicos del proyecto de generación de biogás.

9.7.1 Inversión

Para el cálculo de capital fijo del sistema, es decir biodigestores, cogenerador y equipos auxiliares, etc. (**Tabla 9.4**), se considera el método de estimación por orden de magnitud:

$$C_A = C_B \cdot \frac{I_A}{I_B} \cdot \left(\frac{X_A}{X_B}\right)^n$$

En donde:
C_A : Costo de la planta A (Nueva planta)
C_B : Costo de la planta B (Conocido)
I_A : Índice de costos actual
I_B : Índice de costos pasado (indicado para la planta B)
X_A : Capacidad de la planta A
X_B : Capacidad de la planta B
n : exponente o factor de Williams o Lang

Para plantas donde se trabaje con metano, CO_2, gas natural y/o vapor, el valor del factor de Williams o Lang es n=0,6. Se utiliza como referencia una planta de biogás de SEaB Energy (2018), la cual presenta similares características de tecnología y generación (ver Anexo). En consecuencia, se estima el costo de la planta:

$$C_A = 347941 \cdot 1{,}6 \cdot \left(\frac{150\,000}{3833{,}33}\right)^{0{,}6}$$
$$C_A = 3\,177\,672\ EUR$$

Los valores son referenciales en Euros y el índice de costos industriales es local (Francia) [59], posteriormente se realiza la conversión a pesos chilenos en los valores referenciales de inversión. En cuanto a los valores preparación del terreno y la tramitación de declaración de impacto ambiental, se toma como referencia los gastos de un proyecto de generación de biogás desarrollado por la empresa Proquilab Ltda. en Chile [39].

Por otra parte, el método de utilización de la energía es el autoconsumo, ya que el mercado Lo Valledor posee necesidades de energía día y noche. Debido a esto, no es necesario realizar la tramitación de inyección eléctrica a la red, sin embargo, como el precio de venta de la electricidad puede ser distinto al precio de compra, se estima conveniente incluir la inversión en el balance económico. Un estudio de conexión eléctrica para PMGD con un impacto no significativo realizada por el grupo SAESA cuesta 570 UF [60].

9.7.1.2 Valores referenciales de la inversión

La **Tabla 9.6** muestra un resumen de los valores referenciales de los elementos para la inversión.

Para la ingeniería del proyecto, se utiliza la aproximación de Lang y Chilton modificada, este valor equivale a un 17% del gasto total del sistema. Por otro lado, para la tramitación de la venta de los créditos de carbono, se utiliza el valor referencial del estudio de impacto ambiental, ya que los requisitos poseen características muy similares en cuanto al estudio de emisiones contaminantes.

Tabla 9.6. *Valores referenciales de la inversión*

Elemento	Costo en $ CLP
Preparación del terreno	$12.000.000
Sistema (Biodigestores, cogenerador, monitoreo, etc.)	$2.494.285.037*
Ingeniería	$424.028.456
Tramitación de declaración de impacto ambiental	$9.000.000
Tramitación para la venta de créditos de carbono	$9.000.000
Tramitación y estudio para la conexión a la red eléctrica	$15.835.581**
Volumen inicial de agua	$28.000
Reserva inicial de gas natural	$9.210.465
Total	$2.973.387.539

*Precio del Euro: 784,941 CLP (07/06/19)
**Precio UF: 27.781,33 CLP (07/06/19)

9.7.2 Ingresos y ahorros

A continuación, se presentan los precios de venta de la energía eléctrica, potencia eléctrica, energía térmica y compost (**Tabl8a 9.7**). El precio referencial de la energía eléctrica es obtenido de la comisión nacional de energía. Este precio es de 106,371 US$/MWh (Fuente: CNE)

Tabl8a 9.7. *Valores de los productos del proyecto. (Fuente: www.cne.cl)*

Producto	Precio	Unidad	Cantidad/año	Total anual en $ CLP
Energía eléctrica	106,371	US$/MWh	7 299,6 MWh	$542.749.560
Potencia eléctrica	9,449	US$/kW/mes	0,84 MW	$66.576.898
Energía térmica	2,59	US$/MMBTU	7 460,4 MWh	$46.085.685
Compost/fertilizante	4 710	$CLP/ton	14 400 ton	$67.824.000
Créditos de carbono	164,8	CLP/tonCO_2$	35 009 tonCO_2	$5.769.588
Ahorros en transporte y recuperación de desechos	23.178,01	$CLP/hora en camión 20 ton	18000 ton	$125.161.254

*Precio del US$: 699 $CLP

La comisión nacional de energía se encarga de fijar los precios de la energía y potencia, estos valores contemplan los precios de la energía y precio de la potencia de punta. El precio de la energía térmica se calcula en base al valor del gas natural en MMBTU según la comisión nacional de energía.

El precio referencial de ahorros en transporte es tomado de CYPE Ingenieros S. A. considerando el transporte en Camión basculante de 20 t de carga, de 213 CV, y considerando el tiempo de espera para la carga a máquina en obra, ida, descarga, vuelta y coste del vaciado, supuesto en 6 horas por camión. El precio referencial es de $CLP 23.178,01 por hora [61].

9.7.3 Egresos

La **Tabla 9.8** muestra los egresos o gastos anuales del proyecto.

La electricidad y calor consumidos por la planta se consideran un egreso, a un costo igual al precio de venta. La energía eléctrica utilizada por la planta se considera un 30% de la potencia total eléctrica para el funcionamiento de la maquinaria, mientras que la energía térmica se considera un 20% de la potencia térmica total para mantener la temperatura constante en los digestores. Estos valores son referenciales del proyecto Proquilab Ltda.

Tabla 9.8. *Egresos considerados en el balance económico del proyecto.*

Producto	Precio	Unidad	Cantidad/año	Total anual en $ CLP
Energía eléctrica	106,371	US$/MWh	2189,9 MWh	$162.826.355
Energía térmica	2,59	US$/MMBTU	1492,1 MWh	$9.217.260
Gas natural	2,59	US$/MMBTU	489,6 MWh	$3.024.442
Agua	10	$/m^3	6720 m^3	$67.200
Preparación compost normado	2.355	$/ton	14.400 ton	$33.912.000
Personal	18.000.000	$CLP	-	$18.000.000
Mantenimiento	35.000.000	$CLP	-	$35.000.000

*Precio del US$: 699 $CLP

El agua es utilizada para la diluir el sustrato, el caudal necesario es 560 m^3 al mes o 6720 m^3 al año, a un precio de 10 $CLP/m^3.

Para la estimación del costo de personal y mantenimiento se utiliza como referencia el proyecto realizado por la empresa Proquilab Ltda. El costo del personal es de $18.000.000, mientras que el de mantenimiento $35.000.000 anuales.

9.7.4 Resultados del flujo de caja

Al calcular el valor actual neto, se utiliza una tasa de descuento de 10% y un periodo de evaluación de 20 años. Los resultados se muestran en la **Tabla 9.9**. En el anexo se encuentra el detalle de los flujos de caja.

Tabla 9.9. *Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR) del proyecto.*

Indicadores económicos	Sin crédito ($CLP)
VAN	$ 2.067.661.495
TIR	19%
Payback	7 años

Como referencia, un VAN igual a cero significa que el proyecto no tiene ningún valor en la actualidad, es decir, no es interesante realizarlo. Por otro lado, un VAN negativo muestra que el proyecto no es viable. Finalmente, un VAN positivo presenta un proyecto que es viable en el periodo de tiempo evaluado. Al ser una herramienta financiera, está en manos del inversionista decidir si el VAN es conveniente o no, para juzgar esto se utiliza la tasa de descuento. Siguiendo este contexto, el TIR es otra herramienta de decisión complementaria, que muestra la tasa en la que el proyecto posee un VAN igual a cero.

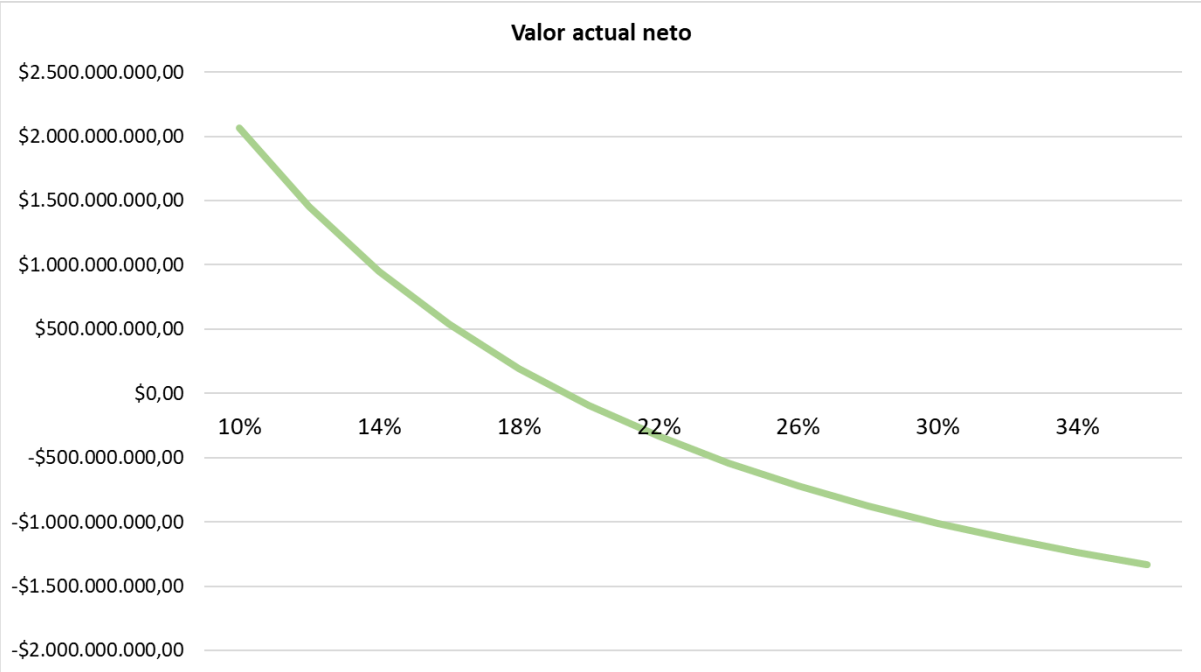


Figura 9.13. *Valor actual neto (VAN) y tasa de descuento.*

9.7.5 Análisis de sensibilidad del proyecto

A continuación, se proporciona un análisis de sensibilidad del proyecto, es decir, se calcula el VAN variando factores que intervienen de manera importante en el proyecto. En este caso, se calcula el resultado a partir de una variación en la producción de biogás, un aumento en los costos de inversión, un aumento en los costos operacionales, y finalmente una variación en el precio de la energía eléctrica.

Para este análisis no se toma en cuenta los ingresos por ahorro en transportes, ya que este es un ingreso indirecto.

Los resultados al variar la producción de biogás en un 20% muestran una variación del VAN en un 111,36%, concluyendo la importancia de la producción de biogás para el proyecto. Una baja en la producción de biogás de 18% significa que el proyecto no tendrá ningún valor.

Tabla 9.10. *Sensibilidad del VAN ante la variación de la producción de biogás.*

Producción de biogás	VAN ($CLP)	Variación en el VAN
+20%	$ 2.118.071.784	111,36%
0%	$ 1.002.093.175	0%
-20%	-$ 113.885.433	-111,36%

Por otra parte, al variar los costos de inversión en un 20% muestran una variación del VAN en un 59,34%. Un aumento de los costos de inversión de 33,5% significa que el proyecto no tiene ningún valor en la actualidad.

Tabla 9.11. *Sensibilidad del VAN ante la variación de los costos de inversión.*

Costos de inversión	VAN ($CLP)	Variación en el VAN
+20%	$ 407.415.668	-59,34%
0%	$ 1.002.093.175	0%
-20%	$ 1.596.770.683	59,34%

A su vez, variando los costos operacionales en un 20% se presenta un cambio del VAN en un 44,53%. Un aumento de los costos de operación de 45% significa que el proyecto no tiene ningún valor en la actualidad.

Tabla 9.12. *Sensibilidad del VAN ante la variación de los costos de operación.*

Costos de operación	VAN ($CLP)	Variación en el VAN
+20%	$ 555.901.970	-44,53%
0%	$ 1.002.093.175	0%
-20%	$ 1.448.284.381	44,53%

Finalmente, los resultados al variar el precio de la energía eléctrica en un 20% muestra una variación del VAN en un 83,70% en el caso de un aumento en el precio de venta y un -68,04% en el caso de una disminución en el precio, concluyendo la importancia del precio de la energía eléctrica para el proyecto. Estos valores son regulados por la Comisión nacional de energía (CNE).

Tabla 9.13. *Sensibilidad del VAN ante la variación del precio de venta de la energía eléctrica.*

Precio de venta de la energía eléctrica	VAN ($CLP)	Variación en el VAN
+20%	$ 1.840.825.274	83,70%
0%	$ 1.002.093.175	0%
-20%	$ 320.302.443	-68,04%

10. Conclusiones

Se ha presentado el estado del arte de la producción de biogás y la gestión desechos observando que la generación de biogás no solo es útil para generar energía, sino que también aporta en la gestión de desechos, permitiendo reducir emisiones y contaminación. En los proyectos de plantas de biogás, es posible incluso comercializar créditos de carbono gracias a la gestión de desechos orgánicos, lo que significa una gran cantidad de emisiones de CO_2 evitadas.

Por otra parte, se ha analizado el contexto nacional del biogás comparándolo con otros países como es el caso de Francia, de los cuales se han expuesto datos relevantes al consumo eléctrico en ambos países y un análisis de sus fuentes energéticas.

Se ha realizado una comparación entre las emisiones de CO_2 por kWh eléctrico consumido en Chile y en Francia, obteniendo que en Chile se generan 1,2 $kgCO_{2eq}$ por cada kWh eléctrico consumido, mientras que en Francia se generan 0,76 $kgCO_{2eq}$ por por cada kWh eléctrico consumido. En este contexto, se han analizado las distintas fuentes de energía para la producción eléctrica, obteniendo como resultado el uso de las energías fósiles para la producción eléctrica en Chile, mientras que, en Francia, prima el uso de la energía nuclear, la cual es muy limpia en cuanto a emisiones de CO_2.

Por otra parte, se han descrito posibles mejoras para la regulación de la generación de biogás en Chile, como, por ejemplo, agregar una normativa respecto a la higienización, la cual, similar a la pasteurización, permite exterminar bacterias patógenas. Además, se ha presentado un estudio realizado en Francia en la ciudad de Nantes donde se exponen las más recientes tecnologías de metanización a pequeña escala.

Posteriormente, se ha realizado una evaluación técnico-económica de una planta de metanización a modo de aplicación del material teórico recopilado. En esta evaluación, se ha contactado a los responsables de la división del medio ambiente del Mercado Lo Valledor, de los cuales se han conseguido datos que han permitido hacer una estimación de la capacidad de la planta, de los costos y flujos de caja de tal proyecto, obteniendo una capacidad de 0,84 MW eléctricos y 0,86 MW térmicos a partir de una cantidad de sustrato equivalente a 1500 toneladas de desechos orgánicos al mes.

Finalmente, se concluye que el biogás es una fuente de energía muy rentable si se toma en cuenta el ahorro en transporte de desechos que este puede generar. A su vez, estos proyectos son sensibles a la producción de biogás, el precio del MWh eléctrico por nodos, y los costos de inversión y de operación.

La generación de biogás es una de las opciones más viables para reducir las emisiones de gases a efecto invernadero en la atmósfera producto de los rellenos sanitarios y vertederos.

11. Bibliografía

[1] Ministerio de energía - Gobierno de Chile, «Catastro de plantas de biogás en Chile,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: http://www.minenergia.cl/autoconsumo/wp-content/uploads/2017/08/Registro-Instalaciones-Biogas-version-WEB-dic2017.pdf. [Último acceso: Mayo 2019].

[2] S. Ortiz Medina, «Metodología práctica de evaluación técnico- económico-ambiental y gestión de utilización de desechos orgánicos en industria de ganado para la producción de energía eléctrica,» UTFSM, Santiago, julio 2017.

[3] SEREMI - Ministerio del Medio Ambiente, «Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la Región Metropolitana,» Seremi. p. 32, Santiago, 26 de diciembre de 2014.

[4] ADEME - BILANS GES, «www.bilans-ges.ademe.fr/,» 2015. [En línea]. Available: http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?co2_biogenique.htm..

[5] Ministerio de Energía, «Diario Oficial - Reglamento de seguridad de las plantas de biogás y modificaciones al reglamento de instaladores de gas,» *Diario Oficial,* p. 3, 2 Febrero 2017.

[6] CIA- The World Factbook, «cia.gov,» The world factbook, 2017. [En línea]. Available: https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/docs/rankorderguide.html. [Último acceso: 24 Mayo 2019].

[7] SINIA, «Sistema nacional de información ambiental en conjunto con SINADER y SIDREP,» 2018. [En línea]. Available: http://sinia.mma.gob.cl/. [Último acceso: Mayo 2019].

[8] I. Sánchez Lizama, «Contexto Nacional de Energía del Biogás - Situación actual e iniciativas en Chile,» Ministerio de energía - División de energías renovables, Santiago, 2017.

[9] F. J. Colomar Mendoza y A. Gallardo Izquierdo, «Tratamiento y gestión de residuos sólidos,» Universidad Politécnica de Valencia. Limusa. ISBN 978-968-18-7036-2., Valencia. Limusa., 2007.

[10] Code de l'environnement, «Art L 541-8 Code de l'environnement,» París, 2016.

[11] C. Hatik, «Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique. Ingénierie de l'environnement.,» Université de la Réunion, 2015.

[12] R. ESCUDIE y R. CRESSON, «Méthanisation de la biomasse,» 10 de octubre de 2017.

[13] Action Climat, *Guide pratique de methanisation edition 2015,* Action Climat, 2015.

[14] C. Matta Morales, «Digestores y biogás - Manual para el diseño, construcción, instalación y operación de digestores anaeróbicos para la producción de biogás,» Editorial USM, 2011.

[15] R. Zachow y S. Martinelli, «Tratamiento anaerobio de residuos,» Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de procesos químicos., Valparaíso, 2003.

[16] L. M. S. Guerrero, «Biogás,» Engenharia Mecanica, Universidade Regional do Noreste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Panambi, RS, Brasil., 2000.

[17] A. Guevara, «Fundamentos Básicos para el Diseño de Digestores anaeróbicos rurales. CEPIS. OPS.,» Lima. Perú, 1996.

[18] NORMA MCDONALD OWS, INC, «CASE STUDY – DRANCO ANAEROBIC DIGESTION PLANT IN HENGELO, NL,» Octubre 2012. [En línea]. Available: http://www.biocyclerefor.com/2012/presents_tuesday/McDonald_s.pdf. [Último acceso: Abril 2019].

[19] Ministère de l'Environnement et de l'Énergie, et de la Mer, «Tableau de bord: biogaz Deuxième trimestre 2016,» Agosto 2016.

[20] EE Chile, «EE Chile, consultoría y proyectos de eficiencia energética,» [En línea]. Available: https://www.4echile.cl/. [Último acceso: noviembre 2017].

[21] Code de l'Environnement , «Article 541-4-3 du code de l'Environnement pour la France,» París, 17 de diciembre 2010.

[22] ADEME (2011) , «Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Rapport final,» Octubre, 2011.

[23] Méthanisation et biogaz une filière d'avenir, «Vers l'autonomie énergétique des territoires,» París, Francia, 2016..

[24] ADEME (2008), «Elaboration d'un plan ou programme de prévention des déchets,» 2008. [En línea]. Available: http://multimedia.ademe.fr/outils/ Programme_ Prevention_Dechets/ contenu/ pages/1.1.intro.html.. [Último acceso: marzo 2019].

[25] Seremisaludrm, «Wikipedia,» 2008. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Relleno_Sanitario_Santiago_Poniente. [Último acceso: mayo 2019].

[26] SEIA, «http://seia.sea.gob.cl,» 2013. [En línea]. Available: http://seia.sea.gob.cl/expediente/. [Último acceso: mayo 2019].

[27] Universidad de Chile, «Equipo Psicología Comunitaria, Informe de impacto psicoambiental. Rinconada de Maipú, Santiago. p. 42.,» 2006. [En línea]. Available: http://www.derechoshumanos.udp.cl/derechoshumanos/.

[28] National Non-Food Crops Centre. , «Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes, NNFCC project 09/008,» 2011.

[29] SMICOTON, «www.smicotom.fr,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: http://www.smicotom.fr/52-publications.html. [Último acceso: marzo 2019].

[30] M. Nasrullah, P. Vainikka, J. Hannula, M. Hurme y J. Kärki, «Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 1: SRF produced from commercial and industrial waste. Waste Manage. 34, 1398-1407.,» 2014.

[31] Empresas KDM, «https://www.kdm.cl/preguntas-frecuentes.html,» [En línea]. Available: https://www.kdm.cl/preguntas-frecuentes.html. [Último acceso: abril 2019].

[32] Veolia Environnement, «www.veolia.cl,» [En línea]. Available: https://www.veolia.cl/servicios/tratamiento-de-residuos-domiciliarios. [Último acceso: mayo 2019].

[33] SNIFA, «snifa.sma.gob.cl,» [En línea]. Available: http://snifa.sma.gob.cl/v2/UnidadFiscalizable/Resultado. [Último acceso: mayo 2019].

[34] A. Buswell y H. Muller, «Mechanism of methane fermentation. Ind. Eng. Chem., 44 : 550-552,» 1952.

[35] W. Boyle, «Energy recovery from sanitary landfills a review. In: Schlegel, H.G. une Barnea, S. (Hrsg) : Microbial Energy Conversion: Oxford, Pergamon Press,» 1976.

[36] R. CRESSON, S. POMMIER, F. BELINE, T. BOUCHEZ, C. BOUGRIER, P. BUFFIERE, J. CACHO, P. CAMACHO, L. MAZEAS, A. PAUSS, P. POUECH, T. RIBEIRO, M. ROUEZ y M. TORRIJOS, «Étude inter-laboratoires pour l'harmonisation des protocoles de mesure du potentiel bio-méthanogène des matrices solides hétérogènes. Rapport final. ADEME, 2014. 121 p.,» 2014.

[37] «FranceAgrimer,» marzo 2016 . [En línea]. Available: https://www.franceagrimer.fr/. [Último acceso: noviembre 2018].

[38] ATEE (2013), «Réduire, trier et valoriser les biodéchets des gros producteurs. Guide pratique,» noviembre 2013.

[39] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, «Taller Biodigestores y Biogas,» 2012.

[40] G. Lagomarsino E., «EVALUACION TECNICO-ECONOMICA DEL DISEÑO DE UNA PLANTA GENERADORA DE BIOGAS Y SU UTILIZACION EN EMPRESA ELECTRICA Y EN INYECCION A GASODUCTO DE GAS NATURAL,» UTFSM, Valparaíso, 2014.

[41] SEC - Depto. Técnico de Inspección en Electricidad, Superintendencia de Electricidad y Combustibles, «Reglamento de seguridad para plantas de biogás - Curso biogás -,» Santiago , septiembre 2017.

[42] BIOTECSUR, «Planta biogás El Ánima,» 2012. [En línea]. Available: http://biotecsur.cl/2012-planta-biogas-energia-termica-fundo-el-anima/ .

[43] BIOTECSUR, «Planta biogás El Coihue,» 2011. [En línea]. Available: http://biotecsur.cl/2011-planta-biogas-27kva-fundo-el-coihue/.

[44] BIOTECSUR, «Planta biogás El Maqui,» 2012. [En línea]. Available: http://biotecsur.cl/2012- planta-biogas-21kva-fundo-el-maqui/.

[45] Club Biogás, *Estadisticas Biogás Francia,* julio 2018.

[46] SISTEMA biobolsa - catálogo de productos, 03 2016. [En línea]. Available: http://sistemabiobolsa.com/.

[47] Arsytek, «Etude ACV - DRD, extrait de la Revue Générale Nucléaire N1/2000,» 2000. [En línea]. Available: http://www.arsytek.org/.

[48] ADEME, «Impact sanitaire et environnementaux du compostage sur les pratiques de compostage,» 2016.

[49] CTMNC, *Evaluation d'impact environnemental du transport.*

[50] Nosdechets.fr, «Etiquette: centre de stockage des déchets,» [En línea]. Available: desechos [http://www.xn--nosdchets-e4a.fr/tag/centre-de-stockage-des-dechets/.

[51] Wikipedia, «Certified_Emission_Reduction,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Certified_Emission_Reduction.

[52] cdm.unfccc.int, «Statistics cdm.unfccc.int,» [En línea]. Available: https://cdm.unfccc.int/Statistics/Public/CDMinsights/index.html.

[53] United Nations, «United Nations Treaty Collection,» 2012. [En línea]. Available: https://treaties.un.org/.

[54] sendeco2, «sendeco2,» 2019. [En línea]. Available: https://www.sendeco2.com/es/precios-co2. [Último acceso: mayo 2019].

[55] Wikipedia, «Kyoto_Protocol,» 2012. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol.

[56] Qube renewables, «Case Study Howard Tenens,» 2013.

[57] Lo Valledor, «Mercado Lo Valledor,» 21 mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.lovalledorchile.cl.

[58] https://es.weatherspark.com/, [En línea]. Available: https://es.weatherspark.com/. [Último acceso: mayo 2019].

[59] Grupo SAESA, «www.gruposaesa.cl,» 2019. [En línea]. Available: https://www.gruposaesa.cl/sustentabilidad/energia-sustentable/pmgd/.

[60] C. I. S. A., «http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Gestion_de_residuos/,» Julio 2019. [En línea]. Available: http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Gestion_de_residuos/. [Último acceso: 30 Julio 2019].

[61] C. I. S. A., «http://www.chile.generadordeprecios.info/,» Julio 2019. [En línea]. Available: http://www.chile.generadordeprecios.info/.

12. Anexos

Flujos de caja del proyecto

año	0	1	2	3	4	5
INGRESOS						
Energía eléctrica		$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560
Potencia eléctrica		$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898
Energía térmica		$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685
Compost/fertilizante		$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000
Créditos de carbono		$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588
Trasporte de desechos		$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254
Total ingresos		$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985
EGRESOS						
Inversión	-$ 2.973.387.539					
Energía eléctrica		-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355
Energía térmica		-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260
Gas natural		-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442
Agua		-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200
Preparación compost normado		-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000
Personal		-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000
Mantenimiento		-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000
Total egresos		-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257
Utilidad	-$ 2.973.387.539	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728
FINANCIAMIENTO						
Crédito (5% interés anual)	$ 2.973.387.539					
Amortización		-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117
Flujo de caja	0	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611
Flujo Neto	$ 0	$ 197.655.611	$ 395.311.223	$ 592.966.834	$ 790.622.445	$ 988.278.057
Amortización	$ 394.464.117					
NPV(con y sin crédito respectivament	$ 1.682.753.641	$ 2.067.661.495				
VAN (Calculo a mano)		-$ 2.435.096.877	-$ 1.945.741.730	-$ 1.500.873.415	-$ 1.096.447.673	-$ 728.787.908

6	7	8	9	10	11	12
$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560
$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898
$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685
$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000
$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588
$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254
$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985
-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355
-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260
-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442
-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200
-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000
-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000
-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000
-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257
$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728
-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117
$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611
$ 1.185.933.668	$ 1.383.589.279	$ 1.581.244.891	$ 1.778.900.502	$ 1.976.556.113	$ 2.174.211.724	$ 2.371.867.336
-$ 394.551.758	-$ 90.700.713	$ 185.527.510	$ 436.644.077	$ 664.931.864	$ 872.466.217	$ 1.061.133.810

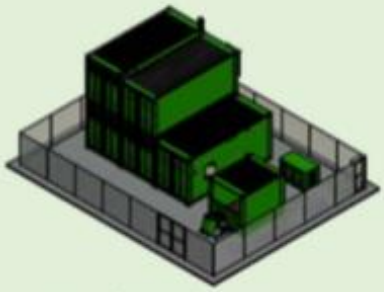
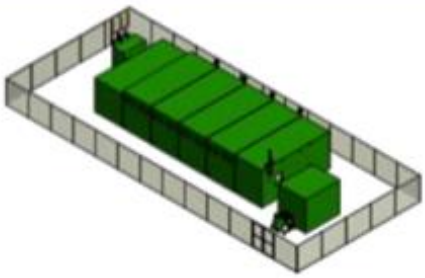
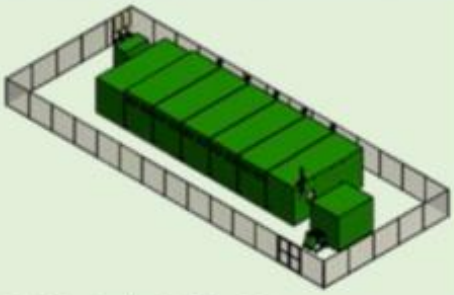
13	14	15	16	17	18	19	20
$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560	$ 542.749.560
$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898	$ 66.576.898
$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685	$ 46.085.685
$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000	$ 67.824.000
$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588	$ 5.769.588
$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254	$ 125.161.254
$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985	$ 854.166.985
-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355	-$ 162.826.355
-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260	-$ 9.217.260
-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442	-$ 3.024.442
-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200	-$ 67.200
-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000	-$ 33.912.000
-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000	-$ 18.000.000
-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000	-$ 35.000.000
-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257	-$ 262.047.257
$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728	$ 592.119.728
-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117	-$ 394.464.117
$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611	$ 197.655.611
$ 2.569.522.947	$ 2.767.178.558	$ 2.964.834.170	$ 3.162.489.781	$ 3.360.145.392	$ 3.557.801.004	$ 3.755.456.615	$ 3.953.112.226
$ 1.232.649.804	$ 1.388.573.434	$ 1.530.322.189	$ 1.659.184.694	$ 1.776.332.426	$ 1.882.830.363	$ 1.979.646.670	$ 2.067.661.495

Parámetros de Biobeebox [56].

Les paramètres de fonctionnement

GAMME	Tonnage traité	Débit Biogaz	Equivalent autre énergie	T_{CO2} économisé
BioBeeBox® XS	80-100 T/an	10.000 Nm3/an	40 T/an de bois	68 T_{CO2}
BioBeeBox® S	200 T/an	27.000 Nm3/an	41 T/an de charbon	141 T_{CO2}
BioBeeBox® M	300 T/an	40.000 Nm3/an	160 T/an de bois	272 T_{CO2}
BioBeeBox® L	500 T/an	68.000 Nm3/an	105 T/an de charbon	362 T_{CO2}
BioBeeBox® XL	800 T/an	110.000 Nm3/an	440 T/an de bois	748 T_{CO2}
BioBeeBox® XXL	1000 T/an	135.000 Nm3/an	208 T/an de charbon	718 T_{CO2}

Configuraciones de Seab Energy [56].

FB/MB 24 *Max. input:* 500 kg/day (solid waste) 1,100 kg/day (slurry)	 Flat footprint: 11 x 16 m	 Stacked footprint: 11 x 12 m
FB/MB 48 *Max. input:* 1,000 kg/day (solid waste) 2,250 kg/day (slurry)	 Flat footprint: 11 x 20 m	Stacked lay-out not available
FB/MB 72 *Max. input:* 1,500 kg/day (solid waste) 3,400 kg/day (slurry)	 Flat footprint: 11 x 22 m	 Stacked footprint: 11 x 14 m
FB/MB 96 *Max. input:* 2,000 kg/day (solid waste) 4,500 kg/day (slurry)	 Flat footprint: 11 x 26 m	Stacked lay-out not available
FB/MB 120 *Max. input:* 2,500 kg/day (solid waste) 5,650 kg/day (slurry)	 Flat footprint: 11 x 28 m	 Stacked footprint: 11 x 18 m

Parámetros de Seab Energy [56].

Important: the output figures of an anaerobic digester are entirely dependent on feedstock composition, quality and consistency. Consequently, the output figures given here are purely provided as an illustration, and cannot be taken as a guarantee of output.

Customer
Date 06/02/2019
SEaB Power Ltd Company Confidential

Waste Type	Food waste	
Quantity	1,000	kgs/day
Electricity Rate	0.14	€ /kWh
Heat Rate	0.06	€ /kWh
Cost of Waste Disposal	80.00	€ /tonne
Feed-in-tariff	0.00	€ /kWh
Heat Incentive	0.00	€ /kWh
Grants	0.00	€
Carbon Credi	25.00	€

System for Your site	1xFB120	
CHP	CA 50kW	
Total electrical production	138,555	kWh/yr
Parasitic electrical requireme	37,876	kWh/yr
Electricity available to site	100,679	kWh/yr
Total Heat Production	254,017	kWh/yr
Parasitic Heat Requirement	76,083	kWh/yr
Heat available to site	177,934	kWh/yr
Liquid fertiliser	290	tonnes/yr

CAPEX		
System	347,941	€
CHP	57,841	€
Installation	7,974	€
OPEX		
Maintenance	7,590	€ /yr
SAVINGS		
Electricity	14,095	€ /yr
Heat	10,676	€ /yr
Waste disposal	29,200	€ /yr
NEW INCOMES		
Feed-in-tariff	-	€ /yr
Heat Incentive	-	€ /yr
Grants	#REF!	€
Carbon credits	3,416	€ /yr
Fertiliser	8,693	€ /yr

Payback 7 year(s)

www.seabenergy.com +44 (0)20 3003 5086 newinfo@seabenergy.com