



Guía para el diseño, construcción, operación, mantenimiento, seguimiento y control de plantas de biogás de pequeña y mediana escala enfocadas al sector lechero en Chile

Documento elaborado por encargo de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, ONUDI



ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

Elaborado por:

V_{OGAZ}

Autores por orden alfabético:

Martí Herrero, Jaime

Pino Donoso, Mariela A.

Viquez Arias, Joaquín A.

Revisado por (orden alfabético):

Malebrán Ulloa, Christian

Obach Martiniello, Javier

Rosas Uribe, Marianela

Copyright 2017 ONUDI

Primera Edición: Septiembre 2017

Página web del proyecto: <http://www.minenergia.cl/biogaslechero/>

Proyecto GEF, ONUDI

Promoviendo el desarrollo de la energía a biogás en pequeñas y medianas agroindustrias seleccionadas

www.biogaslechero.cl

Registro de propiedad intelectual:

ISBN: 978-956-8963-06-4

Impreso en Chile



BIOGÁS EN EL SECTOR LECHERO EN CHILE



Guía para el diseño, construcción, operación, mantenimiento, seguimiento y control de plantas de biogás de pequeña y mediana escala enfocadas al sector lechero en Chile



ACLARACIÓN: Esta publicación ha sido preparada en el marco del proyecto “Promoviendo el Desarrollo de la Energía a Biogás en Pequeñas y Medianas Agroindustrias Seleccionadas”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (Global Environmental Facility, GEF), implementado por la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO por sus siglas en inglés), y ejecutado en Chile por el Ministerio de Energía. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición de las organizaciones involucradas. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte de GEF, ONUDI o el Ministerio de Energía.

ÍNDICE

¿CÓMO UTILIZAR ESTA GUÍA?	14
CONCEPTOS CLAVE Y ALGUNAS ABREVIACIONES USADAS EN ESTA GUÍA	17
1. INTRODUCCIÓN A LOS BIODIGESTORES	25
1.1 ¿Qué son los biodigestores? Una aproximación	25
1.2 ¿Pero qué sucede dentro de un biodigestor?	25
1.3 ¿Qué debe tener un biodigestor para producir biogás y digestato?	27
1.4 ¿Qué aspectos de seguridad deben considerarse en una planta de biogás en Chile?	27
1.5 Desarrollo de la tecnología de los biodigestores en el último siglo	28
1.5.1 ¿Cómo fue la introducción de biodigestores en Latinoamérica y el resto del mundo?	28
1.5.2 ¿Qué ha pasado con biodigestores más grandes y climas más fríos?	34
1.5.3 ¿En qué está la tecnología de biodigestores ahora?	35
1.6 ¿Y en Chile, en qué está la tecnología de los biodigestores?	36
1.6.1 Energías renovables no convencionales y el biogás en Chile	40
1.6.2 Biodigestores de pequeña escala y domésticos en Chile	42

ÍNDICE

2. ASPECTOS TÉCNICOS A REVISAR	45
2.1 Tipos de biodigestores	45
2.1.1 Biodigestor de mezcla completa	46
2.1.2 Biodigestor de flujo pistón	48
2.1.3 Biodigestor convencional (laguna cubierta o biodigestor prefabricado)	49
2.2 RILES lácteos como sustrato	52
2.3 Operación de los biodigestores	54
2.3.1 Puesta en marcha de plantas de biogás	55
2.3.2 Rangos típicos de monitoreo y control de los sistemas de biodigestión	57
2.3.3 Plan de mantenimiento	59
3. PRODUCTOS Y SERVICIOS DE LOS BIODIGESTORES	60
3.1 Propiedades del biogás y sus principales usos	60
3.1.1 Uso térmico del biogás	66
3.1.2 Uso mecánico del biogás	68
3.1.3 Uso eléctrico del biogás	70
3.2 Usos del digestato	72
3.3 Tratamiento de residuos	77
4. ¿ME CONVIENE UN BIODIGESTOR?	80
4.1 Escenario 1: Si necesito un sistema de tratamiento de purines o quiero mejorar el que tengo	81
4.2 Escenario 2: Si puedo optimizar el uso de los purines como fertilizante mediante la producción de digestato	83
4.3 Escenario 3: Si la demanda de energía me refleja importantes costos productivos	85

ÍNDICE

5. QUIERO UN BIODIGESTOR, ¿POR DONDE EMPIEZO?	89
5.1 ¿Qué condiciones se necesitan para tener un biodigestor? (ejemplos)	89
5.2 Disponibilidad regular del sustrato	89
5.3 Disponibilidad de agua	91
5.4 Manejo del digestato	94
5.5 ¿Dónde instalar mi biodigestor?	95
5.6 Normativa que aplica en Chile	97
5.7 Otros ejemplos de estimación de estiércoles disponibles	100
6. ¿QUÉ TIPO DE BIODIGESTOR ELEGIR Y QUÉ TAMAÑO?	103
6.1 Tamaño y diseño del biodigestor	104
6.2 ¿Cómo aprovechar los productos del biodigestor, en nuestros ejemplos?	110
6.2.1 Usando el biogás (casos de estudio)	110
6.2.2 Usando el digestato (casos de estudio)	114
6.2.3 Tratando los residuos (casos de estudio)	119
7. RENTABILIDAD DEL BIODIGESTOR	121
7.1 Análisis económico y financiero	121
7.1.1 Costo de inversión (CAPEX)	122
7.1.2 Gastos en la operación y mantenimiento del biodigestor (OPEX)	126
7.1.3 Ingresos percibidos por el proyecto de biodigestión	128
7.1.4 Término definitivo de operaciones de plantas de biogás	130
7.2 Indicadores financieros (TIR, VAN, Flujo de caja, Tiempo de retorno, etc)	130
7.3 Algunas conclusiones de los estudios de pre-factibilidad del proyecto	135

ÍNDICE

8. EMPRESAS PROVEEDORAS, ¿QUÉ DEBIERAN OFRECERNOS?	139
8.1 Responsabilidades de la empresa proveedora	139
8.2 Experiencia previa y referencias	143
8.3 Propuesta técnica, calidad y garantía	144
8.4 Servicio post venta	145
8.5 Calidad de la instalación del biodigestor	146
8.6 Seguridad en el sistema de uso del biogás y digestato	149
9. YA TENGO UN BIODIGESTOR, ¿AHORA QUÉ?	158
9.1 ¿Cómo sé que mi biodigestor está funcionando bien?	158
9.2 Optimizar manejo, prever crecimiento de mi predio	160
9.3 Optimizar usos del biogás	162
9.4 Optimizar usos del digestato	163
9.5 Sinergias con instituciones y mecanismos asociados	165
9.6 Evaluación económica continua	166
10 ¿DÓNDE ENCUENTRO MÁS INFORMACIÓN?	168
10.1 Sobre biodigestores y biogás	168
10.2 En inglés	169
10.3 Sobre usos del digestato	170
11 REFERENCIAS	171

ÍNDICE

12 ANEXOS	174
12.1 El marco regulatorio obligatorio, en más detalle	174
12.1.1 Tratamiento de aguas servidas	174
12.1.2 Regulación marco, específica a proyectos de biogás	175
12.1.3 Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017) de instalaciones de biogás	175
12.1.4 Norma chilena de 3381, Gestión de residuos, consideraciones para el diseño y operación de plantas de digestión anaeróbica (INN)	179
12.1.5. Norma chilena 3375, Requisitos de calidad digestato (INN).	180
12.1.6. Evaluación de impacto ambiental	181
12.2 Entidades que apoyan la implementación de biodigestores	186
12.3. Asistencia técnica	187
12.4. Mitigación de gases de efecto Invernadero	189

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Factores de conversión de materia orgánica en biogás	38
Tabla 2	Comparación de los diferentes tipos o modelos de biodigestores utilizados para el sector lechero en Chile	52
Tabla 3	Lista de competencias necesarias, según el perfil, para un plan de capacitación adecuado	55
Tabla 4	Lista de actividades necesarias para el monitoreo de los sistemas de biodigestión y rangos aceptables	58
Tabla 5	Composición típica del biogás	61
Tabla 6	Algunas propiedades de interés del biogás	63
Tabla 7	Comparación energética (poder calorífico) de 1 m ³ de biogás de % de metano, con otros combustibles conocidos	64
Tabla 8	Propiedades físicas y químicas del estiércol y sus propiedades una vez digerido anaeróbicamente en un biodigestor de mezcla completa	75
Tabla 9	Carga contaminante diaria equivalente según DS n°90/2000 (Aguas superficiales) y DS 46/2003 (Aguas Subterráneas)	78
Tabla 10	Valores máximo permisible de microorganismos según norma chilena 3375	79
Tabla 11	Valores máximo permisible de metales pesados según normativa chilena 3375	79
Tabla 12	Ventajas y desventajas del uso y aprovechamiento del digestato para predios lecheros en Chile	85
Tabla 13	Tipo de tarifa eléctrica en Chile	88
Tabla 14	Ejemplo sacado del manual de Salazar S. (2012) donde se muestra en un ejemplo el aporte de aguas lluvia no controladas a la carga de un biodigestor	93
Tabla 15	Resumen de legislación aplicable para producción y uso del biogás en Chile	98
Tabla 16	Tabla comparativa de ejemplos utilizados a lo largo de esta Guía	102
Tabla 17	Comparativo del tipo de biodigestor a utilizar según las prácticas de lavado en el predio lechero	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 18	Selección de tipo de biodigestor para los ejemplos de esta Guía	103
Tabla 19	Resumen de resultados de la determinación de la carga orgánica seca, o solidos volátiles de cada proyecto usados de ejemplo en esta guía	106
Tabla 20	Resumen de parámetros y decisiones para el dimensionamiento	107
Tabla 21	Resumen de los resultados obtenidos del cálculo de producción estimada de biogás para los ejemplos de esta guía	111
Tabla 22	Consumo de biogás de diferentes aplicaciones a biogás	112
Tabla 23	Resumen de estimaciones preliminares para los ejemplos de esta Guía, en relación a la cantidad de nutrientes que pueden generar en el digestato	114
Tabla 24	Flujo efectivo de ejemplificación de un reactor de mezcla completa de 2.700 m ³ de volumen de biodigestor, con generador de 200 Kw para autoconsumo. Moneda en USD \$ dólares americanos	133
Tabla 25	Casos de estudio mencionados en esta guía	178
Tabla 26	Tabulación resumen de decretos supremos que están vinculados a biogás	182
Tabla 27	Normas ambientales que pueden aplicar a una planta de biogás	185

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1	Componentes básicos de un biodigestor	27
Figura 2	Esquema de un biodigestor de domo fijo, de escalas domiciliarias	29
Figura 3	Modelo educativo de biodigestor de domo fijo en Camboya (Programa Nacional de Biogás)	30
Figura 4	Biodigestor tubular adaptado a condiciones de clima frío	32
Figura 5	Usos calóricos productivos del biogás	41
Figura 6	Agrícola AASA campo "Campesino", María Pinto, RM	42
Figura 7	Ejemplos de biodigestores de escala domiciliaria en Chile	44
Figura 8	Biodigestor de mezcla completa	47
Figura 9	Ejemplo de un reactor de flujo pistón para estiércol vacuno	49
Figura 10	Biodigestor de laguna cubierta, fundo El Ánima, 420 m ³ de capacidad de tratamiento	50
Figura 11	Ejemplo de un reactor tubular en una lechería de Puyehue, región de Los Ríos	50
Figura 12	Planta de tratamiento de RILES lácteos, Osorno	53
Figura 13	"Producto mejorador" de la eficiencia de la digestión anaerobia dentro de un biodigestor	56
Figura 14	Antorcha para quemar el biogás	65
Figura 15	Ejemplo de caldera en acero inoxidable de 150 litros (Consumo 4m ³ de biogás)	67
Figura 16	Calefont operado con biogás en lechería biodigestor experimental INIA Remehue, Osorno	67
Figura 17	Bomba de vacío de 600l, accionada por un motor de combustión interna de 15 HP. Juigalpa, Nicaragua	69
Figura 18	Picadora de pasto de 1 ton/hora operada con un motor mono cilíndrico de 14 HP a biogás. Juigalpa, Nicaragua	70
Figura 19	Cogenerador eléctrico a biogás en lechería VI región	72
Figura 20	Ejemplo de un pozo purinero en hormigón armado	83
Figura 21	Ejemplo del uso calorífico del biogás para la pasteurización de leche en fundo productor de quesos	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 22	Estiércol barrido con poca adición de agua en un predio lechero; ideal para digestores de mezcla completa o flujo pistón	91
Figura 23	Portada guía didáctica registro	97
Figura 24	Bibliografía de la lista de chequeo presentada en el libro Manual de manejo y utilización de purines de lechería de Francisco Salazar	99
Figura 25	Gráfica para determinar el tipo de biodigestor apto según el contenido de sólidos totales en la mezcla (asume 85%(bs) de SV)	109
Figura 26	Lentejilla de agua, esparganio y enea (Lemna minor; Sparganium erectum L. ssp. Neglectum, Typha latifolia); plantas utilizadas en piscinas artificiales	120
Figura 27	Sistema de post - tratamiento a partir de biomasa en biodigestor de tratamiento de aguas residuales, Nicaragua	120
Figura 28	Comparación de costos de inversión para proyectos de cogeneración con mezcla completa (MC) y laguna cubierta (LC) con relación a la potencia instalada	126
Figura 29	Manómetro para rangos bajos de presión (0 a 40 mbar, o 400 mca)	147
Figura 30	Medidor multiparámetros para biogás	148
Figura 31	Antorcha abierta para caudales desde 50 m ³ /hora	150
Figura 32	Válvula de alivio de presión/vacío	151
Figura 33	Válvula arresta llamas	152
Figura 34	Filtro de H ₂ S de carbón activado para altos flujos de biogás (hasta 1.200m ³ /h)	153
Figura 35	Soplador centrífugo con flujo y presión configurable, con motor ATEX	154
Figura 36	Plano de zonas de riesgo de explosión	155
Figura 37	Señalética zonas de peligro en planta de biogás en Kodersdorf	156
Figura 38	Ejemplo de un medidor de composición de biogás instalado en una planta de biogás en Alemania	158
Figura 39	Resumen de la guía didáctica para el registro de plantas de biogás en Chile	177

Desde hace algunos años el biogás ha sido vislumbrado como un producto que puede contribuir de manera importante al logro de los objetivos que el país se ha puesto en materia de energía. Si bien aún es incipiente, el biogás contribuye al cumplimiento de la Política Energética 2050 de Chile, la cual propone una visión del sector energético como un sector confiable, sostenible, inclusivo y competitivo.

El biogás es una fuente renovable de energía que puede jugar un rol relevante en el autoconsumo de la agroindustria, reduciendo los efectos ambientales adversos que acarrear los residuos de la actividad lechera, transformando la problemática en una oportunidad.

Esta guía ha sido elaborada como uno de los productos del proyecto “Promoviendo el desarrollo de la energía a biogás en pequeñas y medianas agroindustrias seleccionadas”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) e implementado en Chile por el Ministerio de Energía a través de la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). El proyecto ha sido denominado “Biogas Lechero”, en forma abreviada.

Esta guía tiene como objetivo orientar a los actuales y potenciales usuarios de biodigestores de escalas productivas, además de proveedores y agencias gubernamentales enfocadas en el contexto de la producción lechera en las regiones de Los Ríos y Los Lagos. Adicionalmente, a través de esta guía, se busca aclarar posibles interrogantes y dudas que existen en el sector, acercar el conocimiento a personas interesadas en esta tecnología y, con ello, disminuir riesgos e incertidumbres en torno a su implementación y operación. Esta guía técnica provee orientación en aspectos relevantes del diseño, construcción, operación, mantenimiento, seguimiento y control de plantas de biogás de pequeña y mediana escala que utilizan estiércol de ganado bovino como principal sustrato con foco en el sector lechero.

Ésta es una **guía autocontenida**, es decir, que no se requiere consultar otros textos para entender lo que aquí se aporta. No obstante, para profundizar sobre diversos aspectos, se recomienda la consulta de otros documentos ya publicados. De igual modo, la guía está pensada para que lectores, con diferente conocimiento sobre

los biodigestores, puedan encontrar la información que buscan. Por ello, incluso los capítulos son autocontenidos, lo que puede producir que se repitan algunos conceptos o explicaciones a lo largo de la guía.

El índice del documento ha sido planteado a modo de preguntas, con un desglose amplio de temas, de modo que el lector pueda elegir a qué parte de la guía acceder según su situación y conocimiento, además de su interés.

La guía se acerca en cada capítulo desde lo general a lo particular. En el **capítulo 1** se realiza un repaso breve a la digestión anaerobia y los biodigestores. Se contextualiza la tecnología de los biodigestores, principalmente en la región latinoamericana, y especialmente en Chile. El **capítulo 2** repasa tres tecnologías de biodigestores y expone las características del servicio y los dos productos asociados al uso de biodigestores (tratamiento de residuos, energía y fertilizante). El **capítulo 3** da una aproximación a los usos y servicios que se desprenden de la implementación de un sistema de tratamiento con digestión anaerobia. Estos capítulos sirven para entender y contextualizar los biodigestores.

A partir del capítulo 4, hasta el 12, se sigue un proceso de abajo-arriba, desde la auto identificación como potencial usuario de biodigestores, hasta contar con un biodigestor instalado en el predio. Esto quiere decir que el **capítulo 4** expone a quien le podría interesar tener un biodigestor en el contexto del sector lechero en Chile, el **capítulo 5** repasa las primeras consideraciones a tener en cuenta y realiza una serie de cálculos con ejemplos ficticios. El **capítulo 6** ayuda a definir criterios para identificar qué tipo y tamaño de biodigestor se adecua a cada situación, y el **capítulo 7** realiza el análisis económico, tratando de dar luz a la pregunta de ¿es rentable un biodigestor en mi predio? El **capítulo 8** de la guía repasa la relación, responsabilidades y la interrogante de qué esperar de las empresas proveedoras de biodigestores. El **capítulo 9** entrega algunas recomendaciones para evaluar la calidad y rendimiento de la instalación de un biodigestor y de los equipos asociados. Dirigido a las personas que ya tienen un biodigestor, mencionando posibles mejoras u optimizaciones que puedan reforzar los beneficios de la tecnología para el productor. El **capítulo 10**, finalmente, aporta otras fuentes de información seleccionadas, para profundizar en aspectos

adicionales.

Se han añadido **anexos**, donde se recopila toda la normativa vigente en Chile vinculada a los biodigestores, biogás y el digestato en el contexto del sector lechero, así como las entidades que podrían ayudar financiera o técnicamente. Además, se hace mención a los ahorros de gases de efecto invernadero que pueden ocurrir al instalar un biodigestor.

GLOSARIO

En este glosario se incorpora nomenclatura nacional en lo referente a términos técnicos comunes de diversas normativas y el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017), específicos a la temática del biogás.

A

Accidente: suceso repentino e inesperado, que altera el orden regular de la actividad asociada a las instalaciones de biogás y que genera daño a las personas y/o a las cosas.

Antorcha: artefacto para llevar a cabo la combustión completa del biogás sobrante, sin que exista aprovechamiento energético del gas.

Arresta llamas: dispositivo que se instala sobre la tubería de biogás y que impide que se propague la llama hacia el interior de las tuberías y equipos que contengan biogás.

Atmósfera explosiva (ATEX): ocurre en presencia de aire, en condiciones atmosféricas de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en la que, tras una ignición, la combustión se propaga a la mezcla no quemada. Dependiendo de la probabilidad de ocurrencia de la atmósfera explosiva se identifican las siguientes zonas:

Zona 0: área de trabajo en la que existe una atmósfera explosiva, consistente, en una mezcla de aire con sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla con presencia permanente o por un periodo prolongado. También se define como zona o volumen que contiene la sustancia inflamable misma (por ejemplo: el interior de un estanque de almacenamiento o de la tubería de transporte).

Zona 1: área de trabajo en la que es probable, en condiciones normales de explotación, que se forme de manera ocasional una atmósfera explosiva consistente en una mezcla de aire con sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla.

Zona 2: área de trabajo en la que no es probable, en condiciones normales de explotación, que se forme una atmósfera explosiva consistente en una mezcla de aire con sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla o en la que, en caso de formarse, dicha atmósfera solo permanece durante breves periodos.

B

Biogás: mezcla de gases obtenida por procesos de digestión anaeróbica de materia orgánica, cuyos componentes principales son (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con presencia de nitrógeno, oxígeno, ácido sulfhídrico (H_2S) y vapor de agua. (Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017) y norma chilena 3375).

Biogás productivo¹: la utilización de tecnología aplicada de digestión anaeróbica que ofrece manejo de residuos, reciclaje de nutrientes y servicios de energía renovable que proveen y apoyan las actividades económicas de emprendedores, pequeñas y medianas empresas, y que no entran en la clasificación de biogás doméstico ni industrial.

Biodigestor: contenedor en el cual se produce la degradación anaeróbica (digestión anaeróbica) de la materia orgánica, conocido también como digestor, reactor o fermentador.

C

Certificado de aprobación o conformidad: documento emitido por un organismo de certificación o Instaladores autorizados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), en el que se declara que el diseño y construcción de una instalación de biogás está conforme a las disposiciones y normas técnicas referidas "en el presente reglamento".

Co-fermentación: La mezcla de más de dos sustratos dentro de un biodigestor. Por ejemplo, que un biodigestor funcione con purín de un predio, pero adicionalmente se agrega suero lácteo.

D

Digestato: producto líquido o sólido del proceso de digestión anaeróbica. También conocido como efluente y biol. Se dice digestato líquido cuando es bombeable, y digestato sólido cuando es perforable y apilable (también conocido como biosol). (Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017) y Norma Chilena 3375)

Digestión anaeróbica-según NCh 3375: proceso de degradación controlada de materiales biodegradables en ausencia de oxígeno a una

¹ (SNV, Netherlands Development Organisation, 2014)

temperatura adecuada, donde naturalmente existen especies de bacterias facultativas y anaerobias que transforman la biomasa en biogás y digestato.

Dispositivos de medición y/o control: instrumentos que permiten medir y/o controlar el proceso de producción, almacenamiento, transferencia y uso o consumo de biogás, tales como manómetro, termocuplas, medidores de humedad, medidores de consumo, entre otros.

Dióxido de carbono: el segundo de los gases con mayor presencia en el biogás (no es combustible).

F

FOS/TAC: Análisis realizado al digestato, para conocer la relación entre "FOS", ácidos orgánicos volátiles (por sus siglas en Alemán), y "TAC", carbonato inorgánico total (por sus siglas en Alemán), como guía para evaluar el proceso de fermentación.

G

Gasómetro: contenedor donde se almacena el biogás. También conocido como reservorio.

GEI: Gases de efecto invernadero.

H

Higienización: proceso mediante el cual se asegura la muerte (por debajo de los límites detectables y/o permitidos de acuerdo a la normativa) de indicadores de contaminación fecal, patógenos y parásitos, como consecuencia de altas temperaturas.

I

Instalación o planta de biogás: instalación ubicada dentro de una propiedad donde se desarrollan las actividades de producción, almacenamiento, transferencia y utilización de biogás, incluyendo todo equipamiento, edificios e instalaciones complementarias, tales como sistemas de recepción y preparación de sustrato y que permiten una correcta operación de dicha instalación o planta.

Instalaciones pequeñas*: instalaciones de biogás cuya potencia de generador eléctrico instalada es menor o igual a 180 kW.

Instalaciones medianas*: instalaciones de biogás cuya potencia de generador eléctrico instalada es mayor a 180 kW y menor o igual a 900 kW.

Instalaciones grandes*: instalaciones de biogás cuya potencia de generador eléctrico instalada es mayor a 900 kW.

*Según el reglamento de seguridad de las plantas de biogás.

M

Manual de Seguridad: documento obligatorio, según el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017), que contiene las instrucciones y procedimientos de seguridad en la operación y en el término definitivo de operación de una instalación de biogás.

Materia orgánica: materia elaborada de compuestos orgánicos provenientes de restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos.

Materias primas (según NCh 3375): productos o residuos que se descomponen biológicamente durante el proceso de digestión anaeróbica.

Metano: hidrocarburo de origen natural (CH_4), en las minas recibe el nombre de gas grisú y es también fruto de la digestión anaeróbica. Constituye hasta el 97 % del gas natural. Es el gas combustible del biogás y también un gas de efecto invernadero, 23 veces más dañino que el CO_2 .

N

Norma: la Norma Chilena 1 (NCh1), señala que una norma es un “documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que entrega, para el uso común y repetido, reglas, directrices o características para actividades o sus resultados, dirigidas al logro de un grado óptimo de orden en un contexto dado”.

Norma Chilena (NCh): se puede definir a la Norma Chilena como una norma existente que es adaptada por un organismo nacional de normas y que ha sido estudiada según el procedimiento de la NCh1 y está aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización.

NCh3375:2015: Digestato-Requisitos de calidad

NCh3381:2016: Gestión de Residuos -Plantas de digestión anaeróbica
-Consideraciones para el diseño y operación.

O

Organismo de Certificación (OC): persona jurídica, que emite los respectivos certificados de conformidad o informes de rechazo de un producto, sistema o instalación de biogás. Dicha entidad deberá ser autorizada por la superintendencia, de acuerdo a los procedimientos que esta determine.

Operador: persona natural o jurídica que administra una planta de biogás a cualquier título, sea propietario, consignatario, arrendatario, mero tenedor u otro.

P

Partida: volumen de digestato que sale del reactor anaerobio que se acumula previo a ser entregado o aplicado.

pH: medida de acidez o alcalinidad de una solución, indica la concentración de iones de hidrógeno (H)⁺.

Piscina de eculización: estanque de recepción de sustratos para homogeneizarlos previo a la entrada del biodigestor.

Preparación de sustrato: actividad de tipo físico, químico y/o biológico que permite obtener las condiciones de entrada de un sustrato al proceso de digestión anaeróbica definidas en el diseño.

Presión de operación: presión de trabajo del biogás en una instalación de biogás, para su normal operación, cuya magnitud está dada por las características de ésta. La presión de operación se clasifica según su magnitud en:

Alta presión (AP): $P \geq 600$ kPa.

Media presión (MP): $5 \text{ kPa} < P < 600$ kPa.

Baja presión (BP): $P \leq 5$ kPa.

Proceso de depuración: tratamiento donde se extrae el dióxido de carbono (CO₂) al biogás, conocido como upgrading o metanización, con el objeto de aumentar la concentración de metano en este. Una vez limpio se denomina biometano y su poder calorífico pasa a ser muy similar al del gas natural.

Proceso de limpieza: tratamiento donde se extrae el agua y/o ácido sulfhídrico (H₂S) y/o siloxanos y/o amoníaco (NH₃), con el objeto de limpiar el biogás de sustancias tóxicas o corrosivas.

Producción de biogás: generación de biogás en procesos de digestión anaeróbica de materia orgánica.

Purín de lechería: mezcla de fecas, orina y agua principalmente, junto con

restos de paja, aserrín, tierra y residuos de alimentos, provenientes principalmente de predios lecheros y patios de confinamiento de ganado.

R

Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás: del Ministerio de Energía (2017), de Diseño, Construcción y Operación de Plantas de Biogás. Aprobado mediante Decreto 119 del Ministerio de Energía del 2 de febrero del 2017, que también introduce modificaciones al reglamento de instaladores de gas.

Riesgo: probabilidad de ocurrencia de un suceso que puede causar un daño y también el grado de severidad del mismo.

S

Seguridad: condición en que se está libre de sufrir o causar un daño.

Sistema de Gestión de Seguridad y Riesgos, SGSR: sistema de gestión en materias de seguridad y riesgos en una instalación de biogás, que incluye una estructura de organización, manuales, procedimientos, responsabilidades, planes y programas, recursos, etc., que forma parte de la función general de gestión de una instalación de biogás y que define y aplica la Política de Seguridad y Riesgos.

Sistema de tratamiento: parte de una instalación de biogás donde se realiza el proceso de limpieza y/o depuración del biogás.

Sustrato: materia orgánica que se digiere en un proceso de digestión anaeróbica.

T

Tecnología: conjunto de los instrumentos, equipos, sistemas y procedimientos. Término definitivo de operaciones: término de las operaciones de una instalación o planta de biogás, ya sea de manejo de sustrato, producción, almacenamiento y uso o consumo de biogás.

Tiempo de Retención Hidráulico (THR): relación aritmética entre el volumen líquido (útil) o sólido del biodigestor y el caudal promedio, o bien el tiempo promedio que tarda el sustrato desde que entró y salió del sistema.

Tubería de extracción de sólidos: es aquella tubería que conduce

el material sólido acumulado en el fondo del biodigestor a un sistema de almacenamiento exterior.

Tubería de suministro: es aquella tubería que conduce biogás hasta un artefacto a biogás o hasta una unidad generadora y comienza desde la salida del proceso de limpieza de ácido sulfhídrico.

Tubería de transferencia de biogás: tubería para la conducción de biogás en una instalación.

Tubería del efluente: es aquella tubería que conduce el material digerido fuera del biodigestor y conecta este último con el estanque de almacenamiento de material digerido.

Tubería del influente: es aquella tubería que conduce el sustrato hacia el interior del biodigestor y conecta el estanque de recepción de sustrato y/o homogeneizador con la entrada de alimentación del biodigestor.

U

Unidad CHP: es un motor a combustión interna de cogeneración, mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útiles.

ACRÓNIMOS

CHP	Combined heat and power (motor que genera electricidad y calor)
COVA	Carga orgánica volumétrica de alimentación, conocido en inglés como OLR (organic loading rate)
ERNC	Energías renovables no convencionales
FOS	Utilizado en Alemania para referirse a ácidos grasos volátiles
GEF	Global Environmental Facility, Fondo Mundial para el Medio Ambiente, en español.
GIZ	Agencia Alemana de Cooperación Internacional
HDPE	High density Polyethylene, en español: Polietileno de Alta Densidad
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
INN	Instituto Nacional de Normalización
LAC	Latino América y el Caribe
ppm	Partes por millón
SAG	Servicio Agrícola y Ganadero
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SIC	Sistema Interconectado Central
SING	Sistema Interconectado del Norte Grande
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SNV	Agencia de Desarrollo Holandesa
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
TAC	Utilizado en Alemania para referirse a la alcalinidad total
UASB	RAFA (en español) Reactor anaerobio de flujo ascendente

1.1 ¿QUÉ SON LOS BIODIGESTORES? UNA APROXIMACIÓN

Los biodigestores son una tecnología que permite transformar los residuos orgánicos en un combustible como el biogás y un fertilizante como el digestato. Los residuos orgánicos pueden ser de todo tipo, como estiércoles de animales, purines, basura orgánica de mercados, mataderos, aguas servidas domiciliarias, residuos de cocina y procesos de transformación alimentaria (suero de leche, industria vitivinícola, cervecera, etc.). A lo largo de la guía se le denominará sustrato al residuo orgánico que hace ingreso al biodigestor previo o no su pre-tratamiento.

El biogás es un gas combustible que tiene entre un 50 % y un 80 % de metano (CH_4) y entre un 30 %, y 40 % de dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) y otros elementos traza. De éstos, solo el metano es combustible. El metano producido en el biodigestor, es el mismo que se distribuye hoy como gas natural y es similar al propano o butano de los cilindros de gas.

El digestato se produce tras el paso de sustratos por un biodigestor, tiene una parte líquida y otra sólida que conserva todos los nutrientes de los residuos orgánicos originales (del estiércol, por ejemplo), pero cambia en su forma química pasando de orgánica a mineral. Esto hace que los nutrientes del digestato, una vez aplicados al suelo, puedan ser directamente asimilables por plantas. Además, el digestato lleva consigo fitohormonas (vitaminas) y microorganismos que complementan su aporte a las propiedades físicas y químicas del suelo (Groot, 2013).

1.2 ¿PERO QUÉ SUCEDE DENTRO DE UN BIODIGESTOR?

Dentro de un biodigestor ocurre un proceso llamado **digestión anaerobia**, el cual es producido en una serie de etapas en las que participan diferentes comunidades bacterianas. Se trata de un proceso en cadena, donde bacterias degradan o descomponen la materia orgánica y sus residuos son aprovechados por otras bacterias y a su vez, sus residuos por otras, y así sucesivamente. De este modo, esta cadena de producción deja como productos el biogás y el digestato.



En el proceso de la digestión anaerobia se identifican cuatro fases: (1) hidrólisis, (2) acidogénesis, (3) acetogénesis, y (4) metanogénesis, en esta última, es donde se produce el metano. Estos consorcios de bacterias se encuentran en la naturaleza y su característica es que viven en ausencia de oxígeno, en mayor o menor medida. Se encuentran en los fondos de los pantanos y en los sistemas digestivos de animales y sus estiércoles, y forman parte de la producción de gases en la digestión humana. Por tanto, el trabajo de transformación de materia orgánica a biogás y digestato en un biodigestor es desarrollado por bacterias que se encuentran fácilmente en estiércoles frescos.

Al ser un proceso que depende de organismos vivos, la velocidad a la que se produce la digestión anaerobia depende de la temperatura a la que éstos se encuentren. A mayor temperatura, más rápida se producirá la digestión. Normalmente se identifican tres rangos de temperaturas de trabajo de las bacterias: psicofílico que va desde los 10°C hasta los 20-25°C, mesofílico de 20-25°C a 35-40°C y termofílico de 35-40°C a 70-75°C. Entre mayor es la temperatura, menor es el tiempo que se requiere para que las bacterias realicen su trabajo.

.....
• **Rangos de temperatura a los que trabaja un biodigestor:** •
•

- psicofílico: de 10 a 20-25°C
 - mesofílico: de 20 a 40°C
 - termofílico: de 35 a 70°C
-

Llevado al esquema de una cámara de biodigestión, ésta será, por tanto, más pequeña, mientras más rápido ocurra el proceso (a un mismo volumen de sustratos). El tiempo que se le da a las bacterias para trabajar un sustrato dentro del biodigestor (o el tiempo que pasa un sustrato dentro del biodigestor desde que es cargado hasta que es descargado) se llama Tiempo de Retención Hidráulico (THR) y es uno de los parámetros claves en el diseño de estos proyectos.

1.3 ¿QUÉ DEBE TENER UN BIODIGESTOR PARA PRODUCIR BIOGÁS Y DIGESTATO?

Se necesita una entrada de sustratos, una cámara hermética (o también denominada estanca), aislada de la atmósfera exterior (del oxígeno y el aire), para el adecuado funcionamiento de las bacterias y la captura del biogás generado; una salida de biogás y una salida del digestato. Este es el esquema básico de una planta de biogás. A partir de aquí, se pueden comenzar a añadir instalaciones previas a la entrada de sustrato (sistemas de pre tratamiento, cómo son los tambores rotatorios, trampas de arena, separador de aguas de lluvia, cierre de canaletas), en el interior de la cámara (sistemas de agitación, calefacción, filtros, etc.) y posterior a la salida de digestato (sistemas de post tratamiento). Por el momento, empecemos con la base: una entrada, dos salidas (biogás y digestato) y una cámara hermética. La Figura 1 muestra estos componentes de forma sencilla.

Figura 1. Componentes básicos de un biodigestor



Fuente: Elaboración propia, 2017.

1.4 ¿QUÉ ASPECTOS DE SEGURIDAD DEBEN CONSIDERARSE EN UNA PLANTA DE BIOGÁS EN CHILE?

En Chile existe un Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017), que se aprobó el 2 de febrero de 2017 (Decreto n° 119 del Ministerio de Energía), en que se definen los tamaños de plantas de biogás y las características que éstas deben cumplir para asegurar no sólo la seguridad de su uso, sino que también su inocuidad. Además de las consideraciones constructivas aplicables normalmente en toda infraestructura



(protecciones contra daños mecánicos y térmicos, vientos, condiciones medio ambientales, sismos e inundaciones), los materiales, productos, elementos, accesorios, revestimientos, construcciones o estructuras utilizadas, deben tener la aptitud química y física para su uso y contacto con biogás, además de las consideraciones normalmente relacionadas al manejo de un gas combustible que puede contener elementos corrosivos. Dicho reglamento, adicionalmente, dice que toda instalación debe ser realizada por operarios que tengan la Licencia Clase 4, la que da la posibilidad de diseñar, proyectar, ejecutar y/o mantener las instalaciones de biogás.

Otra fuente de consulta es la publicación titulada “Biogas, safety first; Directrices para el uso seguro de la tecnología del biogás” publicado por la Asociación Alemana de Biogás en noviembre de 2016² (Fachverband Biogas e. V, 2016), en donde se detallan los peligros, la evaluación del peligro en cada caso, un plan de protección contra incendios, y las medidas de protección y documentación aplicables a escala internacional de plantas de biogás de tamaño medio y grande; con el objetivo principal de concientizar respecto a la seguridad (salud y seguridad laboral).

1.5 DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE LOS BIODIGESTORES EN EL ÚLTIMO SIGLO

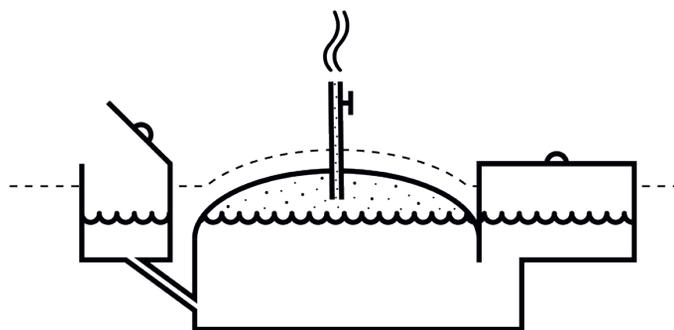
1.5.1 ¿CÓMO FUE LA INTRODUCCIÓN DE BIODIGESTORES EN LATINOAMÉRICA Y EL RESTO DEL MUNDO?

La tecnología de los biodigestores comenzó a implementarse en Latinoamérica y el Caribe (LAC) en los años 70, en países como Perú, Bolivia, y Nicaragua. En la década anterior se implementaron en Asia una gran cantidad de biodigestores sencillos, que se cargaban con estiércol de vaca o cerdo y producían biogás suficiente para que una familia pudiera cocinar, iluminarse y usar el digestato

en sus cultivos y pisciculturas³. Se intentó trasladar esta experiencia a LAC, de la mano de agencias de cooperación internacional, como la Agencia Alemana de Cooperación Internacional GIZ.

En experiencias anteriores, la GIZ trabajó con universidades nacionales para implementar los diseños de biodigestores traídos de Asia, realizar investigación, difundir y dar seguimiento a los sistemas que se instalaban. Estos sistemas estaban basados principalmente en biodigestores de domo fijo, conocidos como **biodigestores chinos**, que están enterrados en el suelo y contruidos de cemento y ladrillos (Figura 2). Su diseño consiste en una bóveda con una entrada y salida laterales (para ingreso de materia orgánica y salida de digestato), y una salida de biogás en la cota más alta de la cúpula de la bóveda. Otro modelo de biodigestor que se probó fue el domo flotante, también conocido como **biodigestor hindú**, con un diseño similar al domo fijo, pero donde la cúpula es un tambor invertido de acero, flotando sobre el líquido del biodigestor. Debido a sus mayores costos (principalmente por la cúpula), y a pesar de sus beneficios (aporta una presión constante al biogás), no tuvo mucho impacto ni replica en la región.

Figura 2. Esquema de un biodigestor de domo fijo, de escalas domiciliarias



Fuente: Fabián Donoso B, 2014.

El problema que encontraron estos biodigestores, contruidos de cemento y ladrillo, fue que requerían de albañiles altamente calificados, lo que incrementaba los

³ En la actualidad más de 750.000 biodigestores de escala doméstica han sido instalados por la Agencia de Desarrollo Holandesa (Stichting Nederlandse Vrijwilligers, SNV), en Asia y África principalmente, y más de 55.000 han sido instalados en África a través del Biogás Partnership Programme.

costos de mano de obra, y no permitía encontrar con facilidad personas con conocimientos y experiencia adecuados. Para compensar esta situación, se tendió a subsidiar completamente estos sistemas desde la cooperación internacional.

Figura 3. Modelo educativo de biodigestor de domo fijo en Camboya (Programa Nacional de Biogás)



Fuente: Jan Lam, SNV, 2015.

Durante los años '70 y '80 se instalaron decenas de estos sistemas en LAC (México, países centroamericanos, Cuba, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú principalmente), pero con muy bajo impacto y sostenibilidad, pues una vez que los subsidios finalizaron, la construcción de nuevos sistemas se detuvo. En los '90 y la primera década del nuevo milenio, solo se reportaron nuevas instalaciones de biodigestores de domo fijo en el valle de Arequipa en Perú y a un ritmo de uno o dos por año. En el resto del continente, este modelo desapareció. ¿Por qué no tienen éxito estos biodigestores en LAC, cuando en Asia se cuentan por millones y cada año se instalan decenas de miles? No hay una respuesta definitiva, pero se puede suponer que resultaron sistemas de alto costo para los

productores locales, ya que varios de los proyectos solo financiaban hasta la etapa de instalación y puesta en marcha de los sistemas, sin cuidar las etapas de seguimiento posteriores, ni incentivar la creación de capacidades locales para su mantenimiento. Esto dificultó el empoderamiento de los productores locales sobre la tecnología, de modo que ni la demanda ni la oferta perduraron. En gran medida la ausencia de estrategias centralizadas que incentivaran y apoyaran la creación de programas a nivel nacional, o al menos difundiera la tecnología, desincentivaron la adopción masiva de estos sistemas y el desarrollo de un sector sostenible en comparación a las realidades de China e India de aquella época.

Cabe mencionar que las iniciativas llevadas a cabo en Asia tienen un componente de apoyo público bastante alto, con uso de infraestructura y recursos estatales que cubren todas las regiones, adaptación de los biodigestores a condiciones geográficas locales, así como también promoción y difusión basadas en la idiosincrasia y necesidades de la región. Al respecto es importante destacar que por la alta densidad poblacional, las familias de bajos recursos encuentran dificultades para conseguir leña para cocinar, y otros combustibles resultan caros o difíciles de encontrar. Por lo tanto, en Asia vender los biodigestores y ofrecer mecanismos de financiamiento de la tecnología (con préstamos locales e inclusive con subsidios diferenciados, más altos para la gente de menos recursos), ha sido uno de los factores de éxito reconocidos para la difusión y masificación del uso de esta tecnología. Esto ha permitido, sin duda, ampliar el abanico tecnológico a mayores escalas y el tratamiento de otros residuos, más allá de los agropecuarios.

En los años '80, en Colombia, se desarrolló un modelo de biodigestor barato y sencillo: el biodigestor tubular, también llamado "salchicha", "de bolsa", o "plástico" por ser éste el material del que está fabricado (Figura 4). Este modelo proviene de una adaptación de un modelo de biodigestor tubular ya implementado en Taiwán, fabricado en PVC. Si los biodigestores de domo fijo, cómo el modelo chino, se parecían a una olla enterrada, estos biodigestores tubulares se asemejan a un intestino alargado, con una entrada de sustrato a un extremo, una salida de digestato al otro y una cúpula que se inflaba, y quedaba por encima del nivel del suelo, con una salida de biogás.

La adaptación que se hizo en Colombia fue fabricada usando plástico de invernadero. Este modelo dio muy buenos resultados en los climas cálidos y por su sencillez de instalación y bajo costo de materiales, derivó en que los biodigestores tubulares comenzaran a instalarse por todo LAC de forma paulatina. Costa Rica, Nicaragua, Ecuador, México, etc., se sumaron a Colombia en la implementación de este modelo. Normalmente se trabajó en zonas cálidas con tamaños familiares (con 20 kg a 30 kg de estiércol cargado por día), pero también se instalaron en sistemas productivos, lecherías y porcicultores. En la primera década del milenio se adaptaron estos biodigestores tubulares a zonas frías, pero asoleadas, como el altiplano boliviano y la sierra de Perú, encerrando el biodigestor tubular en un invernadero compacto, con muros de adobe y aislamiento térmico en la zanja. De este modo se logró poner en funcionamiento biodigestores domésticos sencillos en climas de frío extremo en latitudes altas de Los Andes, sin necesidad de sistemas de calefacción activos, pero con un buen diseño de calefacción solar pasiva que permite la producción de biogás para uso doméstico, inclusive en los meses más helados del año.

Figura 4. Biodigestor tubular adaptado a condiciones de clima frío



Nota: Biodigestor instalado en el Centro de investigación de Biodigestores, biogás y digestato (CIB3), en la Finca Experimental de Choquenaira (La Paz, Bolivia) de la Universidad Mayor de San Andrés, a 3.850 msnm. Fuente: Martí-Herrero, J., 2015

Al igual que en el proceso de los '70 y '80 con los biodigestores de domo fijo (modelo chino), el problema de este sistema se vio en la estrategia de implementación, se repitieron errores por falta de seguimiento y de altos subsidios en contextos de bajo conocimiento de los sistemas, lo que trajo consigo un bajo nivel de valoración de la tecnología. Las experiencias fueron variadas con este modelo y al igual que en las décadas anteriores, los proyectos que se desarrollaron a través de alto financiamiento inicial, casi nulo seguimiento y escasa creación de capacidades, fracasaron. Sin embargo, el éxito de otros proyectos ha permitido la optimización de la tecnología de biodigestores tubulares y su evolución hasta el día de hoy. En la actualidad convive la instalación de biodigestores tubulares familiares, fabricados en plástico de invernadero, con biodigestores productivos fabricados en geomembranas de PVC o polietileno, de mucha mayor durabilidad y en mayores tamaños.

Estos modelos de biodigestores sencillos (domo fijo o tubulares, etc.) son los que cuentan con un mayor número de instalaciones en el mundo, y cubren una amplia gama de productores, desde el nivel familiar/doméstico hasta el de medianos productores. Se caracterizan por su sencillez y por no necesitar motores que agiten o recirculen el estiércol dentro, así como prescindir de sistemas de calefacción activos, ya que normalmente se hacen a escala familiar, o poco más que ello y en climas cálidos o templados.

1.5.2 ¿QUÉ HA PASADO CON BIODIGESTORES MÁS GRANDES Y CLIMAS MÁS FRÍOS?

La tecnología en Europa y Norteamérica se ha desarrollado bajo otro concepto. En estas regiones más frías se ha tendido al desarrollo de soluciones que requieren de mayor tecnología para calentar, agitar y pre tratar el sustrato, entre otros. Ello, con el consecuente efecto sobre el nivel de inversión y costos de operación y mantenimiento. En el caso particular de Alemania, la necesidad de producción de energía a partir de recursos renovables para alcanzar metas establecidas a nivel estatal en energía renovable en la matriz eléctrica, gatilló un marco de apoyo e incentivó la creación de una industria del biogás, **la que se enfocó en la producción de electricidad; y que no necesariamente es una solución a la problemática de residuos orgánicos.** Para hacer factible estos objetivos e inversiones se ha tendido a implementar biodigestores de gran escala (en rangos entre 251 a 1.000 kW_{el}, y en promedio 379 kW_{el}), en los que también se centralizan residuos de varios kilómetros a la redonda destinados a la producción de electricidad y calor distrital, para lo cual reciben incentivos por parte del gobierno; en un contexto de capacidades técnicas ya bastante desarrolladas, y buscando también reemplazar las actividades agrícolas convencionales por otras formas de negocio, de menor riesgo. Por lo que se ha llegado a realizar cultivos para la producción de biomasa de alto contenido energético (maíz principalmente) para alimentar estos biodigestores, lo que ha modificado el paisaje agrícola.

Este proceso de sofisticación de los biodigestores también permite hacerlos más compactos. El hecho de que en éstos se controle la temperatura (utilizando una fracción del biogás generado para su calefacción o haciendo uso del calor producido por el cogenerador de electricidad), permite reducir el Tiempo de Retención hidráulico (TRH) y, por tanto, reducir el tamaño del biodigestor.

Europa cuenta con unos 14.000 biodigestores de este tipo, en promedio son de 450 kW_{el} (Rutz, 2015), de ellos, aproximadamente un 64% se encuentran en Alemania. Este desarrollo fue incentivado por altos subsidios gubernamentales para la producción de electricidad a partir de biogás, primero financiando el uso del maíz, luego subsidiando el uso de estiércol animal, lo que logró que Alemania

instalara 1.000 grandes biodigestores por año. Sin embargo, una vez que se redujeron estos subsidios (alrededor del año 2014), Alemania bajó el ritmo de instalación a 61 nuevos biodigestores en 2015, lo que dejó al descubierto la alta dependencia del subsidio de modelos más eficientes y sofisticados. En Europa en general, hoy se busca incentivar el uso del biogás en motores de cogeneración para aumentar la eficiencia de uso del combustible, llegando a valores de aproximadamente 90% (35% de electricidad, y 65% de calor) (EC-Programme IEE Intelligent Energy Europe, 2015). En Países Bajos, Bélgica, Italia y Alemania, se está incentivando la instalación de biodigestores de manera descentralizada (por predio), alimentados principalmente de residuos agropecuarios (estiércol) del propio predio (Bioenergy farm, 2017). Esto está incentivando el desarrollo de biodigestores más apropiados para la mediana y pequeña escala, bajando sus aportes tecnológicos para que sean rentables en niveles menores.

1.5.3 ¿EN QUÉ ESTÁ LA TECNOLOGÍA DE BIODIGESTORES AHORA?

Actualmente existe un gran abanico de tecnologías de biodigestores disponible. Por un lado, están los biodigestores que no requieren sistemas de agitación o calefacción y que se caracterizan por su sencillez, baja inversión y menor sofisticación tecnológica, aunque no menor necesidad de mantenimiento. Este tipo de biodigestores se han implementado de forma masiva a escala familiar y en climas cálidos de LAC, África, y Asia, aunque ya existen experiencias en climas más fríos y escalas mayores (con menores eficiencias y costos de inversión). Por otro lado, están los biodigestores de mayor requerimiento de tecnología (conocidos en Chile como “mezcla completa”), caracterizados por la agitación, calefacción, automatización, alta eficiencia y mayores costos de inversión y mantenimiento. Entre estos dos extremos existe todo un abanico versátil, variado y flexible de modelos de biodigestores capaces de dar respuesta a las diversas situaciones para las que son requeridos.

1.6 ¿Y EN CHILE, EN QUÉ ESTÁ LA TECNOLOGÍA DE LOS BIODIGESTORES?

El país ha seguido a su propio ritmo la difusión e implementación de biodigestores. Sus particularidades climáticas y de tipología de productor lo diferencian del resto del continente. En el sur de Chile, sus condiciones climáticas frías y nubladas, lo diferencian de la región andina en el norte, donde a pesar del frío, se desarrolló la calefacción solar pasiva que aprovecha la radiación solar, incluso en invierno, para subir la temperatura a los biodigestores⁴. Por ello se necesitan diseños y estrategias locales para acondicionar térmicamente los biodigestores a los inviernos fríos, lluviosos y nublados.

En Chile ya existen experiencias con biodigestores sofisticados de gran tamaño (desde 5.000 hasta 58.000 m³ de producción de biogás/año), y generación de energía eléctrica del orden de hasta 121.395 MWh/año (Avalos P., 2013). También se han registrado experiencias de inversión en diferentes sectores (plantas de tratamiento de aguas servidas, agroindustria, purines y estiércoles, e inclusive captura de metano desde rellenos y vertederos), normalmente es tecnología importada de países europeos o norteamericanos con climas similares, aunque también con capacidades económicas, incentivos y políticas energéticas diferentes. Esta tecnología incluye mezcla completa, UASB, y lagunas cubiertas. Y en la medida que un biodigestor es capaz de producir biogás sobre los 280 kW se acerca a los valores internacionales de economía a escala para la utilización de co-generadores, los que requieren otro tipo de implementación tecnológica, por ejemplo la utilización de torres de lavado de H₂S, trampas de arena y fibra, inversión en infraestructura y otros costos de mantención asociados.

Por otro lado, se han realizado desarrollos locales con purines bovinos donde se ha trabajado con biodigestores más sencillos enfocados a satisfacer requerimientos de energía calórica, la mayoría sin calefacción, ni agitación. En Chile el abanico de tecnologías de biodigestores aún está en desarrollo, para lograr una consolidación del sector.

4 Martí Herrero J. Desarrollo, difusión e implementación de tecnologías apropiadas: Biodigestores en Bolivia. Bolivia ISBN: 978-99974-810-2-3. 84pp. GIZ. 2014 (http://beegroup-cimne.com/kt-content/uploads/2016/07/Biodigestores-Lecciones-Bolivia-2014_compressed.pdf)

Los proyectos que han fallado en esta materia son aquellos que no han logrado contar con un equipo humano que pueda estar a cargo de la operación, mantención y seguimiento adecuados. Por otro lado, la mantención puede significar altos costos para la industria, de no ser previstos.

Adicionalmente, algunos proyectos en Chile quedaron en carpeta debido a que el financiamiento a través de la venta de bonos de carbono se modificó en el transcurso de su implementación. La mayor parte de la demanda por certificados de reducción de emisiones (CERs), asociados al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) de la ONU venía del mercado europeo, el cual registró en julio del 2012 una importante caída de precios respecto del año anterior (cerca de un 70%), situación que hasta el día de hoy no ha logrado revertirse, lo que ha significado un desinterés por el uso de este mecanismo para financiar proyectos de mitigación en el mundo.

La consolidación del sector lechero permite que los pequeños y medianos productores sean, aquellos que se encuentran entre las 100 y 500 vacas en producción, un grupo objetivo clave según los criterios establecidos en el programa GEF de fomento al biogás (disminución de contaminación y generación de gases de efecto invernadero), pudiéndose considerar plantales cercanos a las 1.000 cabezas de ganado en algunos casos.

En este contexto, Chile requiere de su propio desarrollo de biodigestores, enfocándose en posicionar la digestión anaeróbica de purines de la lechería, primeramente, como un tratamiento que valoriza residuos y mejora la condición ambiental de la industria lechera, sin necesariamente verla como un negocio enfocado en la producción y venta de electricidad, sino más bien como una oportunidad de incrementar la soberanía energética que podría servir en la economía agrícola.

No se debe olvidar que el purín lechero es el sustrato que presenta el menor potencial de generación de biogás por masa dentro de toda la escala de residuos orgánicos disponibles (Ministerio de Energía, PNUD, FAO, GEF, 2011), (Ministerio de Energía, GIZ, 2012). Específicamente para la producción de electricidad es indispensable altos volúmenes de producción de biogás, por lo que muchos

proyectos en Chile primero deberán enfocarse en hacer uso del biogás con fines térmicos y mecánicos. Para la generación eléctrica sería indispensable alta concentración de animales, y/o mayores horas de estabulado y/o planteles que eventualmente deberían incorporar la co-digestión de sustratos de elevado potencial metanogénico (suero de la leche, u otras formas de residuos), para hacer factible la generación eléctrica y/o la venta de excedentes.

En el libro “Biogás de residuos agropecuarios en la región de los Ríos” (INDAP, GORE Los Rios), 2016) se plantea, por ejemplo, la utilización de estiércoles (porcinos, avícola, vacunos de lecherías), suero de leche, residuos de beneficio de ganado, purines, bagazo cervecero, entre otros, y determina los siguientes valores:

Tabla 1. Factores de conversión de materia orgánica en biogás

Tipo de residuo	Litros de biogás/ kg residuos
Purines de lechería	25
Estiércol ferias ganaderas	40
Estiércol de cerdos	40
Suero de queserías	46
Estiércol de aves	70
Bagazo de cervecería	110

Fuente: INDAP, GORE Los Rios, 2016.

El proyecto GEF biogás hizo la evaluación a nivel de prefactibilidad en 53 lecherías de Los Ríos y Los Lagos, de proyectos de biogás de mayor tamaño con potencias de hasta 100 kW en lecherías de entre 90 y 1.000 vacas. Los resultados económicos de estos estudios no fueron positivos, dado el bajo potencial de producción de biogás asociado al purín de vacas en condiciones de pastoreo, que impera en estas dos regiones y que determina que solo sea posible coleccionar del orden del 25% del estiércol producido por una vaca. Este bajo potencial se explica también por el alto grado de dilución del purín al usarse exceso de agua en el lavado de patios y no hacerse en general una gestión de las aguas lluvia en una macro-zona de elevadas precipitaciones anuales.

No obstante, existen las condiciones para desarrollar un mercado incipiente de

biogás. Hay lecherías de mayor tamaño, con mayores niveles de estabulación, con una presión ambiental importante, donde esta tecnología puede generar interés. Del mismo modo no se descarta el modelo asociativo. Por otro lado, hay sectores con generación de residuos de mayor potencial metanogénico y/o con mayores impactos ambientales como el sector porcino o residuos de la agroindustria, donde puede darse un mayor desarrollo de esta tecnología asociado a usos energéticos del biogás.

Algunas iniciativas que van en la senda de apoyar el desarrollo de un mercado del biogás son por ejemplo la elaboración del mencionado reglamento de seguridad para plantas de biogás, y la reciente incorporación (diciembre 2016), de nuevos perfiles ocupacionales para trabajadores vinculados a los sectores de ERNC y eficiencia energética, cómo:

- a) supervisor de operación de plantas de biogás,
- b) mantenedor de plantas de biogás y
- c) operario de plantas de biogás.

Esta iniciativa reconoce la necesidad en cuanto al capital humano relacionado a las nuevas demandas del mercado, tomando Chile Valora⁵ este rol de certificador de competencias laborales, que ya cubre variados rubros industriales del país.

Como es de esperar, proyectos de biogás de escala pequeña o familiar campesina tienen su atractivo, no en la rentabilidad económica que muchas veces no existe, sino más bien en impactos asociados a mejoras en la calidad de vida y mitigaciones de efectos ambientales o sociales. Y se sugiere seguir avanzando en la cuantificación del impacto ambiental y social que la tecnología trae consigo. El biogás permite diversificar la matriz energética de la región, mejorar los valores de eficiencia energética, contribuye a la gestión sustentable de residuos, provee independencia energética y reduce la presión sobre el bosque nativo al permitir dejar de usar leña como principal combustible, como ocurre hoy en muchas lecherías del sur de Chile.

5 <http://www.chilevalora.cl/> iniciativa del Ministerio de Trabajo y Previsión Social

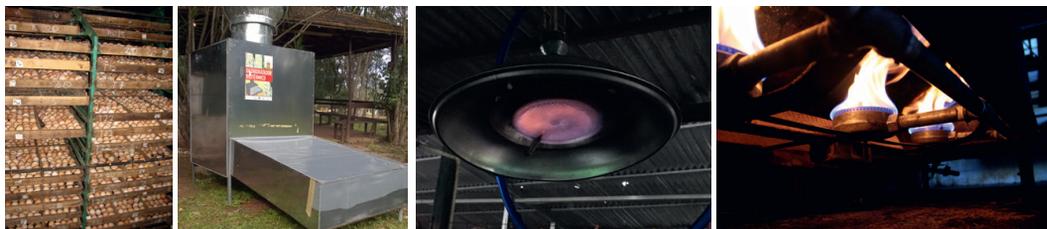
1.6.1 ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES Y EL BIOGÁS EN CHILE

El biogás es considerado una fuente de energía alternativa o energía renovable no convencional (ERNC), que puede utilizarse directamente en combustión, además de que puede generar electricidad al ser combustionado en generadores específicos. En comparación a otras fuentes de ERNC, el biogás tiene una menor participación en la matriz de energía primaria en Chile respecto a proyectos fotovoltaicos, solares térmicos y/o eólicos u otras fuentes de la biomasa (leña y otros subproductos).

En pequeñas escalas de producción (proyectos domiciliarios y <180 kW), el uso más eficiente del biogás se da a través de su **combustión directa** (Figura 5). Muchos proyectos tienen el potencial de auto abastecerse, parcial o totalmente con biogás, por ejemplo, en los casos en que el calor (energía calórica) sea de utilidad en calderas (pueden ser calderas duales), elaboración de alimentos, deshidratación de productos, pasteurización de leche, calefacción de espacios o establos, incubado de huevos, etc.

En la categoría de sustitución calórica, el libro de INDAP-GORE de Los Ríos, determinó un potencial de reemplazo del 6% de consumo actual de la región (en base leña), al hacer uso de los diferentes residuos disponibles en la zona a través del uso de biodigestores.

Figura 5. Usos calóricos productivos del biogás



Nota: De izquierda a derecha: A) Incubadora de huevos adaptada a biogás, Vietnam. B) Deshidratador de hierbas medicinales y condimentos, Paraguay. C) Calefactor de lechones en Costa Rica. D) Caldera para el sacrificio de pollos en Honduras. Fuente: Elaboración propia, 2017.

En escalas mayores (>180 kW) el biogás se puede transformar en electricidad y calor, alcanzando valores de eficiencia de hasta un 85% (Ministerio de Energía, GIZ, 2012). A través de proyectos bajo el apoyo de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, se impulsaron iniciativas de biogás que producen electricidad para autoconsumo y venta de excedentes a la red. En la Figura 6 se muestra un biodigestor de laguna cubierta (30.000 m³) para el tratamiento de purín de cerdo, que alimentaría un sistema de cogeneración de 1,04 MW de potencia instalada en la zona central del país. En la actualidad el biogás es utilizado en una caldera que permite el ahorro de 9.000 litros de diésel mensuales (USD 77.000⁶ anuales, aproximadamente), en una segunda etapa el proyecto considera la venta de electricidad producida por el equipo de cogeneración, bajo el segmento de Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD) que tienen un tope de 9 MW de potencia instalada.

De acuerdo a un catastro de proyectos de biogás llevado a cabo por el Ministerio de Energía, se han identificado poco más de 100 proyectos de biogás en Chile, de los cuales cerca de 60 se encuentran operativos y de estos cerca de 20 corresponden a proyectos destinados a autoconsumo de energía y 30 corresponden a proyectos de quema de biogás en antorcha, principalmente operando en rellenos sanitarios.

En lo que respecta a proyectos de generación eléctrica que se encuentran

6

Tasa de cambio 1 USD: 661 pesos chilenos y costo por litro de diésel (\$470)

comercializando energía, se trata de 13 proyectos cuya capacidad instalada total a julio del 2017, de acuerdo a información reportada por la CNE, alcanza los 59 MW de un total de 3.695 MW del universo de ERNC. Cabe destacar que la biomasa solamente aporta al SIC (Sistema Interconectado Central), y no se registran aportes al SING⁷ (Sistema Interconectado del Norte Grande).

Figura 6. Agrícola AASA campo “Campesino”, María Pinto, RM



Nota: En sentido del reloj: Biodigestor de laguna cubierta (30.000 m³), cogenerador (2 por 520 KW c/u), sala de máquinas, y visión general del sistema de tratamiento y uso del biogás (antorcha de 450m³/hora).

Fuente: Alejandro Gebauer, Agrícola AASA, 2016.

1.6.2 BIODIGESTORES DE PEQUEÑA ESCALA Y DOMÉSTICOS EN CHILE

Dentro de la clasificación actual de biodigestores de pequeña escala (<180 kW en potencial nominal según clasificación del Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017), en Chile existen 14 instalados, que fueron diseñados para tratar residuos de las lecherías en las regiones de énfasis (Los Lagos y Los Ríos), de los cuales 12 funcionaban al momento del estudio (INIA, 2016). En la pequeña escala, los sistemas observados corresponden a lagunas cubiertas sin agitación, mezcla completa y sistemas tubulares de flujo continuo.

⁷ <https://www.coordinadorelectrico.cl/informes-y-documentos/informes-y-documentos-coordinador>

Todos ellos hacen uso del biogás como un combustible gaseoso para la generación de energía calórica en calderas, agua caliente sanitaria, para la limpieza de equipos de ordeña, etc. Algunos utilizan moto generadores adaptados para la producción de electricidad en forma aislada durante el día, para usos puntuales (bombeo de agua para riego, recirculación en el biodigestor, alimentación de bombas de ordeña).

En la escala domiciliaria hay alrededor de 20 sistemas instalados a julio de 2017, con mayor variabilidad de la tecnología utilizada, por lo que es posible encontrar digestores tubulares, domos fijos construidos en mampostería, sistemas en fibra de vidrio e incluso un sistema de cúpula flotante (biodigestor hindú o domo flotante). La mayoría de los sistemas se encuentran funcionando, sin embargo, es difícil conocer los valores de producción de biogás y/o digestato, y mucho menos su eficiencia.

Ha sido muy evidente la dificultad de mantener el biodigestor operativo a lo largo del año en escala domiciliaria, debido a las temperaturas del país en otoño e invierno. A pesar del interés de los usuarios, este aspecto juega en contra del adecuado funcionamiento durante los meses más fríos (marzo a septiembre), precisamente cuando más energía es consumida. En el sur del país se utilizan altos volúmenes de leña para calefacción, aún es posible encontrarla a bajos precios comparado a la zona central, y en muchas casas es utilizada con doble propósito, calefacción y elaboración de alimentos, lo que conlleva sobre todo problemas de contaminación del aire en las grandes ciudades. Sin embargo, en verano (noviembre-febrero) la sola utilización de biogás sería idónea por la facilidad de su uso. Por lo tanto, es imprescindible realizar investigación que pueda mejorar su funcionalidad a lo largo del año, una vez solucionado este punto, será factible implementar sistemas con el debido acompañamiento, capacitación de usuarios, y agentes interesados que acompañan a las instituciones públicas, colaborando en el desarrollo productivo en la agricultura familiar campesina.

Cada vez se evidencia más interés de diversas iniciativas relacionadas con la educación, el autoabastecimiento energético doméstico, y la valorización de

residuos; pudiéndose observar proyectos en escuelas rurales, centros de formación técnica, municipios, universidades y agencias de desarrollo agrícola. La generación de capacidades dada por los cursos que brinda SEC, y la iniciativa de Chile Valora, son claros ejemplos de que se están realizando esfuerzos para valorar y apoyar el desarrollo e implementación de biodigestores en el país, en todas sus escalas. La Figura 7 muestra ejemplos de este tipo de sistemas en Chile.

Figura 7. Ejemplos de biodigestores de escala domiciliaria en Chile



Nota: Izq. Biodigestor de domo fijo en albañilería, María Pinto, RM. Centro arriba: biodigestor en fibra de vidrio con gasómetro externo, Región de Los Ríos (Programa de la Gobernación Provincial de Valdivia "Autoabastecimiento hídrico y energético a partir de la cosecha de aguas lluvias y la producción de biogás a través del tratamiento de residuos orgánicos a realizarse en el área rural de las Comunas de Mariquina (sector costero), Máfil y Los Lagos (sector cordillerano) de la Provincia de Valdivia"). Derecha: biodigestor tubular en manga plástica, INDAP, Lampa, RM. Centro abajo: biodigestor de domo tipo hindú (cúpula flotante que actúa como gasómetro), Coltauco, VI región. Agradecimientos a: Bioconstructora de Mujeres, Metalglass, INDAP, y a don David Perez, respectivamente.

Fuente: elaboración propia, 2017.

2.1 TIPOS DE BIODIGESTORES

Existen diferentes tecnologías de biodigestores, con aspiraciones a ser más pequeños y en general más eficientes para degradar sustratos. Se pueden encontrar diversos tipos de diseño y conceptos de plantas de biogás o biodigestores, que son implementadas según el contenido de humedad con el que operen (fermentación en seco o húmedo), su número de fases (de una (I) o dos (II) fases), según el rango de temperatura en el que opera (psicrofílico, mesofílico o termofílico), su capacidad de aceptar carga orgánica (alta o baja) o bien según su mecanismo o ausencia de agitación (mezcla completa, flujo pistón o convencional). Todas estas características pueden estar combinadas. Puede existir, por ejemplo, un biodigestor húmedo, de dos fases, mesofílico de mezcla completa.

Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

El tiempo que se le da a las bacterias para trabajar un sustrato dentro del biodigestor o el tiempo que pasa un sustrato dentro del biodigestor desde que es cargado hasta que es descargado.

Otro concepto de plantas de biogás, son los biodigestores para aguas servidas, específicamente aguas altamente diluidas como las negras o grises, o inclusive aguas blancas (RILES de las lecherías). Estos biodigestores son los únicos con habilidad de retener o atrapar los microorganismos dentro del biodigestor, operando así con bajos tiempos de retención hidráulica, lo que los convierte en biodigestores muy pequeños y de alta eficiencia. Algunos ejemplos son el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA o UASB por sus siglas en inglés) o Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA). Lamentablemente, debido al alto contenido de sólidos fibrosos en el estiércol vacuno, no es factible el uso de este tipo de biodigestores para el tratamiento de purines del sector lechero y por tanto no serán analizados en esta guía

Sólidos Totales (ST)

Porción del estiércol seco o el estiércol sin agua. Se determina por análisis de laboratorio. Por ejemplo, se dice que un estiércol tiene 12 % de sólidos totales, o sea, de 100 kg de estiércol fresco, 12 kg son sólidos totales y el resto agua. También se le conoce como materia seca.

La limitante para degradar el estiércol vacuno está en la habilidad del biodigestor para descomponer las fibras (esto es con o sin separación de sólidos), y pasarlo por la primera etapa de fermentación (hidrólisis). Por tanto, los modelos de biodigestores más utilizados para estiércol vacuno, adecuados para el sector lechero chileno, son:

- (A) biodigestores de mezcla completa,
- (B) biodigestores de flujo pistón, o bien,
- (C) biodigestores convencionales (laguna cubierta, pre-fabricados o tubulares).

La decisión de cómo escoger el modelo y tamaño adecuado será discutida más adelante. Seguidamente, se realizará una breve descripción y análisis de las opciones de tecnologías de cada tipo de biodigestor utilizado para estiércol vacuno en el sector chileno.

Sólidos Volátiles (SV)

Los sólidos volátiles representan la fracción orgánica de los sólidos totales (ST). Por ejemplo, el estiércol tiene 85 % de SV, se refiere que 85 % de los sólidos totales es materia orgánica y la diferencia son minerales. De 100 kg de estiércol fresco, 12 kg son sólidos totales, y de estos 10,2 kg son materia orgánica y 1,8 kg minerales. La cantidad de sólidos volátiles son un indicador positivo del potencial de producción de biogás.

*También se le conoce como **materia orgánica seca**.*

2.1.1 BIODIGESTOR DE MEZCLA COMPLETA

Los biodigestores de mezcla completa (conocidos como CSTR por sus siglas en inglés), son de tecnología conocida y altamente utilizada en países como Alemania.

Usualmente son tanques verticales construidos en acero o concreto con doble cubierta para acumular el biogás. Se denominan de mezcla completa, pues tienen como componente esencial la agitación interna de los líquidos del biodigestor. Esta agitación se genera de diferentes formas, desde recirculación de biogás, recirculación de digestato o con paletas horizontales o verticales. Su principio de funcionamiento se basa en el proceso de agitación, que obliga el contacto del sustrato con los microorganismos, lo que aumenta el proceso de degradación. Esto evita que se formen sedimentos o sólidos flotantes, por lo que también evita la necesidad de separar sólidos antes del biodigestor. Su operación típica es en un rango de temperatura mesofílica por lo que se debe agregar calor externo.

Para efectos del tamaño del biodigestor, la variable "tiempo de retención hidráulico (TRH)" es usualmente alta (de 20 hasta 40 días), con una carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA) de 1 a 4 kg SV/m³ día. Algo importante es que este tipo de biodigestores operan con mezclas de estiércol y agua que contenga entre 2% a 12% de sólidos totales. A modo de referencia los sólidos totales en los campos de estudio del programa GEF biogás van entre un 1% y 2% (Salazar S., 2012). Su diseño permite la co-fermentación, o sea el agregar otros residuos orgánicos aprovechables como residuos agrícolas para aumentar la producción de biogás. Un ejemplo de un biodigestor de mezcla completa se encuentra en Figura 8.

Figura 8. Biodigestor de mezcla completa



Nota: de 2.000 m³ de capacidad de tratamiento de purines de 700 vacas estabuladas, producción de 120 m³ de biogás/hora, a utilizarse en equipos de cogeneración de 200 Kw de potencia instalada (producción de electricidad y calor). Fuente: Matías Errázuriz, Genera Austral, 2017

Carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA)

El COVA indica cuantos kg de materia orgánica (de sólidos volátiles) entran al biodigestor diariamente por cada metro cúbico de su capacidad. Es una medida de eficiencia del biodigestor para procesar materia orgánica. Por ejemplo, un COVA de 1 kg SV/m³/d implica que un biodigestor de 30 m³ de volumen, será cargado diariamente con 30 kg de sólidos volátiles. Este mismo biodigestor operado con un COVA de 4kg SV/m³/d podría ser alimentado con 120 kg de sólidos volátiles.

2.1.2 BIODIGESTOR DE FLUJO PISTÓN

El biodigestor de flujo pistón es bastante conocido y utilizado principalmente en los Estados Unidos. Se construye en tanques horizontales en concreto con cubiertas dobles o sencillas de geomembrana para acumular el biogás, o bien en acero. Se denominan de flujo pistón, pues el sustrato que ingresa es empujado en forma de pistón o tapón por el sustrato del día siguiente, por lo que también son denominados de flujo continuo. En otras palabras, el sustrato no es mezclado (a diferencia del biodigestor de mezcla completa) al interior del biodigestor, sino que se mueve a lo largo del sistema casi como paquetes que se van empujando.

Esto se logra únicamente con sustrato "espeso" o con sólidos totales superiores al 10%, por lo que este modelo no tiene problema de sedimentación o flotación en su interior y no requiere de separación de sólidos fibrosos antes de la entrada al biodigestor. Su operación típica es en un rango de temperatura mesofílica por lo que se debe agregar calor externo. Esto también ayuda a mejorar la viscosidad del sustrato para fluir fácilmente por el interior del reactor.

Para efectos del tamaño del biodigestor, la variable "tiempo de retención hidráulico (TRH)" es usualmente alta (de 20 hasta 40 días, dependiendo de la temperatura), con una carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA) también alta de 2 a 6 kg SV/m³ día. Algo importante es que este tipo de biodigestores operan con sustratos que contengan sólidos totales superiores a 10%. Su diseño no permite la co-fermentación, o sea agregar otros residuos orgánicos aprovechables (como residuos agrícolas) para aumentar la producción de biogás. La Figura 9 muestra

un ejemplo para ganado vacuno.

Figura 9. Ejemplo de un reactor de flujo pistón para estiércol vacuno



Fuente: Propia (página web, 2017)

2.1.3 BIODIGESTOR CONVENCIONAL (LAGUNA CUBIERTA O BIODIGESTOR PREFABRICADO)

El biodigestor convencional, al igual que las otras dos tecnologías mencionadas, es bastante conocido y utilizado tanto en Estados Unidos como en LAC. Se denomina biodigestor convencional pues es tecnológicamente simple. No utiliza sistema de agitación ni calefacción. Esto hace que su principio de funcionamiento sea la sedimentación, reteniendo sólidos por largos periodos dentro del sistema. Al no promover activamente el contacto de microorganismos con el estiércol y normalmente operar a temperatura ambiente, tiende a ser un sistema de baja eficiencia.

Figura 10. Biodigestor de laguna cubierta, fundo El Ánima, 420 m³ de capacidad de tratamiento



Fuente: elaboración propia, en base a Biotecsur y Fundo El Ánima, 2016.

Figura 11. Ejemplo de un reactor tubular en una lechería de Puyehue, región de Los Ríos



Fuente: elaboración propia en base a Fundo el Coigüe, purines plantel lechero, 2016.

Un ejemplo, es el sistema de laguna cubierta (Figuras 10 y 11), es decir, lagunas profundas impermeabilizadas y recubiertas de forma hermética con geomembrana de diferentes plásticos, como polietileno de alta (HDPE) y baja densidad (LPDE), además de etileno propileno dieno tipo M (EPDM) y policloruro de vinilo (PVC). Una de las complicaciones que pueden surgir de estos sistemas es el cierre de la geomembrana utilizada, éste es uno de los puntos débiles de este tipo de tecnología, y en los puntos en donde con frecuencia ocurren filtraciones de biogás una vez transcurrido ciertos periodos de tiempo. Estos son aspectos que el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017) solicita revisar con frecuencia, junto con el plan de mantenimiento periódico de la planta, además de otras fugas (H_2S).

Otra opción son los biodigestores prefabricados, los cuales son lo mismo que una laguna prefabricada, pero con mayor facilidad de instalación al ser una única pieza o máximo 2 (Figura 11). En este caso, el tanque del biodigestor es fabricado en geomembrana (PVC o polietileno) y viene sellado desde fábrica, donde ya ha pasado un control de calidad de hermeticidad, y solo resta ubicarlo en la zanja y llenarlo. Esta opción de biodigestores prefabricados está teniendo una fuerte implementación en otros países latinoamericanos de la costa del Pacífico.

Para efectos del tamaño del biodigestor, el TRH es usualmente alto (de 40 hasta 100 días, dependiendo de la temperatura), con una carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA) baja de 0,1 a 1 kg SV/m³/día. Es importante mencionar que este tipo de biodigestores operan con sustratos que contengan sólidos totales <3%. Su diseño no permite la co-fermentación, o sea agregar otros residuos orgánicos aprovechables (residuos agrícolas), para aumentar la producción de biogás. La separación de sólidos fibrosos es un requerimiento importante para evitar la formación de una capa de sólidos flotantes.

Cada biodigestor ofrece una alternativa tecnológica más o menos apropiada a las condiciones de cada lechería. La cantidad de estiércol y su forma de recolección son las dos variables que predominan al escoger adecuadamente el tipo de biodigestor. La Tabla 2 muestra un resumen de las 3 alternativas tecnológicas para el sector lechero en Chile.

Tabla 2. Comparación de los diferentes tipos o modelos de biodigestores utilizados para el sector lechero en Chile

Característica	Convencional	Mezcla completa	Flujo pistón
Tanque de fermentación	Laguna profunda, recubierta con geomembrana (laguna cubierta), biodigestor prefabricado o biodigestor tubular	Tanque vertical en concreto o acero instalado enterado/ encima del suelo	Tanque horizontal en concreto instalado enterrado en el suelo
Nivel tecnológico	Bajo	Alto	Medio
Calor adicional	No	Sí	Sí
Sólidos totales de la mezcla	0,5 - 3%	3 - 10%	>11%
TRH	40-100 días	+25	+25
COVA	0,1 a 1 kg SV/m ³ .d	1 a 4 kgSV/m ³ .d	2 a 6 kgSV/m ³ .d
Clima ideal	Clima caliente a templado. Los biodigestores tubulares tienen mayor potencial para ser adaptados a climas fríos. Entre 15-25 °C	Cualquier clima (tienen calefacción adicional)	Cualquier clima (tienen calefacción adicional)
Ventajas	Sistema de bajo costo, con muchas facilidades de instalación y operación.	Sistema compacto de alta eficiencia, para manejar sustratos sólidos.	Sistema compacto de alta eficiencia, para manejar estiércol sólido.
Desventajas	Aplicable únicamente para climas calientes. Tiende a requerirse grandes tamaños.	Altos costos de implementación y requerimiento de capacitación técnica para operación y mantenimiento.	Costos de implementación: medio y monitoreo de formación de fibra flotante necesaria.

Fuente: Roos, 1997.

2.2 RILES LÁCTEOS COMO SUSTRATO

Los RILES lácteos son residuos agroindustriales líquidos según el Decreto supremo n°609/1998, n°90/2001 y n°46/2003, o sea aguas residuales generadas del procesamiento de la leche o sus subproductos. Son aguas blancas con contenidos medio-alto de materia orgánica (altos DBO₅ y DQO), altamente diluidos, con un

bajo contenido de sólidos suspendidos, pero alto contenido de sólidos disueltos. Dado, la obligatoriedad de realizar un adecuado tratamiento de estas aguas, una opción interesante es la utilización de biodigestores, pues son una excelente alternativa para bajar el contenido de materia orgánica, produciendo altas cantidades de biogás para su uso dentro de la misma industria. Los RILES lácteos disminuyen considerablemente su carga orgánica (valores medidos de hasta un 95%), a partir del uso efectivo de biodigestores, realizando un post tratamiento aerobio previo a la descarga directa del efluente del biodigestor a cursos de agua superficiales, además de desinfección.

Al ser un agua residual altamente diluida, a diferencia del purín, es recomendable el uso de digestores con capacidad de inmovilizar los microorganismos, y así poder operar con un tiempo de retención hidráulico bajo. Un ejemplo de estos sistemas son los UASB, o los filtros anaeróbicos. La Figura 12 muestra un ejemplo de este tipo de sistemas, los tres instalados por la empresa Schwager en el sur de Chile, los que suman una capacidad instalada de 2,6 MW.

Figura 12. Planta de tratamiento de RILES lácteos, Osorno



Nota: Tratamiento de 250m³/día, potencia instalada de 0,6 MW operativa en caldera de generación de vapor para deshidratación de suero de leche.

Fuente: Schwager Energy, Planta Osorno, 2015.

2.3 OPERACIÓN DE LOS BIODIGESTORES

La operación de biodigestores es bastante simple y rutinaria una vez que los operarios conocen en detalle las razones de fondo para poner atención a ciertos aspectos que son de revisión diaria, otros más esporádicos, y otros que son necesarios de conocer en forma anticipada con objeto de inscripción y/o registro de la planta de biogás, o consecuencia de ello.

El siguiente listado puede servir de pauta para la elaboración de planes de capacitación interna, los que se deben incluir en el manual de seguridad obligatorio de toda planta de biogás, según el reglamento chileno:

1. Introducción a los biodigestores, y el tratamiento de residuos orgánicos.
2. Diseño y tipos de tecnologías.
3. Puesta en marcha y operación.
4. Monitoreo & uso del biogás y del digestato.
5. Operación de sistema de generación eléctrica.
6. Certificación y registro.
7. Puntos de riesgo, uso del combustible.
8. Integración del sistema en el predio y el equipo de trabajo.

A continuación, en la Tabla 3, se presentan las acciones requeridas para los diferentes perfiles definidos por Chile Valora⁸; los que deberían considerarse al realizar un plan de capacitación de todos los trabajadores del predio donde se instale un biodigestor, ya que algunas acciones tendrán incidencia directa en el adecuado funcionamiento del sistema de producción y uso del biogás.

8 <http://www.chilevalora.cl/buscador/index.php/PerfilCompetencia/buscarPorNombrePerfil?nombrePerfil=biogas>

Tabla 3. Lista de competencias necesarias, según el perfil, para un plan de capacitación adecuado

Nombre del perfil ocupacional		
Operario de plantas de biogás	Mantenedor de plantas de biogás	Supervisor de operación de plantas de biogás
Monitorear los parámetros del proceso biológico, de acuerdo al plan de operación.	Realizar mantenimiento preventivo a la planta de biogás, según plan de mantenimiento, protocolos de seguridad y salud ocupacional y normativas vigentes.	Elaborar el plan de operación y emergencia, de acuerdo a especificaciones técnicas y normativas de salud y seguridad asociadas.
Operar los elementos eléctricos, mecánicos y de automatización y control de la planta, de acuerdo al plan de operación y condiciones de seguridad.	Realizar mantenimiento correctivo a la planta de biogás, de acuerdo a protocolos de seguridad y salud ocupacional y normativas vigentes.	Supervisar la operación de la planta, de acuerdo a condiciones de operación, especificaciones técnicas de equipamiento y normativas vigentes.
Despachar los productos y subproductos, según protocolo de operación y condiciones de seguridad.		Supervisar al personal del área a cargo, de acuerdo a políticas vigentes.
Despachar energía eléctrica, de acuerdo a instrucciones de despacho vigentes.		Gestionar los productos y subproductos, según protocolos de operación y normativas vigentes.
		Gestionar el despacho de energía eléctrica, según protocolos de operación, instrucciones de despacho y normativas vigentes.

Fuente: elaboración propia en base a Chile Valora, 2017.

2.3.1 PUESTA EN MARCHA DE LAS PLANTAS DE BIOGÁS

En el caso de los sustratos basados en estiércol de vacas lecheras, ya que los microorganismos necesarios para el desarrollo de la digestión anaerobia están presentes en el sustrato, no es necesario añadir nada más. En el caso de usar sustratos que no tienen los microorganismos (como residuos de cosecha, suero

lácteo o basura orgánica), es necesario añadir estiércoles frescos en la carga (llamado co-digestión), o bien arrancar el biodigestor con un inóculo, que no es otra cosa que lodo activo (con presencia de los microorganismos necesarios), sacado de otro biodigestor en funcionamiento. Es relevante saber que no hace falta agregar enzimas, ni bacterias de ningún tipo al digestor, pues este es un sustrato que las trae naturalmente.

En la Figura 13 se puede ver un producto que ha sido sugerido como necesario entre usuarios de biodigestores, lo cual no es cierto. Lo que sí es realmente necesario es enmendar o corregir el pH en biodigestores que sufran algún inconveniente. El sector del biogás está aún en desarrollo, y ante la duda muchas personas nuevas pueden tomar como referencia información no oficial, por ello es importante investigar, para llegar a conocer estos aspectos con claridad.

Figura 13. “Producto mejorador” de la eficiencia de la digestión anaerobia dentro de un biodigestor



Fuente: elaboración propia, 2017.

2.3.2 RANGOS TÍPICOS DE MONITOREO Y CONTROL DE LOS SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN

Como sucede con otras instalaciones industriales, dependiendo del tipo de biodigestor y aprovechamiento de sus productos, se tendrá diferentes niveles de complejidad en cuanto a su mantención, ya sea por la frecuencia de su monitoreo, las diferentes sensibilidades del proceso o por el costo en que en ella se incurre. En general es recomendable tener en mente que, en el predio, si bien no todos los trabajadores estarán a cargo del biodigestor, es importante que al menos todos conozcan lo que ello significa. En el día a día, por ejemplo, la nutrición de los animales influenciará positiva o negativamente la producción de biogás, y por lo tanto cualquier cambio en la dieta deberá anticipadamente ser informado. Lo mismo ocurre cuando hay tratamientos químicos y/o biológicos (antibióticos, por ejemplo), que se prescriban frente a enfermedades de los animales, o patios de espera.

Existirán aspectos a cuidar en diferentes momentos del proceso y a variados niveles de especificación. A continuación, se muestra una tabla resumen que permitirá pensar en los mejores momentos de mantención según los ciclos productivos del plantel. Es ideal no alterar las épocas de mayor trabajo, y menos correr el riesgo de que ocurran imprevistos precisamente en estas temporadas.

Tabla 4. Lista de actividades necesarias para el monitoreo de los sistemas de biodigestión y rangos aceptables

	Actividad	Rangos óptimos	Diaria	Mensual	Anual
Monitoreo básico sobre operación	Chequeo del pH.	6,8-7,2	x		
	Monitoreo de la temperatura.	Poca fluctuación (+/- 3°C) y superior a 15-20°C.	x		
	Medición de la calidad del biogás: combustión del biogás % de metano.	Biogás que combustiona o metano superior a 50-55%.	x		
	Volumen de producción de biogás.	Estable al largo de los días (+/-20%).	x		
Monitoreo avanzado sobre operación	Análisis de FOS/TAC*.	Mantener entre 0,3 a 0,4.	semanal		
	Análisis de la Demanda Química de Oxígeno del efluente.	Valores adecuados para uso del digestato.		x	
	Coliformes totales y fecales del efluente.	Valores adecuados para uso del digestato.		x	
	Niveles de NPK en efluente.	Valores adecuados para uso de digestato y según cultivo o uso final.			x
	Monitoreo en el biogás de concentración de H ₂ S.	Mantener en concentración inferior a lo solicitado por el fabricante del equipo que utiliza el biogás.			x
Mantenimiento de infraestructura	Chequeo de las tuberías de distribución de purines.	Sin grietas o fugas.		x	
	Monitoreo de los artefactos de aprovechamiento de biogás.	Operando en temperaturas adecuados, sin vibraciones excesivas o sonidos desconocidos.		x	
	Mantenimiento de bombas.	Libre de fibras en las aspas.		x	
	Revisión de tuberías de distribución de biogás.	Sin grietas o fugas.		x	
	Sistemas de venta de excedentes.	Operación de los equipos según fabricante.			x
	Acumulación de material al interior del biodigestor.	Sin material acumulado excesivamente que afecte flujo o mezclado del sistema.			x

Fuente: elaboración propia, 2017.

*FOS/TAC: es la relación entre los ácidos orgánicos volátiles y la capacidad buffer alcalina, y da un indicador del riesgo de acidificación de una planta de biogás, y por tanto si se puede cargar mayor o menor cantidad de sustrato

2.3.3 PLAN DE MANTENIMIENTO

Existen acciones de planificación que abarcan la biodigestión propiamente tal, y otros que se enfocarán en el equipamiento anexo a la biodigestión. En Chile Valora existe específicamente un perfil dedicado a la mantención de una planta de biogás, sus unidades incluyen:

- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento correctivo.

Cada predio deberá contar con un plan de mantenimiento que detalle los objetivos, la frecuencia, los procedimientos específicos para evitar fallas, las cuales normalmente van en torno a los siguientes puntos:

- Problemas relacionados al pre tratamiento/acondicionamiento del sustrato (% sólidos totales adecuado, picado, mezcla).
- Cantidad y regularidad de sustrato (tasa de alimentación según diseño, ni por encima ni por debajo).
- Inhibición y toxicidad del proceso (acidificación, elementos que hayan hecho ingreso).
- Regular pH y la temperatura.
- Condensación de vapor de agua.
- Fugas de biogás, H₂S.
- Problemas con el sistema de limpieza del biogás o control (alivio de presión, atrapa llamas).
- Fallas de equipos que utilizan o almacenan el biogás (antorchas, motores, co-generator, calderas, etc).

Como se ha mencionado en secciones previas, el biodigestor es un sistema que, a través de una comunidad extensa y compleja de microorganismos, tiene la capacidad de degradar, descomponer o convertir residuos orgánicos como el estiércol vacuno. Esta conversión genera dos productos: el biogás y el digestato. El biogás es un gas que al generarse abandona la fase líquida del biodigestor y se acumula en la parte superior. Es el resultado de la degradación de carbohidratos, proteínas y lípidos del estiércol, o sea es la conversión de la parte orgánica que los microorganismos son capaces de convertir a metano y otros gases. Todo el resto de componentes en el estiércol que no fueron convertidos en biogás, como son los nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, entre otros), materia orgánica recalcitrante, o sea materia orgánica difícil de degradar, además de microorganismos muertos, componen el digestato con alto valor como fertilizante. A continuación, se detalla con más amplitud las características de estos dos subproductos, sus formas de utilización y aprovechamiento, además de algunas consideraciones técnicas de importancia.

3.1 PROPIEDADES DEL BIOGÁS Y SUS PRINCIPALES USOS

El biogás es un producto de la fermentación o descomposición dentro de un biodigestor. Los microorganismos convierten en biogás a toda la materia orgánica fácil de degradar. El biogás es utilizado y aprovechado como un combustible, gracias a que está compuesto principalmente de metano, el único gas combustible de la mezcla. El biogás además está compuesto de dióxido de carbono, nitrógeno, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y otros, de aquí en adelante denominados impurezas.

La Tabla 5 muestra un listado de los gases presentes típicamente en el biogás y su composición, en base a mediciones realizadas en el sur de Chile en biodigestores alimentados con purines de lecherías, el biogás generado contiene cerca de un 60% de metano.

Tabla 5. Composición típica del biogás

Propiedad	Valor
Metano (CH ₄) (% - mol)	50-80
Dióxido de carbono (CO ₂) (% - mol)	20-50
Nitrógeno (N ₂)(% - mol)	0-5
Oxígeno (O ₂) (% - mol)	0-1
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) (mg/m ³ ; ppm m/v)	100-100.000
Amoníaco (NH ₃)(mg/m ³ ; ppm m/v)	0-100
Cloro total (Cl)(mg/m ³ ; ppm m/v)	0-100
Flúor total (F ₂)(mg/m ³ ; ppm m/v)	0-100

Fuente: Wellinger, 2013.

Estas impurezas tienen un impacto significativo en la forma en que se utiliza el biogás, pues algunos compuestos pueden tener efectos negativos en los equipos que lo convierten en energía aprovechable, como es el sulfuro de hidrógeno, también llamado ácido sulfhídrico (H₂S). La concentración de estos otros gases, o bien del mismo metano, depende de condiciones operativas del biodigestor y de características del estiércol utilizado, al cargar sustancias que eventualmente pueden evaporarse dentro como amoníaco. A continuación, se detalla por qué existen algunos de los compuestos de mayor relevancia en el biogás y algunas opciones tecnológicas para su remoción.

Dióxido de carbono CO₂: es el segundo producto de la fermentación en volumen, siguiendo al metano. Su presencia reduce el poder calorífico en el biogás al "diluirlo", ya que este no es un gas combustible. Sin embargo, su presencia no limita el uso del biogás en procesos térmicos, mecánicos o eléctricos. Es importante saber que, junto con el agua, forma ácido carbónico, los que culminan causando corrosión.

Remoción: el tipo de aplicaciones más probables de biogás en el sector lechero del sur de Chile, son principalmente de uso térmico, mecánico y eléctrico. Por lo tanto, su remoción no es necesaria, ni justificable técnica ni financieramente. El único caso en que sí se hace necesaria la purificación del biogás es al buscar producir biometano, que es cuando el biogás se lleva a un 99% de contenido de metano, uso que pasa a ser muy similar al del gas natural.

Ejemplo: Uno de los casos de utilización de biometano en Chile es el de la planta de tratamiento de aguas servidas de El Trebal y La Farfana en la RM (Aguas Andinas, 2010), planta que al tratar las aguas residuales con digestión anaeróbica obtiene biogás; el que es purificado e inyectado a la red de gas natural de la ciudad.

Agua: el biodigestor está lleno de estiércol mezclado con agua (sustrato), lo que lo convierte en un ambiente muy húmedo, y por tanto, el biogás está saturado de vapor de agua. La cantidad de vapor de agua en el biogás dependerá de la temperatura del biodigestor, a mayor temperatura más agua en el biogás. El vapor de agua puede condensarse en las tuberías en las que se conduce biogás y acumularse, taponándolas. Además, el agua en combinación con dióxido de carbono forma ácido carbónico y en combinación con sulfuro de hidrógeno forma ácido sulfhídrico, el cual puede causar corrosión. Por último, agua en el biogás disminuye su poder calorífico.

Remoción: el vapor de agua se puede remover condensándolo al bajar la temperatura o al incrementar la presión en el biogás. Para bajar la temperatura se conduce el biogás bajo tierra, utilizando salidas para remover el agua condensada. Otra opción es utilizar una unidad de frío. Alternativamente, se puede absorber con sílica, óxido de aluminio, óxido de magnesio, carbón activado o zeolitas o bien absorber con sustancias de glicol (etilenglicol por ejemplo), o sales higroscópicas.

Sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) H_2S : el sulfuro de hidrógeno es una de las impurezas de mayor preocupación, por su toxicidad y corrosión. Se forma en el biodigestor naturalmente por la presencia de azufre en el estiércol (proveniente de la alimentación de los animales con proteínas como la metionina).

Remoción: existe variedad de tecnologías para remover efectivamente el sulfuro de hidrógeno. La opción tecnológica estará en función de su concentración y las posibilidades de inversión y mantención que se le pueda dar a los tratamientos. El uso que se le vaya a dar al biogás también será determinante en cuanto estricta deba ser la remoción del mismo. Por ejemplo, la producción de electricidad es el uso más exigente a la ausencia de H_2S , siguiendo el uso en motogeneradores, y combustión del biogás (el uso menos exigente).

- Una forma más bien sencilla de bajar el contenido de H_2S es el uso de

viruta de hierro oxidada, en filtros que se ubican al inicio del proceso de limpieza

- A mayor concentración se sugiere utilizar métodos biológicos. Esto puede realizarse a través de biofiltros con bacterias sulfoxidantes en una torre de lavado. En este caso se hace circular el biogás por un reactor que contiene un filtro al que las bacterias sulfoxidantes están fijadas, y oxidan el H_2S , bajando sus niveles a valores aceptables (<200 ppm). No obstante, es un método demandante de mantenimiento, y elevados costos.
- Alternativamente, existe la micro inyección de aire dentro del biodigestor para oxidar el sulfuro de hidrógeno en azufre. Esta opción es la más económica y efectiva, remueve prácticamente entre un 50% y un 80% del H_2S .
- Otra alternativa es por medio de reacciones químicas, liberando iones de hierro (Fe^{2+} y Fe^{3+}) o agregando líquidos como cloruro de hierro ($FeCl_2$, $FeCl_3$ o $FeSO_4$) dentro del biodigestor. El sulfuro de hidrógeno restante puede ser removido por absorción con carbón activado o también por reacciones químicas con filtros que contengan un material filtrante impregnado de óxido de hierro.

La Tabla 6 muestra las propiedades del biogás para efectos de su aprovechamiento; muchos de estos parámetros son utilizados para el dimensionamiento de los equipos que utilizan el biogás. Además, la Tabla 7 muestra una comparación del biogás con otros combustibles conocidos. Se debe considerar que esta comparación es desde una perspectiva de poder calorífico o energía total, y no considera el cambio de eficiencia potencial de un uso a otro uso.

Tabla 6. Algunas propiedades de interés del biogás

Propiedad	Valor
Poder calorífico (biogás con 55% CH_4), MJ/m ³	19
Densidad, kg/m ³	1,0994
Límite de flamabilidad, % de biogás en aire	9 % a 17 % en aire

*Biogás asumiendo 55 % de CH_4 , saturado de agua a 30°C y presión de 1 bar.

Fuente: Fulford, 2015.

Tabla 7. Comparación energética (poder calorífico) de 1 m³ de biogás con 65 % de metano, con otros combustibles conocidos

Combustible	1 m³ de biogás equivale a:
Gas Natural, m ³	0,6
Gas licuado de propano, L (kg)	0,88 (0,45)
Diesel, L	0,65
Gasolina, L	0,627
Bunker, L	0,57
Carbón, Kg	0,71
Leña, Kg	1,61
Etanol, L	1,1
Electricidad, kWh*	6,5

*Nota: Es una comparación de energía bruta y no considera la eficiencia del sistema de generación eléctrica. Al pasar por el generador, típicamente 1 m³ de biogás equivaldría a aproximadamente 1,3 a 2,14 kWh.

Fuente: Walsh, 1988.

En resumen, el biogás es un excelente combustible que puede ser utilizado y aprovechado en diferentes procesos, su producción es descentralizada y es fruto de uno de los **sistemas más adecuados de gestión de residuos orgánicos húmedos**, con bajísimos impactos para la salud humana o el medio ambiente, siempre y cuando se realice un uso y aprovechamiento con las medidas de seguridad idóneas.

¿Cómo se puede utilizar el biogás? Su uso más común en la actualidad se puede clasificar en tres grandes agrupaciones: térmico, mecánico y eléctrico. Más una cuarta que ofrece usos versátiles y viene desarrollándose fuerte: la purificación del biogás a biometano (remoción de los otros gases que están presentes en el biogás para quedarse con un porcentaje de metano superior al 95%), para su uso en transporte, inyección a redes de gas u otras aplicaciones, que no son detalladas en esta guía, pues no es una aplicación viable para el sector lechero de Chile.

Si bien el uso del biogás como combustible puede ofrecer beneficios a la empresa e incorporarse al modelo de negocios del predio, existen instalaciones de biogás que no utilizan el combustible. En estos casos el sistema de producción del biogás debe tener una antorcha para la combustión, la que debe siempre contar con

una válvula de paso (Figura 14).

El uso de la antorcha debe ser regularizado, por ejemplo, si se utiliza una antorcha fabricada para su uso con gas licuado, esta deberá ser regularizada ante la SEC (ver instrucciones trámites TC6 y TC7 de SEC), y conservar los documentos que de allí se generen, ya que serán requeridos para el registro de la planta.

Figura 14. Antorcha para quemar el biogás



Fuente: elaboración propia, 2017.

Figura 15. Ejemplo de caldera en acero inoxidable de 150 litros (Consumo 4m³ de biogás por hora)



Fuente: Biotecsur, 2017.

Figura 16. Calefont operado con biogás en lechería biodigestor experimental INIA Remehue, Osorno



Fuente: elaboración propia, 2015.

3.1.2 USO MECÁNICO DEL BIOGÁS

El uso mecánico convierte la energía química del biogás en energía cinética, por medio de un motor, típicamente motores monocilíndricos de cuatro tiempos. La fuerza cinética es aprovechada para operar equipos como molinos, picadoras de pasto, ordeñadoras y bombas de agua, por medio de una polea desde el cigüeñal. El uso mecánico tiene una mayor eficiencia energética que el uso eléctrico (ver abajo), pero inferior al uso térmico, pues hay pérdidas de calor y fricción en el motor. Este tipo de usos en comparación a la conversión a energía eléctrica presentan varias ventajas:

- Los valores umbrales de ppm de H_2S son menos críticos que los que generan electricidad. Un motor cogenerador puede ser tan exigente que llegue a aceptar máximo 200 ppm de H_2S .
- El motor es de uso independiente, lo que significa que su dimensionamiento es para su operación a plena capacidad, lo que incrementa su eficiencia.
- El uso directo de la energía mecánica elimina un salto energético (de energía cinética a eléctrica) por lo que se incrementa la eficiencia.
- El uso mecánico es más robusto y no es tan sensible a las variaciones en las revoluciones del motor durante su uso, sí lo es en la generación eléctrica.
- La conexión es muy sencilla, pues es un acople físico con polea, mientras que con electricidad debe haber una conexión a una transferencia eléctrica.

Presión del biogás en centímetros de columna de agua

Normalmente la presión del biogás dentro del biodigestor como en las tuberías de conducción es muy bajo. Por esto unidades como psi o atmósferas no son utilizadas y se emplean centímetros de columna de agua. 100 cm de columna de agua equivalen a 1,4 psi o a 0,096 atmósferas.

Para este tipo de aplicaciones el biogás debe pasar por un proceso de purificación, que según el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017), es obligatorio incluso a escala pequeña. El biogás debe cumplir con las especificaciones de presión requeridas por el equipo, usualmente

10 a 15 cm de columna de agua constante. Dependiendo del tamaño del motor, este tipo de aplicación no requiere de grandes volúmenes de biogás para que sea rentable. Por ejemplo, un motor de 14 HP de potencia, capaz de operar una bomba de vacío de 650 L (Figura 17) o una picadora de 1 tonelada por hora (Figura 18) en Nicaragua, la que puede consumir únicamente 2,5m³ hasta 3m³ de biogás por hora. La Figura 17 y 18 muestran un ejemplo de aplicación mecánica de biogás.

Figura 17. Bomba de vacío de 600L, accionada por un motor de combustión interna de 15 HP. Juigalpa, Nicaragua



Fuente: SNV, 2017.

Figura 18. Picadora de pasto de 1 ton/hora operada con un motor mono cilíndrico de 14 HP a biogás. Juigalpa, Nicaragua



Fuente: SNV, 2017.

3.1.3 USO ELÉCTRICO DEL BIOGÁS

El uso eléctrico puede ser considerado como una ramificación del uso mecánico, donde la fuerza cinética de un motor movido a biogás, en lugar de accionar una aplicación, acciona un generador. La electricidad es utilizada para autoconsumo o inyectada a la red.

En motores adaptados: este uso del biogás tiene un mayor grado de complejidad que el uso mecánico y térmico, pues determinará la calidad de la electricidad que se puede generar y demanda ajustes en el generador y cierta calidad de biogás. Variaciones en las revoluciones del motor, por una baja en la calidad de biogás, pueden tener un efecto en la frecuencia (Hz) del generador

lo que puede provocar fatiga en el equipo eléctrico al que se está alimentando. La eficiencia de estos equipos depende del tamaño del generador y su forma de utilizarse. Entre más grande el generador (superior a 275 kW) mayor será la eficiencia, alcanzando hasta un 40% (conversión de energía química en el biogás a electricidad); con generadores medianos (20-275 kW) puede llegar a un 25% a 30%, mientras que generadores de pequeña escala (<20 kW) pueden llegar a sólo un 10%. En este tipo de aplicaciones (motogenerador) el biogás debe pasar por un proceso de limpieza: disminuir el sulfuro de hidrógeno y, en la medida de lo posible, el vapor de agua para así extender la vida útil del equipo.

En cogeneradores: para la generación de electricidad a partir de un cogenerador sí se hace indispensable un proceso de purificación minucioso del biogás (200 ppm de H₂S), además de cumplir con las especificaciones de presión requeridas por el generador (usualmente 10 a 15 cm de columna de agua). Esta aplicación requiere de volúmenes considerables de biogás para que sea rentable. Por ejemplo, un motor de 50 kW_e de potencia puede consumir 25m³ a 30m³ de biogás por hora cuando opera a plena carga. La Figura 19 muestra un ejemplo de aplicación eléctrica del biogás, utilizando un motor cogenerador (CHP).

Sala de máquinas: todos los equipos que utilizan biogás con fines de generación térmica, eléctrica y/o cogeneración deben ubicarse obligatoriamente en una sala adaptada para ello, cuando la potencia nominal de todos juntos supera los 70 kW.

- De no existir norma chilena oficial vigente, debe diseñarse y construirse según lo indicado en la norma UNE 60601.
- Debe contar con un sistema de detección de fuga de metano en su parte superior.
- Debe contar con un sistema de detección de fugas de ácido sulfhídrico en la parte inferior.
- Esta debe considerar una llave de corte general de suministro, la tubería del suministro solo podrá instalarse en una zona de alta resistencia mecánica, no adosada a la sala.
- Las tuberías conectadas a artefactos deben estar a la vista y ser fabricadas en acero inoxidable o acero carbono (tomando ciertas medidas para evitar la corrosión y posterior falla del sistema de aprovechamiento de biogás).

Figura 19. Cogenerador eléctrico a biogás en lechería VI región



Fuente: Matías Errazuriz, Genera Austral, 2017.

La calidad de biogás (entiéndase la concentración de metano y por tanto su poder calorífico), como también la cantidad, son factores de mucha importancia para decidir su uso. Para efectos prácticos, es usual empezar con usos térmicos como calderas. Si hay suficiente biogás, y estuviesen dadas las condiciones de inversión, mantenimiento y capacidad de operación es factible y responsable considerar los usos mecánicos y el uso eléctrico.

3.2 USOS DEL DIGESTATO

El digestato es el nombre que recibe el líquido que sale del biodigestor, y corresponde al nombre legal en Chile, según la normativa vigente. En inglés se le conoce como *bioslurry* y en otros países latinoamericanos se le llama biol o

efluente. En la medida que un biodigestor es alimentado con sustrato cada día, el digestato va saliendo, por lo que su producción es diaria. Aunque existen cambios muy importantes en el estiércol (desde una perspectiva bioquímica), y mucha de su materia orgánica se transforma en biogás, es poca la diferencia en volumen de la cantidad del digestato que sale del biodigestor respecto a la cantidad de sustrato con la que fue alimentado. Por lo tanto, se puede decir que sale tanto volumen de digestato como volumen de sustrato entra al sistema. Este punto es relevante cuando se piensa en instalar un biodigestor, ya que se hace necesario considerar un método de acopio y/o tratamiento del mismo previo a su utilización (interna o externa) y/o comercialización.

El digestato está formado por agua, materia orgánica recalcitrante (difícil de degradar), nutrientes (ya mineralizados) y microorganismo muertos y vivos. Es por esto que es utilizado como fertilizante, a través de aplicaciones líquidas (diluidas en mayor o menor medida) en la preparación de suelos, durante etapas de crecimientos de cultivos y en aplicaciones foliares al follaje.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) publicó un documento con el título “¿Digestato=Oro café?” (Groot, 2013), analizando su alto potencial de utilización como fertilizante. Algunos biodigestores son implementados primordialmente para la producción del digestato, como ha sucedido en países de la región andina (Martí, 2013). Esto es gracias a sus propiedades, razón por la cual se puede utilizar como inóculo para acelerar el proceso de biodegradación de los residuos orgánicos agrícolas en Chile (rastros) (Varnero, 2016), como pesticida en Honduras (Gallozi, 2012), e incorporándolo a pilas de compostaje en Nepal (SNV, 2001).

En algunos países tropicales, donde la práctica de piscicultura de bajo costo es masiva, el digestato es utilizado en las piscinas de cultivo de tilapia u otros peces de agua dulce, ya que estimula el crecimiento de microalgas de forma controlada y plantas acuáticas, y por consiguiente mejora la engorda de los peces en comparación a las piscinas que no lo utilizan. La parte sólida que se acumula en el interior de biodigestores (que no cuentan con agitación), también es utilizada para recuperar suelos degradados y a veces se le denomina biosol.



El digestato puede aprovecharse en el mismo predio para autoabastecimiento o puede distribuirse hacia predios vecinos a través de una red de distribución por tuberías (fertirriego) o alternativamente su acopio y transporte (líquido o deshidratado), para venta y comercialización. Desafortunadamente la deshidratación del digestato conlleva la pérdida de nitrógeno debido a su volatilización. Mientras la eficiencia de remoción de materia orgánica sea sobre el 85% se podrá realizar aplicaciones sin temor a la generación de malos olores, y es el valor e remoción al que hay que apostar idealmente.

Existen varios estudios a nivel internacional respecto a los usos y beneficios del digestato, donde se muestra que es el principal producto del biodigestor y no simplemente un subproducto, ya que, en la práctica, además de ofrecer beneficios inmediatos en los cultivos y sus rendimientos, tiene efectos a largo plazo. El aumento de rendimiento de los cultivos al aplicarse digestato depende de muchos factores (dosis, frecuencia, cultivo, suelo, etc.), llegando en ocasiones a doblar el rendimiento respecto a los testigos en ensayos realizados en campo (Warnars, 2014). En los suelos mejora su estructura y capacidad de intercambio catiónico, además de aumentar el contenido de materia orgánica o humus. En los cultivos incrementa el vigor y el estado en general y finalmente colabora en la disminución de los gases de efecto invernadero; pues reemplaza el uso de fertilizantes sintéticos, grandes consumidores de energía para su elaboración, transporte y aplicación (Warnars, 2014).

• **Calidad del digestato**

Dado que el digestato proviene del estiércol u otros residuos orgánicos, su calidad y composición está vinculada a la de los sustratos utilizados en el biodigestor. Hay que considerar que el digestato estará más o menos diluido de acuerdo a la cantidad de agua que esté entrando al biodigestor. Por esto, los biodigestores de mezcla completa o el flujo pistón, que permiten cargas menos diluidas (mayor % de ST) tendrán digestatos más densos y con mayores concentraciones de nutrientes por m³. El nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) saldrán del biodigestor más o menos diluidos.

Desde el año 2015 existe una norma chilena que define los estándares de calidad del digestato: NCh3375:2015. Digestato - Requisitos de calidad. La calidad del digestato es medida por varios parámetros: pH, contenido de nutrientes, contenido de materia seca y en especial su contenido de sólidos volátiles. Este último define su estabilidad bioquímica. Finalmente, se quiere un digestato que haya sido degradado adecuadamente en el biodigestor y no un digestato parcialmente descompuesto que cause problema sanitario o de olores o quemas en el cultivo al usarlo como fertilizante. La relación C/N (cercano a 15-20), el potencial de fitotoxicidad (inhibición de germinación de semillas o crecimiento de plantas), la presencia de metales pesados, y el contenido de ácidos orgánicos (bajo), son otros parámetros que se utilizan para medir la calidad del digestato.

Para la valorización y uso del digestato, el tipo y cantidad de minerales, además de sus características físico químicas son clave. Estas son variables que dependen del sustrato que se esté tratando en el biodigestor. Como ejemplo, la Tabla 8 muestra el estiércol fresco y el digestato en un biodigestor de mezcla completa.

Tabla 8. Propiedades físicas y químicas de estiércol y sus propiedades una vez digerido anaeróbicamente en un biodigestor de mezcla completa

Nutriente o parámetro	Afluente	Pozo purinero	Digestato (Efluente)
Materia seca (%)	2,73	4,96	0,36
Materia orgánica seca (% bs)	76,56	76,66	57,79
Nitrógeno total (kg/Ton)	1,42	1,40	0,38
pH	7,40	6,82	7,11
Fosforo total (kg/Ton)	0,36	0,65	0,13
Potasio total (kg/ton)	1,00	1,33	0,36
Magnesio total (kg/ton)	0,32	0,50	0,13
Calcio total (kg/ton)	0,57	1,12	0,22

Bs: base seca; se refiere a % de nutrientes respecto al estiércol ya seco, o sea, % de nutrientes contenido en los sólidos totales (ST).

Fuente: Datos referenciales de acuerdo a estudios de línea de base efectuados en el marco del proyecto Biogás Lechero, 2016.

En la Tabla 8, los demás nutrientes tienen diferencias no significativas, lo que



justifica el digestato como un excelente fertilizante. En el caso de la lechería, la utilización de digestato ofrece beneficios sobre la aplicación de purines, ya que el digestato ya ha sido degradado, estabilizado y sus nutrientes mineralizados, mientras que en el purín, este proceso ocurre en el suelo requiriendo mucho más tiempo. De este modo, el crecimiento del pasto es más rápido cuando se aplica digestato, pudiendo las vacas retornar a este pastizal recuperado en menos tiempo. Testimonios en Chile, Ecuador y Bolivia reportan un 25% de reducción en el tiempo necesario para que la vaca vuelva a entrar en el potrero (Martí, 2013).

Otra característica es el contenido de bacterias. Está comprobado que dentro de un biodigestor existe una disminución de la carga patógena debido a la ausencia de oxígeno y condiciones de acidez al interior de los biodigestores. Este ambiente hostil provoca una disminución de coliformes y *Salmonella*, los que se reportan muy cercanos al agua potable en algunos análisis microbiológicos realizados en la facultad de agronomía de la Universidad de Chile (Antumapu) (Varnero, 2016), por lo que no constituye un peligro por manipulación y/o trasvasije de este⁹.

La aplicación del digestato puede hacerse con las instalaciones y maquinarias utilizadas actualmente para la aplicación de purines y/o sistema de riego según el contenido de sólidos del digestato. Dos cálculos de estas aplicaciones se pueden realizar según las recomendaciones que INIA realiza al respecto en su Manual de manejo y utilización de purines de lechería 2012, para conocer disponibilidad de NPK. Se recomiendan volúmenes de 10 a 20 ton/ha en suelos irrigados, o 5 ton/ha en suelos de secano (SNV, 2011). En alfalfa por ejemplo, se recomienda su utilización cada 7, 14, 21 o 28 días, diluido 1:3.

También existen innovadores sistemas asociativos, como, por ejemplo, sistemas utilizados en países como Brasil: redes de distribución del digestato en cuencas hidrográficas completas. En Chile, no existe norma que regule la aplicación de los purines o de digestato en las praderas o cultivos, sin embargo, el INIA y el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) sugieren que la aplicación se realice bajo las siguientes condiciones:

⁹ Coliformes fecales totales, coliformes fecales y *E. coli* en 4,5 NMP/100 ml, *salmonella* sp, ausencia)

- Las dosis de purines no deben ser superiores a 150.000 (L/ha).
- No aplicar purines o el digestato en lugares cercanos a los animales.
- No aplicar purines o el digestato en días con mucho viento, altas precipitaciones o elevadas temperaturas.
- Evitar la aplicación en suelos con topografías de pendientes fuertes durante los periodos de lluvias intensas.
- Dejar una franja de protección de 10 a 20 metros para las fosas secundarias del predio, y fosas principales del predio, cursos de agua, límite con los vecinos y caminos públicos.
- La mejor época para la aplicación de lodos a predios agrícolas es desde fines de invierno hasta el primer mes de primavera, donde hay gran crecimiento vegetativo y por ende altas demandas de nitrógeno.

3.3 TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Los biodigestores son esencialmente un sistema de tratamiento biológico que, además, en el proceso, producen biogás y digestato. El proceso de digestión anaerobia se realiza dentro de un tanque hermético (el biodigestor) que captura los gases generados, evitando la emisión de olores. Además, al introducir el estiércol o materia orgánica dentro del biodigestor, se reduce la cantidad de moscas y otros insectos. El digestato, bien logrado, tampoco atrae a las moscas ni tiene un olor fuerte. El proceso de digestión anaerobia estabiliza la materia orgánica de forma controlada al transformarla en digestato con valores de pH neutros (entre 6 - 7,5), lo que reduce la cantidad de sólidos volátiles de un 50% a un 90%.

De este modo, indicadores de contaminación (y causantes de la eutrofización) como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se reducen hasta en un 80%, a veces más. Respecto a coliformes fecales totales y *salmonella*, el proceso de digestión anaerobia a temperaturas por encima de 30°C elimina su presencia. Sin embargo, en biodigestores que trabajan en rangos psicrófilo (por debajo de 25°C) no logra la eliminación completa de los coliformes, pero sí la salmonella (Varnero, 2016). De hecho, las plantas de tratamiento de aguas servidas urbanas consideran, en una de sus etapas, el paso de las aguas por un biodigestor.

Por todo esto, los biodigestores son sistemas complementarios de tratamiento que ayudan a alcanzar los valores definidos por la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas (DS 46/2003), y a aguas continentales superficiales (DS90/2000) ambas en anexo sobre tratamiento de aguas servidas. De no ser alcanzados porcentajes de remoción de materia orgánica, con valores fuera de los rangos adecuados, el digestato debería pasar por procesos de tratamiento secundario activos como lodos activados, o pasivos como piscinas artificiales aeróbicas, entre otros.

Tabla 9. Carga contaminante diaria equivalente según DS 90/2000 (Aguas superficiales) y DS 46/2003 (Aguas Subterráneas)

Parámetro	Valor característico aguas subterráneas	Valor característico aguas superficiales
pH	6-8,5	6-8
T°		20°C
Sólidos suspendidos totales		220 mg/L
Sólidos sedimentables		6ml/L 1 h
Aceites y grasas	10	69 mg/L
Hidrocarburos fijos		10 mg/L
DBO ₅		250 mg/L
Arsénico	0,01	0,05 mg/L
Boro	3	0,75 mg/L
Hierro	10	1 mg/L
Nitrógeno kjeldahl	15	50 mg/L
Sulfato	500	300 mg/L
Coliformes fecales o termotolerantes		10 E7 NMP/100 mL

Fuente: Elaboración propia en base a normativa chilena, 2017.

Al respecto la normativa (voluntaria) del digestato (NCh 3375) (INN, 2015), establece los siguientes requisitos sanitarios para el digestato, indicados en la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10. Valores máximo permisible de microorganismos según norma chilena 3375

Tipo de microorganismo	Límite máximo
<i>E. Coli</i>	<1000 NMP/g de digestato, en base seca
<i>Salmonella sp</i>	< 3 NMP/4 g de digestato en base seca
Huevos de helminto	< 1 NMP/4 g de digestato en base seca
NMP: Numero más probable.	

Fuente: elaboración propia en base a normativa chilena, 2017.

Tabla 11. Valores máximo permisible de metales pesados según normativa chilena 3375

Metal pesado	Concentración máxima (%bs)* mg/kg
Arsénico	55
Cadmio	15
Cobre	667
Cromo	167
Mercurio	3
Níquel	133
Plomo	367
Zinc	1.333
* Concentraciones expresadas como contenidos locales	

Fuente: Elaboración propia en base a normativa chilena, 2017.

A todos y cada uno de nosotros nos podría interesar tener un biodigestor para lograr un adecuado tratamiento de los residuos orgánicos, y mejorar el desempeño de sostenibilidad de la industria lechera. Los diferentes contextos de cada productor son los que hacen que la inversión en un reactor sea más o menos atractiva y además convenga en términos económicos. Al respecto, cabe destacar que cada productor tiene un contexto diferente al otro, lo que depende de su escala, el manejo actual de purines, manejo de aguas lluvia, la posibilidad de uso de la energía calórica (reemplazando leña o combustibles fósiles), el grado en que podrían autoabastecerse de electricidad a altos grados de producción de biogás, y el manejo del sistema de producción y uso del biogás.

En términos generales, los biodigestores son una tecnología apropiada para la gestión, tratamiento y aprovechamiento de los estiércoles, ya que los pozos purineros, tan extendidos en Chile, no ofrecen los mismos beneficios. Las ventajas comparativas, al no tener pozos abiertos, tienen que ver con:

- Mayor seguridad de los operarios, animales y vecinos.
- Menos olores y presencia de insectos.
- Contar con dos productos muy apreciados en el contexto productivo de la región:
 - La posibilidad de auto generar energía, ya sea calórica, eléctrica o mecánica.
 - La posibilidad de auto generar fertilizante en un estado químico más aprovechable por las plantas.

En la actualidad las nuevas tendencias a nivel agropecuario y sus vinculaciones a la ciudad y los servicios que entre sí se brindan, sitúan al biogás en el centro de la relación: alimentos, energía y agua. Los tres recursos principales que el ser humano requiere para la vida. Cuando alguno de ellos falla, los otros dos se ven perjudicados (Bley Jr, 2014). Esto porque los biodigestores evitan la contaminación de volúmenes importantes de agua, generan biogás y energía, además colaboran en mantener la frontera agrícola limitada a suelos que son protegidos contra la erosión a partir del uso del digestato, con los consiguientes beneficios:

- Producción de alimentos para una población creciente a tasas nunca antes evidenciadas sobre el planeta.
- Menor presión sobre los sistemas naturales.
- Menor competencia por uso de suelos en las áreas de intersección campo-ciudad.

A modo de repaso, a continuación, se presentan varios escenarios en los que un biodigestor es una herramienta útil para la producción lechera del sur de Chile.

4.1 ESCENARIO 1: SI NECESITO UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE PURINES O QUIERO MEJORAR EL QUE TENGO.

La legislación respecto al manejo de los purines y efluentes de la lechería están bajo el alero de la normativa chilena sanitaria y ambiental. El código sanitario, que se fiscaliza a través de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), establece que la descarga de desagües, aguas servidas, residuos industriales y mineros, pueden ser inmediatamente suspendidos de no existir un tratamiento satisfactorio que impida toda contaminación. Las normativas relacionadas son:

- **Decreto supremo 609:** condiciona las emisiones que se viertan en el alcantarillado.
- **Decreto supremo 90/2000:** la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es el agente fiscalizador del cumplimiento de los niveles de **contaminación de asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y aguas continentales superficiales.**
- **Decreto supremo 46/2003:** la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), junto a la Autoridad Sanitaria y la Dirección General de Aguas (DGA) fiscalizan que se cumpla la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas, ya que estas sirven para el consumo humano rural y urbano.

Si bien existe un marco de promoción de buenas prácticas agrícolas respecto al manejo y utilización de los purines, a lo largo del país el porcentaje de predios sin utilización de pozos purineros impermeabilizados continúa siendo bastante alto. Un 94,48% de los predios lecheros de Chile no cuenta con un pozo

impermeabilizado según la información de ODEPA y su encuesta de ganado bovino del 2015 (INE, 2015).

Esto está vinculado a los factores críticos identificados en el sector (alta producción de purines, escurrimiento a corrientes superficiales, percolación hacia aguas subterráneas y excesivo uso de agua fresca en limpieza), y las condiciones locales del suelo (existen suelos con baja aptitud para ser fertilizados con purines, debido entre otras cosas a ser poco profundos, tener pendientes, encontrarse cerca de cursos de agua, ser suelos delgados o fácilmente inundables), (Salazar S., 2012). Sobre todo la época de demanda y la capacidad de almacenar purines también juegan un rol fundamental.

APL (Acuerdos de producción limpia)

En Chile abarcan cuatro grandes pilares de la ganadería lechera: el manejo de los purines, el manejo de las aguas de desecho, la remoción y almacenamiento de desechos sólidos y la calidad de las fuentes de agua fresca.

Si bien Chile ha normado bastante en cuanto a temas medio ambientales, aún es factible vincular las prácticas de producción limpia a aquellas prácticas destacadas por ser innovación en el mundo, por ejemplo: la incorporación de la digestión anaeróbica a la ganadería y ganadería lechera. En la actualidad, en países como Brasil, se puede observar la implementación de condominios energéticos, los que no solamente distribuyen el biogás, sino que también acopian los residuos de sus prácticas y asocian a variados productores con el objetivo de aumentar la productividad de los sistemas o complementar el tratamiento de purines con residuos, como el suero de leche, queserías u otros de la agroindustria (Bley Jr, 2014).

Si Chile decide intensificar la mayor adherencia a los acuerdos de producción limpia, impulsados y promovidos hace ya dos décadas, la instalación de biodigestores puede ser una alternativa por los beneficios que ofrecen respecto a los pozos purineros. El costo de inversión y mantenimiento de los biodigestores depende del tipo de tecnología y tamaño. Se estima que los pozos purineros

tienen un costo de inversión en el rango de \$56.422 a \$247.715 pesos/vaca asociado a su instalación. Por lo tanto, alcanza valores de inversión considerables, que podrían representar una fracción del costo de un biodigestor. La Figura 20 muestra un ejemplo de un pozo purinero.

Figura 20. Ejemplo de un pozo purinero en hormigón armado



Fuente: elaboración propia, 2016.

4.2 ESCENARIO 2: SI PUEDO OPTIMIZAR EL USO DE LOS PURINES COMO FERTILIZANTE MEDIANTE LA PRODUCCIÓN DE DIGESTATO

Cuando se aplica purines en los cultivos forrajeros, estos deben degradarse para poder ser asimilables por las plantas, y durante este proceso los compuestos nitrogenados pueden perderse por la escorrentía producida por las lluvias. En cambio, el digestato ya está estabilizado y es directamente asimilable por las plantas (reduciendo volatilización y pérdidas por escorrentía), además mientras se produce digestato se estará dando un tratamiento adecuado a los purines y generando biogás. De este modo se aumenta la soberanía productiva o independencia productiva y su resiliencia a cambios en el precio de los insumos, tan frecuentes en la industria lechera.

Los valores de gasto en establecimiento y mantención de praderas representan los más altos porcentajes en comparación al resto de los insumos (labores, semillas y agroquímicos) de la producción de forraje, alcanzando entre un 43% y un 84% según las diversas especies y sus respectivos periodos de crecimiento y demandas de nutrientes (Demagnet F., 2014).

La avena forrajera presenta la mayor superficie cultivada de alimento para ganado lechero, seguida por ballicas (césped inglés o ryegrass), y maíz para silo, el que ha aumentado a una tasa de 3% anual (Demagnet F., 2014). Ballicas son las que demandan la mayor cantidad de fertilizantes sintéticos, con la consecuente **necesidad de enmiendas al suelo**, debido a los desbalances de pH que ocurren por el uso de nitrógeno sintético. En este caso, el reciclaje de nutrientes que se realiza al aprovechar el efluente del biodigestor como fertilizante, puede equilibrar el pH, lo que reduce además la dependencia de insumos externos al campo.

El digestato puede aplicarse en forma foliar a los cultivos, árboles frutales, cereales, leguminosas, etc., así como también a las raíces de los cultivos diluido en agua o alternativamente su estado compostado y más bien seco. Incluso existen numerosos estudios que demuestran que la aplicación del digestato en los cultivos influye en plantas de mejor salud, con menos riesgo de sufrir plagas o enfermedades e incluso con mayor resistencia a las heladas (Martí-Herrero, 2014). Gracias al uso de digestato aumenta el valor proteico de ciertos cultivos forrajeros, aumenta la disponibilidad de nutrientes para la micro flora microbiana fijadora de nitrógeno y solubilizadores de fósforo, adicionalmente, contiene algunas enzimas que estimulan el apetito de los animales y produce vitamina B12 y aminoácidos para el crecimiento animal, reduce la dependencia del uso de fosfatos, los que son de origen mineral y estarían llegando al pico de producción, de modo que pronto no se podrán obtener más fósforo desde sus sitios específicos de extracción mundial (Demagnet F., 2014). Una amplia lista de ventajas y desventajas se encuentra en la Tabla 12.

Tabla 12. Ventajas y desventajas del uso y aprovechamiento del digestato para predios lecheros en Chile

Ventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Amplio rango de nutrientes presentes, disponibles para las plantas en su estado mineral y estabilizado biológicamente. 2. Contiene menor presencia de patógenos. 3. Elevada actividad biológica y presencia de microflora (hongos, levaduras, fito hormonas). 4. Mejora la fertilidad, capacidad de retención de agua del suelo, el intercambio gaseoso y el consecuente desarrollo radicular, lo que mejora por lo tanto su condición edáfica y estructura, disminuyendo y evitando la erosión de suelos. 5. Disminuye la germinación de semillas de malezas, ya que las degrada. 6. Existe reducción de sustancias fitotóxicas que podrían causar necrosis en cultivos de estados fenológicos tempranos. 7. El digestato sólido contribuye positivamente a mejorar el contenido húmico del suelo, su permeabilidad, disminuye la posibilidad de compactación del suelo.
Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Su consistencia es heterogénea en el tiempo y por predio, por lo que su uso no permite cálculos adecuados. 2. Su manejo en forma líquida puede ser complejo en ciertas situaciones, especialmente lluviosas. 3. En su forma deshidratada el amonio se pierde por volatilización. 4. Es necesario diseñar un sistema que ofrezca la posibilidad de almacenarlo por periodos que permitan flexibilidad en su manejo, sin llegar a pasar tanto tiempo almacenado que corra el riesgo de emitir metano, óxido nitroso o amoníaco, gases nocivos para la atmósfera. 5. Pueden llegar a contener salmonella, habiéndose reportado su presencia hasta en un 3,2% al co-digerir purín crudo en cultivos energéticos. En estos casos se recomienda higienizar o someter a tratamientos secundarios.

Fuente: Resumen de (Gerbio, 2014), (Ministerio de Energía, GIZ, 2012) (Ministerio de Energía, PNUD, FAO, GEF, 2011) (Warnars, 2014) (Varnero, 2016) (Groot, 2013).

4.3 ESCENARIO 3: SI LA DEMANDA DE ENERGÍA ME REFLEJA IMPORTANTES COSTOS PRODUCTIVOS

La demanda energética de los predios lecheros se concentra mayoritariamente en la necesidad de energía eléctrica de alta potencia (hasta 30 kWh) durante el proceso de ordeña en grandes predios y 3 kWh en predios de pequeños productores (Valdovinos, 2015), para el uso de la bomba de vacío de 2 y 4 horas por jornada de ordeña diaria. Normalmente son dos ordeñas en predios de producción extensiva con pastoreo, y tres en predios con estabulación y uso de concentrados. Adicionalmente hay necesidades eléctricas para bajar la

temperatura de la leche y su mantención a 4°C previo al retiro por los camiones refrigerados 1 vez al día.

La necesidad de energía para riego (bomba pozo profundo) es especialmente alta en los meses de verano, con el fin de alimentar con pradera en los meses estivales. Otros gastos eléctricos que se asocian a la producción son: consumos domésticos y de oficinas (los que normalmente no se encuentran separados), cerco eléctrico, ventiladores (para productores de queso), bomba purinera, duchas, chancador de cereales, motor suplemento animales, etc.

Figura 21. Ejemplo del uso calorífico del biogás para la pasteurización de leche en fundo productor de quesos



Fuente: elaboración propia, 2016.

También hay demanda energética con fines térmicos que hoy utilizan gas o leña (ver Figura 21). El uso de estos combustibles se observa en predios con producción de quesos o manjar, cuando la energía térmica es necesaria para la pasteurización de la leche, cocción de la leche, la mantención de temperatura

ambiental de la sala de maduración de quesos, la preparación de leche de los terneros, o limpieza de las pezoneras y equipo de ordeña en general. En algunos casos se hace uso de calefones para la obtención de agua caliente sanitaria.

Existen importantes diferencias en el tipo y cantidad de energía consumida entre planteles pequeños y los de mayor tamaño. Un predio pequeño en el contexto de esta guía (hasta 100 vacas en producción) consume en promedio un 77,6% de energía eléctrica y un 22,4% de energía térmica, correspondientes a 795.000 kWh/año y 485.000 kWh/año respectivamente (Valdovinos, 2015). Esta relación cambia al valorar económicamente el gasto en energía, siendo este de un 62,1% de energía eléctrica y de 37,9% en energía térmica, lo que se traduce en aproximadamente 128,3 y 37 millones de pesos anuales respectivamente (en 2014).

Por otro lado, las lecherías de tamaño mediano (entre 100 y 1.000 vacas) según los 57 estudios de prefactibilidad del proyecto GEF biogás, el principal consumo es térmico (70% en promedio) con promedio de 280.000 kWh/año y de 100.000 kWh/año eléctricos (25%). En este contexto, producir un combustible como el biogás en el propio predio supone una oportunidad para reducir los costos asociados a la energía térmica, ya que el biogás, como ya se comentó en el capítulo **Uso térmico del biogás 3.1.1**, tiene su mayor eficiencia cuando es aprovechado de forma térmica, que en el caso de la lechería sería en reemplazo de gas o leña.

No obstante, se ha constatado que, en el segmento de lecherías medianas del sur de Chile, el costo de la energía representa entre un 3% a un 6% del costo total del litro de leche producida. Esto implica que los proyectos destinados solo a generar energía tendrán un impacto económico discreto en este tipo de lecherías.

También cabe destacar que el ahorro por concepto de electricidad que puedan realizar los productores estará en función del tipo de conexión que tengan con la empresa distribuidora, existiendo cuatro tipos de tarifas, según contrato¹⁰ : Baja Tensión 1 “monómica”(BT1), Alta Tensión 2 (AT2) “potencia contratada”, Alta

10 <https://www.enel Distribucion.cl/tarifas>

tensión 3 (AT3) es demanda máxima y Alta Tensión 4 (AT4) tarifa horaria. Esto determinará cuan factible es ahorrar en la boleta de electricidad en función del consumo eléctrico.

Tabla 13. Tipo de tarifa eléctrica en Chile

Tipo	Costo asociado a:	Ahorros por concepto de:
BT1	Potencia y energía (monómico)	Energía y potencia consumida
BT&AT 2	Potencia contratada	Energía consumida
AT3	Potencia máxima leída	Potencia consumida
AT4	Horario de consumo de energía y potencia	Fuera del horario punta ("peak")

Fuente: elaboración propia, 2017.

De un levantamiento de 38 lecherías medianas de Los Ríos y de Los Lagos llevada a cabo por el proyecto GEF Biogás, se determinó que la mayor parte de las lecherías (53%) tienen tarifas de baja tensión, un 16% correspondía a tarifa monómica BT-1, y el restante 47% a tarifas de alta tensión (AT2-A y AT3-A principalmente), siendo importante incorporar en el análisis económico de cualquier proyecto de generación eléctrica para autoconsumo y venta de excedentes, el análisis de las tarifas y los diferentes ahorros que es posible gestionar.

5.1 ¿QUÉ CONDICIONES SE NECESITAN PARA TENER UN BIODIGESTOR? (EJEMPLOS)

Lo más importante es tener información: entender qué es un biodigestor, qué aporta y qué requiere. Esa es la primera parte. Después están los requisitos físicos, como la disponibilidad de materia orgánica, agua y espacio.

Un productor que se interesa por los biodigestores tiene que saber cuáles son sus requerimientos de energía térmica, mecánica y eléctrica; cuáles son sus volúmenes de residuos generados y cuál es el uso actual que le otorga al agua. El productor debe comprender qué compra, qué va a instalar en su predio y ver de qué manera se integra mejor a sus actividades agropecuarias. Para esto, el productor tiene que entender cómo funcionan los biodigestores y en qué puede aprovechar los productos generados (biogás y digestato). Igual que muchos productores están satisfechos con los resultados obtenidos tras haber introducido un biodigestor en su predio, también se ha dado el caso de productores que quedan decepcionados. El biodigestor puede funcionar correctamente, eliminando olores, produciendo biogás y digestato, pero el productor puede tener expectativas que no se cumplan. Por ejemplo, el biogás producido puede ser menor al esperado, no se sabe qué hacer con el digestato o el mantenimiento requerido supera lo esperado, por falta de información previa.

5.2 DISPONIBILIDAD REGULAR DEL SUSTRATO

La primera necesidad es una fuente continua de materia orgánica. Para el caso de esta guía: purín del sector lechero y otros sustratos relacionados a la producción lechera, como es el suero de la producción de quesos. Lo primero es saber con cuánto estiércol se cuenta para introducir a un biodigestor. Como referencia, por cada 100 kg de peso vivo, una vaca produce 7-8 kg de estiércol al día, o inclusive hasta 10% del pesos vivo en Chile (Salazar S., 2012). Por lo tanto, una vaca de 500 kg producirá unos 40 kg de estiércol al día (50 kg si se considera el 10% del peso vivo). Pero no todo estará disponible para alimentar al biodigestor, y la materia que sí lo esté, será aquella que pueda ser recogida o conducida hacia el biodigestor.

Estimación del estiércol disponible

- La referencia es que, por cada 100 kg de peso vivo, una vaca produce 7-8 kg de estiércol al día. Por lo tanto, una vaca de 500 kg producirá unos 40 kg de estiércol al día.

De este modo hay que considerar cuál es el período de estabulación del ganado. Por ejemplo: cuántas horas está en patio de espera, cuántas en sala, cuántas en los patios de alimentación - de existir -, si la estabulación es completa, nocturna, en inviernos, etc. Al final se trata de estimar el estiércol que queda en el suelo de los diferentes espacios en que están los animales. Utilizando un sistema de lavado y recolección, se recoge el estiércol y la orina. Una primera aproximación es estimar cuántas vacas en ordeña se tienen, segmentarlas por pesos promedio y estimar cuánto tiempo estarán cada día en cada espacio, donde se puede recolectar el estiércol. Por ejemplo:

Mariela, una productora de la Región de Los Lagos cuenta con 200 vacas, de las que 160 están en ordeña. Mariela tiene estabuladas sus vacas en producción unas 4 horas al día. Sus vacas tienen un peso promedio de 500 kg ¿cuánto estiércol disponible tiene? Si por cada 100 kg de peso vivo una vaca produce unos 7 kg de estiércol, se tiene que una vaca de 500kg producirá a lo largo del día 35 kg/d. Pero las vacas solo están estabuladas 4 horas al día o sea el 17% del día (4/24). Por tanto, por cada vaca de Mariela solo se podrá recoger el 17% del estiércol que produce a lo largo del día, mientras están estabuladas, lo que sería 5,8 kg/día por vaca (17 % x 35 kg/d). Entonces, de sus 160 vacas en ordeña, tendrá disponible 928 kg de estiércol al día (160 vacas x 5,8 kg/d).

Una vez que se conoce la cantidad de estiércol disponible, es necesario evaluar qué cantidad es factible hacer llegar al biodigestor o punto de pre tratamiento y esto depende del modo en que el productor trabaja sus estiércoles. También hay que considerar la posibilidad de poder recolectar otros residuos orgánicos provenientes del predio o de sistemas productivos aledaños. El biodigestor debe integrarse al predio lechero, ser un elemento más dentro de las actividades agropecuarias y saber que significará ciertas tareas adicionales. Por esto es importante considerar el manejo de los residuos, y preparar la infraestructura para que las tareas adicionales sean las mínimas posibles. ¿Se limpia con pala el

estiércol acumulado en el suelo? ¿Se utiliza manguera? ¿Adónde va este estiércol? ¿Está mezclado con paja? son preguntas que hay que responder y que variarán de productor a productor.

5.3 DISPONIBILIDAD DE AGUA

Las áreas de acumulación de excretas (sala de ordeña y patios) son, por lo general, lavadas con aguas limpias, aguas verdes y/o aguas de lluvia. De este modo, el agua de lavado se mezcla con el estiércol, y lo arrastra hasta ser introducido en el biodigestor. Dependiendo del tipo de biodigestor, se puede cargar con estiércol fresco con muy poca agua (Figura 22), en una relación estiércol:agua entre 1:1 a 1:3 o incluso más diluido. Normalmente, el agua utilizada para el lavado de los pisos está en mayor proporción diluyendo más la mezcla, a no ser que se utilicen sistemas de recogida de estiércoles en seco, que apenas utilizan agua.

Figura 22. Estiércol barrido con poca adición de agua en un predio lechero; ideal para digestores de mezcla completa o flujo pistón



Fuente: elaboración propia, 2017.

Normalmente, el productor usa la cantidad de agua necesaria para dejar limpios sus patios y esta puede variar, aunque en términos generales se puede decir que se gastan unos 40 litros de agua en limpieza por animal al día (Salazar S., 2012). Esta es una cantidad alta, pues implica que si una vaca en 4 horas de estabulación produce 5,8 kg de estiércol y para limpiarlos del piso se utilizan 40 litros de agua, la relación estiércol:agua queda 1:6,9, muy por encima de las relaciones mencionadas.

Sólidos Totales (ST) de la carga al biodigestor

El estiércol de vaca fresco tiene entre 12% y 15% de ST. Cuando se mezcla un kg de estiércol de vaca fresco con 1 litro de agua, el % de ST de la mezcla baja a 6 % de ST, y a 4 % si se mezcla con 2 litros de agua, o bien 3 % con 3 litros de agua; y así sucesivamente. Entre más agua se utilice, menos es % de ST de la mezcla, y se requerirá un biodigestor más grande.

Mariela utiliza 120 litros de agua por vaca para limpiar los pisos. Con sus 160 vacas en producción, que pasan estabuladas 4 horas al día, consume 19,2 m³ de agua al día (160 vacas x 120 L/vaca.día). Con esta agua limpia los 928 kg (≈0,9 toneladas) de estiércol acumulado en los pisos. Entonces, la carga al biodigestor se puede suponer de 20,1 m³ diarios (19,2+0,9=20,1 m³). De este modo, la relación estiércol:agua es de 1:20,6 (19,2/0,9=20,7). Si el estiércol fresco tiene un 12% de sólidos totales, la carga diaria de Mariela tendrá 140kg de ST (928 kg x 12%=111 kgST). En la carga al biodigestor de 20,1 m³, solo habrá 111 kg de ST, y por tanto el % de ST en la carga será de 0,55% ST (111x100/20.100=0,55).

El agua y el estiércol arrastrado son purín que entrará al biodigestor, o sustrato, **también conocido como mezcla o carga**. El agua no juega un papel biológico en la digestión anaerobia que sucede dentro del biodigestor, pero sí es importante para arrastrar el estiércol desde los corrales y para que esta mezcla fluya dentro del biodigestor. La clave, para facilitar el trabajo es que el piso donde las vacas hayan estado estabuladas tenga cierta inclinación, para que al ser lavado las aguas y estiércol puedan ser recogidas en un canal que las conduzca hasta el biodigestor. Sin embargo, hay que tener cuidado con las aguas de lluvia, pues si el corral no está techado o si las aguas de la cubierta se vierten sobre los

canales, toda esa agua entrará al biodigestor, desplazando a la mezcla de agua y estiércol y reduciendo el tiempo de retención hidráulico (TRH), lo que afectaría negativamente el funcionamiento del biodigestor. Reducir la cantidad de agua que entra al biodigestor (mezclada o no con estiércol), ayudará a reducir el tamaño de biodigestor requerido. De este modo, evitar aguas lluvias y/o reducir la cantidad de agua utilizada en el lavado de los pisos, son medidas eficientes que permiten optimizar el tamaño (y la inversión) del biodigestor. La Figura 23 muestra un ejemplo, como el agua de lluvia aporta hasta casi un 50% del volumen de las aguas en un proyecto, demostrando la importancia de su separación.

Tabla 14. Ejemplo sacado del manual de Salazar S. (2012) donde se muestra en un ejemplo el aporte de aguas lluvia no controladas a la carga de un biodigestor

Supuestos	Volumen Generado (Litros/año)	Aporte (%)
Fecas y orina		
100 vacas en ordena de 600 kg x (60 kg de fecas/24 h) x 4 h confinamiento/día	365.000	10%
Aguas Sucias		
27,75 x 8 unidades equipo ordeña + 134,4	130.086	4%
0,0403 x 3.000 listros + 11,153	48.199	1%
Aguas Lluvia		
600 m ² construcciones sin techar x 1.500 mm de lluvia (=1.500 litros agua/m ²)	900.000	25%
400 m ² techos sin canalizar x 1.500 mm de lluvia (=1.500 litros agua/m ²)	230.908	6%
Agua lavado pisos y ubres		
100 vacas ordeña x 3,2 litros vaca/día	1.138.800	32%
100 vacas ordeña x 5 litros vaca día lavado ubres	182.500	5%
Total	3.595.493	100 %

Fuente: Salazar S., 2012.

En el caso de los pozos purineros se estima que un 48% del agua que llega al pozo corresponde a aguas de lluvia entre los meses de mayo y septiembre (Salazar S., 2012). Por esto, es recomendable que los pisos donde se acumula el estiércol estén techados y que los techos estén canalizados de tal forma que

el agua lluvia pueda desviarse y reutilizarse. Estas cubiertas se pueden sustituir por una caja de registro en los canales, a la que ingresarán las aguas lluvia o las aguas de lavado con estiércol que tiene dos salidas, una que dirige el flujo hacia el biodigestor y otra hacia los pastizales.

5.4 MANEJO DEL DIGESTATO

También hay que considerar cómo se va a manejar el digestato. Este no tiene olor y no atrae moscas (síntoma de que el biodigestor está funcionando correctamente) y, aunque muy diluido, contiene los nutrientes originales del estiércol, que en el proceso de la digestión anaerobia han pasado de su forma orgánica a su forma mineral. ¿Qué significa esto? Que los nutrientes en forma orgánica (el estiércol fresco) no pueden ser asimilados directamente por la planta y requieren de una degradación, mientras que los ya mineralizados (el digestato) pueden ser asimilados directamente por las plantas. Por esto, lo mejor es que el digestato que contiene los nutrientes presentes en el estiércol que produjo la vaca, y que extrajo de los pastizales y praderas, sean devueltos a éstas. De este modo se estaría incentivando el reciclaje de nutrientes dentro del predio, mediante el fertirriego del digestato. Los estanques de acumulación sirven para almacenar el digestato y aplicarlo en los momentos oportunos; los pozos secundarios o de emergencia se construyen para almacenar el purín que no será utilizado durante el invierno, época en que las praderas no presentan alta demanda de nutrientes.

Por lo tanto, volviendo al principio de esta sección **¿qué condiciones se necesitan para tener un biodigestor?:**

- **Estiércol disponible**, que será aquel que se queda en los pisos mientras los animales están estabulados.
- **Agua**, para arrastrar el estiércol acumulado hacia el biodigestor, evitando que las aguas lluvia sigan el mismo curso.
- **Praderas y cultivos** para reutilizar el digestato, ya que se producirá tanto digestato al día, como litros de carga se hayan introducido al biodigestor o **alternativamente la posibilidad de venderlo** en los alrededores cumpliendo con la NCh 3375.

- **Un uso de biogás adecuado**, que cumpla el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017).
- Y la más importante, **un productor informado**, que conoce lo que implica tener un biodigestor (estudio de factibilidad, implementación, operación y mantenimiento), como aprovechar sus productos (tratamiento de residuos, biogás y digestato) y el potencial de introducir uno en su predio.

5.5 ¿DÓNDE INSTALAR MI BIODIGESTOR?

El biodigestor se tiene que integrar en la lechería y en las actividades que en ella se realizan. Esta afirmación debe prevalecer durante todo el proceso de toma de decisiones. Lo primero que hay que visualizar es el flujo del estiércol en los establos, dónde se acumulan y por dónde van los canales que lo evacuan cuando se lavan los pisos. El biodigestor, idealmente, deberá estar por debajo de este nivel para permitir que la entrada de la mezcla sea por gravedad, cuando se desee evitar bombas en el sistema. Esto ya marca un punto de inicio.

Otro aspecto a considerar es el relieve del terreno, ya que si se va a trabajar con biodigestores convencionales (sin agitación interna), y se dispone de terreno con cierta inclinación, ubicar el biodigestor en esta pendiente permitirá sacar una tubería de evacuación de lodos por gravedad que descargue un poco más abajo. En los casos en que exista un pozo purinero, es conveniente evaluar la viabilidad de convertirlo en un biodigestor convencional, al menos para aprovechar su ubicación y excavación. En otros casos, el pozo purinero existente puede ser aprovechado como tanque de almacenamiento de digestato y por tanto ubicando el biodigestor aguas arriba. En caso de biodigestores de mezcla completa o flujo pistón lo que se requiere es una plataforma firme plana y por lo tanto conviene buscar un espacio sin pendientes.

El espacio que se elija para ubicar el biodigestor debe evitar zonas inundables o de escorrentía de aguas lluvia, así como no interrumpir los pasos naturales de animales y personal que trabaja en el plantel.

Según el Artículo 27 de reglamento de seguridad

- El diseño deberá contemplar una clasificación de zonas de riesgo de explosión basado en alguna norma reconocida internacionalmente, la cual deberá ser representadas sobre un plano de zonas de riesgo de explosión. En las zonas de riesgo de explosión se deberán cumplir las siguientes exigencias mínimas:
1. Las instalaciones eléctricas y los productos eléctricos deberán estar diseñados para operar en la zona de riesgo de explosión en la que se instalarán.
 2. Se debe considerar una distancia mínima de 6 metros entre el punto donde se puede originar una atmósfera explosiva y/o entre un almacenamiento de biogás, y una fuente de ignición o puntos de emisión de calor que permitan la ignición de llama para el metano o materiales y elementos combustibles. Lo anterior no aplica a las antorchas.
 3. En caso que la estructura adyacente no se encuentre clasificada como zona de riesgo de explosión y cuya altura sea superior al almacenamiento de biogás se deberá considerar una distancia de seguridad equivalente a cinco veces la altura de dicha estructura.

Cuando se trabaja con biodigestores convencionales, un aspecto a considerar es que el biodigestor se ubique en zonas con poca sombra de árboles y estructuras. De este modo se puede aprovechar algo de la radiación solar incidente para calentar el sistema, ya que estos biodigestores no tienen un sistema activo de calefacción, a diferencia de los de mezcla completa y flujo pistón.

Hay que considerar que cuanto más lejos este ubicado el biodigestor del punto de consumo de biogás, implicará mayores inversiones y mantenimiento para conducirlo mediante tuberías. Sin embargo, se exige un mínimo de seis metros entre el punto de almacenamiento de biogás y las zonas identificadas como de riesgo de explosión. En casos en que la presión natural del biogás en el biodigestor no es suficiente como para llegar con fuerza al punto de consumo, siempre se pueden poner sopladores que empujan el gas y le dan presión. Por lo tanto, siempre hay que tratar de minimizar las distancias, pero tratando de aprovechar las características del propio terreno (asoleamiento, espacios planos no inundables o pendientes sin escorrentía, etc).

Respecto al uso del digestato, conviene ubicar el biodigestor lo más arriba posible, para poder distribuirlo por gravedad a los cultivos de forrajes que queden por debajo.

Junto con el biodigestor es importante preparar los patios de espera, instalando techumbres y protecciones para evitar la entrada de agua lluvia a los pozos purines. Además hay que identificar dónde se van a ubicar los sistemas de pretratamiento de la mezcla, si los hubiera, como un sistema de separación de sólidos y los sistemas de post tratamiento, tanto del biogás si es el caso (condensado de agua, etc.), como del digestato (tanque de almacenamiento).

Finalmente es una decisión conjunta entre la empresa proveedora que dispone de los criterios técnicos, y debe seguir las indicaciones del reglamento de seguridad del Ministerio de Energía y el productor, que tiene el conocimiento local sobre espacios inundables, escorrentías, asoleamientos, posibles ampliaciones de infraestructura, pasos de animales, vehículos y personas, etc.

5.6 NORMATIVA QUE APLICA EN CHILE

Antes de iniciar cualquier planificación respecto al diseño y operación, es importante conocer la normativa vigente en este momento en Chile. La Tabla 14 indica un resumen del marco legal ambiental actual.

El reglamento de seguridad de plantas de biogás se estructura en base a 8 Títulos y 97 artículos, disposiciones finales y transitorias e identifica al propietario, al operador y al instalador de la planta. Y hace imprescindible el registro de la planta de biogás ante la SEC, además de la necesidad de contar con un instalador que cuente con su licencia Clase 4, brindada por el mismo organismo de fiscalización.

Figura 23. Portada guía didáctica registro



Fuente: SEC, 2017

Tabla 15. Resumen de legislación aplicable para producción y uso del biogás en Chile

Vinculación	N°	Campo de acción	Marco legal aplicable
Nivel voluntario	1	Purines	Acuerdo de producción limpia (APL) y buenas prácticas ganaderas
Obligatorio	2	Aguas residuales	Artículo 71 del Código Sanitario Decreto supremo 90/2000 (Aguas superficiales) Decreto supremo 46/2002 (Aguas subterráneas) Decreto supremo 609 y 236 (Alcantarillado)
Obligatorio	3	Cumplimiento de las plantas de biogás: etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento, inspección y término definitivo de operaciones (incluye recepción, preparación y almacenamiento de sustrato; producción, almacenamiento, transferencia, tratamiento, suministro, uso o consumo de biogás, y demás obligaciones de las personas naturales y jurídicas que intervienen a objeto de realizarlas en forma segura.	Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía, decreto 119 (2017) (Registro indispensable desde agosto de 2017)
Referencial	4	Diseño y operación de plantas de biogás.	NCh 3381 (INN)
Recomendable para autoconsumo y comercialización	5	Requisitos de calidad del digestato.	NCh 3375 (INN)
Obligatorio	6	Según los impactos ambientales que genere un proyecto. Dado el lugar de emplazamiento, riesgos a la salud de la población, efectos sobre recursos naturales (suelo, agua, y aire), etc. se determina realizar un Estudio de Impacto Ambiental, o alternativamente una Declaración de Impacto Ambiental.	Pertinencia a la evaluación SEIA en caso de cumplir con Artículo 11 de la Ley de Bases Generales de Medio Ambiente.

Fuente: elaboración propia, 2017.

Listado de detalles según la Tabla 14:

1. Presentada como una alternativa **estratégica de gestión ambiental preventiva de carácter voluntario, pero altamente recomendable**, es la implementación de buenas prácticas ganaderas para el manejo de purines y el seguimiento de los acuerdos de producción limpia ya que la metodología de dosificación de digestato es equivalente. La documentación al respecto se puede encontrar en la figura 24.

Figura 24. Bibliografía de la lista de chequeo presentada en el libro **Manual de manejo y utilización de purines de lechería de Francisco Salazar**

APL.(2008). Acuerdo de Producción Limpia, Productores de Leche Bovina de la Región de Los Ríos. 27p.

BPG. (2003). Comisión Nacional de Buenas Prácticas Agrícolas. Especificaciones Técnicas de Buenas Prácticas Agrícolas, bovinos de lechería. Comisión Nacional de Buenas Prácticas Agrícolas. Fundación de Comunicaciones, capacitación y cultura del agro, FUCOA. 35p.

BLP ZC.(2001). Guía de manejo y buenas prácticas para el sector lechero de la Zona Central, Gobierno de Chile. 23p.

GMP.(2006). Guía de Recomendaciones de Manejo de Purines de Lechería. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile, Superintendencia de Servicios Sanitarios y Federación de Productores de Leche. 7p.

PABCO.(2011). Planteles Animales Bajo Certificación Oficial. Formulario pauta de evaluación anexo lechero. División de Protección Pecuaria, Subdepartamento de Industria y Tecnología Pecuaria, Servicio Agrícola y Ganadero, Chile. 12p.

Fuente: Salazar S., 2012.

2. **Normativa (obligatoria)** relacionada a las **aguas servidas** que se generen en un predio, en ausencia total de sistemas de tratamiento de efluentes que descarguen en aguas superficiales o subterráneas según el código sanitario y los decretos supremos relacionados con esto. **Registro de las plantas de biogás** según el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio

de Energía (2017) de la SEC.

3. **NCh 3381**: Gestión de residuos, plantas de digestión anaeróbica, consideraciones para el diseño y la operación.
4. **NCh 3375**: Digestato, requisitos de calidad.
5. **Evaluar la pertinencia de someterse al SEIA** de cada proyecto, identificando sus impactos ambientales y determinando si el proyecto presenta o genera algunos de los efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley de Bases Generales de Medio Ambiente, en cuyo caso debe presentar un EIA o en caso contrario una DIA. Para más detalle revisar la "Guía para la generación de impacto ambiental de centrales de generación de energía eléctrica con biomasa y biogás¹¹", del Ministerio de Energía y el Servicio de Evaluación Ambiental, 2012.

5.7 OTROS EJEMPLOS DE ESTIMACIÓN DE ESTIÉRCOLES DISPONIBLES

Para completar la información se describen a continuación otros dos ejemplos de productores: *El productor Joaquín tiene 400 vacas, 80 secas y 320 en ordeña, las cuales estabula 6 horas al día, y luego tenemos a Jaime un productor que tiene 600 vacas, 480 en ordeña y 120 secas, pero estabuladas por completo.* Finalmente se resumen en una tabla los tres ejemplos de productores que se usaran a lo largo de esta guía.

Joaquín es un productor que tiene 400 vacas, 80 secas y 320 en ordeña. Las vacas pesan en promedio 500kg y solo se estabulan las que están en ordeña 6 horas al día. ¿Cuánto estiércol disponible tiene Joaquín?. Si cada vaca pesa 500kg y por 100kg de peso vivo produce 7 kg de estiércol al día, significa que cada vaca producirá unos 35 kg de estiércol al día. Como estos animales en ordeña pasan estabulados 6 horas, o sea el 25 % del tiempo, de igual manera solo se tendrá disponible el 25 % del estiércol producido por la vaca, lo que representa 8,75 kg/d. Como Joaquín tiene 320 vacas en ordeña que pasan estabuladas 6 horas, cada día tendrá 2.800 kg de estiércol acumulados en el piso de la lechería, patios de espera y/o de alimentación. Para limpiar sus corrales, Joaquín usa unos 120 litros de agua por vaca y día, lo que significa unos 38,4 m³ de agua, que se mezclan con los 2.800 kg de estiércol para ser conducidos hasta el biodigestor. Joaquín no tiene cubiertos sus patios

¹¹ http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/20121109_bio_terminada.pdf http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/20121109_bio_terminada.pdf

y, para evitar que las aguas lluvia también vayan hacia el biodigestor, ha puesto una caja de registro que sólo abre cuando lava el piso. El resto del tiempo la caja de registro deriva las aguas lluvia hacia las praderas. En el caso de Joaquín, los 2.800 kg de estiércol fresco (2,8 toneladas) contienen 336 kg de ST ($2.800 \times 0,12 = 336$). Si la carga diaria que entrará al biodigestor es de $41,2 \text{ m}^3$ ($38,4 + 2,8 \approx 41,2$) y solo hay 336 kg de ST, esto implica que el % de ST de la mezcla que entra al biodigestor será de 0,82% ST ($336 \times 0,12 / 41.200 = 0,82$). Joaquín conoce el potencial de los biodigestores, y el hecho de introducir uno en su predio le permitiría cumplir la normativa de manejo de residuos a la vez que produciría electricidad con el biogás generado (abaratando el gasto en la factura eléctrica) y disponiendo de digestato para realizar fertirriego en sus praderas, que en las épocas de sequía le va a ayudar a mantener su productividad.

Según se aumenta el número de animales, la infraestructura y el manejo pueden variar, por esto se describe aquí un tercer ejemplo:

Jaime es un productor que tiene 600 vacas, 480 en ordeña y 120 secas. Sus animales pesan en promedio 500 kg. Todas las vacas están estabuladas todo el día y son alimentadas con concentrado y forraje. Si cada vaca produce 35 kg de estiércol al día, en este caso todo su estiércol está disponible ya que los animales están permanentemente estabulados. Jaime dispone de 21.000 kg de estiércol al día. En este caso, los establos de Jaime están techados y recoge en seco el estiércol acumulado en los pisos, utilizando posteriormente muy poca agua para lavarlos. Utiliza unos 6 litros por animal día para el lavado, lo que significa 3.600 litros de agua por día. Al biodigestor, por tanto, considerando el estiércol retirado en seco y el agua de lavado, podrían entrar unos $24,6 \text{ m}^3$ diarios. En este caso la mezcla estiércol y agua tendrán un 10,25 % de ST.

Tabla 16. Tabla comparativa de ejemplos utilizados al largo de esta Guía

Características		Mariela	Joaquín	Jaime
Cantidad de ganado vacuno en el predio		200	400	600
Cantidad de vacas en ordeña		160	320	480
Peso del animal (kg peso vivo)		500	500	500
Tiempo de estabulado (hr/día)		4	6	24
Vacas estabuladas		160	320	600
Estiércol al día (kg/d)	Por animal	35	35	35
	total	928	2.800	21.000
Uso de agua de lavado (L/d)	Por animal	120	120	6
	total	19.200	38.400	3.600
Mezcla total (m ³ /d)		20,1	51,5	24,6
Sólidos totales de la mezcla (%)		0,55%	0,82%	10,24%

Fuente: Salazar S., 2012.

Como podemos ver en la Tabla 15, existen dos datos importantes: la mezcla, que corresponde a la suma del estiércol y agua de lavado (conocido también como purín), y el dato de los sólidos totales, que corresponde a la concentración de sólidos en la mezcla. Entre mayor el número, más concentrado está la mezcla o purín.

El tipo y tamaño de biodigestor depende de la cantidad de sustrato o mezcla (estiércol+agua), de la humedad del sustrato (inversa a lo sólidos totales) y de los objetivos del predio con respecto al biodigestor. Lo primero es escoger el tipo de biodigestor. La Tabla 16 muestra cómo el tipo de lavado influye en el biodigestor, pues cada tipo tiene un principio de funcionamiento y ha sido diseñado para diferentes sistemas productivos.

Tabla 17. Comparativo del tipo de biodigestor a utilizar según las prácticas de lavado en el predio lechero

Tipo de lavado	Estimado mezcla estiércol: agua	% Sólidos totales	Tipo de biodigestor			Requiere separación de sólidos previa.
			Convencional	Mezcla completa	Flujo pistón	
Raspado ("scraped")	N/A	> 11 %			x	No
Raspado, con agua de lavado de la sala de ordeño	1:3 a 1:0	3-11 %	x	x		Sí para el convencional, NO para mezcla completa
Lavado de estiércol de manguera	>1:4	<3 %	x			Sí

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Usando los ejemplos en esta guía, la Tabla 17 muestra el tipo de biodigestor seleccionado para cada caso según sus características.

Tabla 18. Selección de tipo de biodigestor para los ejemplos de esta Guía

Características	Mariela	Joaquín	Jaime
Mezcla total (m ³ /d)	25,2	41,2	24,6
Sólidos totales	0,55%	0,82%	10,24%
Tipo de biodigestor sugerido	Convencional	Convencional	Flujo pistón o mezcla completa

Fuente: elaboración propia, 2017.

Según la tabla anterior, a Mariela le conviene utilizar un biodigestor convencional. Un biodigestor de flujo pistón no funcionará pues requiere de altos contenidos de sólidos, mientras que un biodigestor de mezcla completa está en el rango inferior de operación recomendada; sin embargo, no se descarta hasta hacer un análisis de los tamaños.

Para el caso de **Jaime**, no le conviene utilizar un biodigestor convencional pues no es apto para sustrato con tantos sólidos, pero **la opción de flujo pistón y mezcla completa son opciones interesantes.**

Finalmente, en el caso de **Joaquín**, **le conviene utilizar un biodigestor convencional, lo mismo que a Mariela.** Sin embargo, debido a la cantidad de sustrato disponible por día, no se descarta el biodigestor de mezcla completa hasta que se realice un análisis de tamaños.

Aunque el criterio de selección se basa en lo establecido en la Tabla 16, no se descarta la posibilidad de realizar ajustes en las prácticas del predio como disminuir el consumo de agua para limpieza. Esta es una práctica que, tanto para el caso de **Joaquín** como **Mariela**, abre la posibilidad de evaluar también otros tipos de biodigestor, pues por un lado aumentaría la cantidad de % ST en la mezcla y por otro reduciría el volumen de purines a ser tratados.

6.1 TAMAÑO Y DISEÑO DEL BIODIGESTOR

Estimar el tamaño del biodigestor es una responsabilidad del consultor, técnico, ingeniero o empresa contratada para tal efecto. Existen muchas variables que se deben de tomar en cuenta y no se sugiere que esta guía sea utilizada para dimensionar y construir biodigestores, pero en su defecto que sirva de referencia de la escala del proyecto. Contratar ingeniería puede resultar un ahorro en varios aspectos que podrían pasarse por alto al aventurarse a instalar un biodigestor, pues hay exigencias respecto de la materialidad y diseño de las plantas de biogás en el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017), que se deben considerar.

Las dos variables más importantes en el diseño de un biodigestor son:

1. Carga orgánica volumétrica de alimentación (COVA; OLR por sus siglas en inglés). El COVA define en la práctica la capacidad de un biodigestor de degradar materia orgánica. Sus unidades son kg de sólidos volátiles (SV), por m^3 de biodigestor y día. Dicho de otra forma, mide la eficiencia del tamaño del biodigestor para degradar estiércol. Responde a la pregunta de ¿cuánto estiércol se puede tratar por m^3 de biodigestor? A mayor COVA el biodigestor tiene una mayor capacidad para degradar más kilogramos de materia orgánica por cada m^3 de biodigestor al día. Para lograr un mayor COVA, se debe incrementar el nivel tecnológico del biodigestor.

Por ejemplo, un biodigestor convencional sin calefacción deberá operar con un COVA de $0,1 \text{ kg SV}/m^3/d$, mientras que un biodigestor de mezcla completa en condiciones mesofílicas (calentado) puede operar con un COVA de hasta $4 \text{ kg SV}/m^3.d$. Esta diferencia representa un biodigestor convencional 40 veces más grande que el de mezcla completa para lograr un mismo tratamiento.

Un biodigestor alimentado a una tasa mayor al COVA con el cual trabaja, puede causar que el sustrato no sea degradado adecuadamente. Los sustratos altamente fermentables (residuos de cosecha, sueros lácteos) que potencialmente pueden ser mezclados con el estiércol, pueden causar acidificación en el biodigestor y la consecuente disminución en la producción de biogás.

2. Tiempo de retención hidráulico (TRH). El TRH es el tiempo promedio medido en días que tarda la mezcla (estiércol mezclado con agua) en salir del biodigestor desde que entró. Aritméticamente es la división entre el volumen líquido del biodigestor (VL) y el caudal o mezcla alimentado diariamente (m^3/d) o sea ($VL/m^3/d = d$). Se debe recordar que en el interior del biodigestor se encuentran los consorcios de bacterias que realizan la digestión anaerobia y estos tardan (dependiendo de la temperatura del biodigestor) de 5 a 20 días para su reproducción. Por lo que un biodigestor operando con un TRH bajo puede causar el lavado de bacterias, lo que significa que la población de bacterias disminuirá porque se pierden más en el digestato de las que se reponen por la

reproducción en su interior. En la práctica, se asigna un TRH superior al mínimo, de 20 a 30 días para sistemas mesofílicos (temperaturas de 37° C) y hasta 40 a 100 días para sistemas psicrófilicos (temperaturas de 5-25° C). Por lo tanto, para **dimensionar el biodigestor** se deben considerar las dos variables anteriormente mencionadas. Para esto se definen los siguientes pasos:

1) Determinar la carga orgánica del proyecto: con la cantidad de estiércol, se puede realizar una estimación de la carga orgánica (sólidos volátiles), aunque es recomendable hacerlo con una muestra real enviada a laboratorio, para contar con datos reales y diseños adecuados.

Se utiliza la siguiente ecuación:

Carga orgánica (kgSV)= mezcla (m³/d) x materia seca (%ST) x sólidos volátiles (%SV). Para los ejemplos de esta guía, se resumen en la tabla.

Tabla 19. Resumen de resultados de la determinación de la carga orgánica seca, o sólidos volátiles de cada proyecto usados de ejemplo en esta guía

Características	Mariela*	Joaquín	Jaime
Mezcla total (m ³ /d)	20,1	41,2	24,6
Sólidos totales de la mezcla (%)	0,55	0,82	10,24
Sólidos volátiles (%bs)	85	85	85
Sólidos volátiles (kg/d)	94,7	336	2.142

Fuente: elaboración propia, 2017.

*Ejemplo de la aritmética para el ejemplo de Mariela:

Carga orgánica (kgSV)= mezcla (m³/d) x materia seca (%ST) x sólidos volátiles (%SV) 94,7 kg SV/d = 20,1 m³/d x 1.000 kg/m³ x 0,55 %ST x 85 %SV

2) Realizar el cálculo del tamaño del biodigestor usando COVA: el siguiente paso es dimensionar el biodigestor (según el tipo seleccionado) utilizando la carga orgánica del proyecto calculado en el paso anterior y el COVA del biodigestor. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen de biodigestor} = \text{carga orgánica} / \text{COVA}_{\text{biodigestor}}$$

El COVA del biodigestor a utilizar, se puede conseguir de la Tabla 2. Es importante mencionar que la tabla otorga rangos de COVA del biodigestor, pero se debe considerar también el factor temperatura. Por ejemplo, si el biodigestor no es calentado y se está considerando usar uno convencional, entonces se debe usar un COVA del biodigestor medio-bajo del rango sugerido en la Tabla 2, por ejemplo 0,2 kgSV/m³.d.

3) Revisar el tiempo de retención hidráulico (TRH): una vez dimensionado el biodigestor, se debe asegurar que, con el volumen calculado y el caudal propio del predio, el TRH se vaya a mantener en el rango, acorde a lo mínimo necesario según el tipo de biodigestor y temperatura en el que operará, para evitar el lavado de bacterias. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de retención hidráulica (d)} = \frac{\text{volumen del biodigestor (m}^3\text{)}}{\text{caudal o mezcla (m}^3\text{/d)}}$$

La tabla 19 muestra un resumen de los resultados para los ejemplos de esta guía del cálculo del tamaño del biodigestor, a partir del COVA y el TRH, mostrando la corrección del cálculo del tamaño del sistema, cuando sea necesario.

Tabla 20. Resumen de parámetros y decisiones para el dimensionamiento

Características	Mariela*	Joaquín	Jaime
Mezcla total (m ³ /d)	20,1	41,2	24,6
Sólidos volátiles (kg/d)	94,7	336	2.142
Tipo de biodigestor sugerido	Convencional	Convencional o mezcla completa	Flujo pistón o mezcla completa
COVA.seleccionado (kg SV/m ³ d)	0,2	0,2	3
Tamaño biodigestor (m ³)	473	1.680	714
TRH.calculado (días)	23,5	40,8	29
¿Requiere corrección?	sí	no	no
TRH.min	40	40	N/A
Tamaño biodigestor final (m ³)	805	1.680	714

Fuente: elaboración propia, 2017.

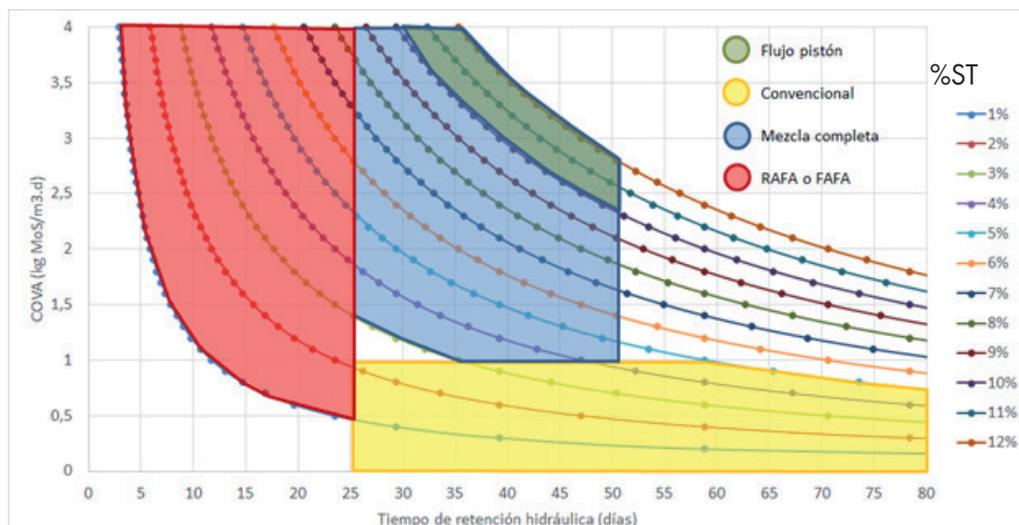
*Ejemplo de Mariela en detalle: Tamaño de biodigestor (Mariela): Tiene 94,7 kg de sólidos volátiles al día y utilizará un biodigestor convencional en un clima frío ($COVA=0,2 \text{ kgSV/m}^3\text{d}$). Por tanto, $94,7 \text{ kgSV/d} \div 0,2 \text{ kgSV/m}^3\text{d} = 473 \text{ m}^3$ de biodigestor.

Corrección de TRH: Utilizará un biodigestor convencional de 473 m^3 y su caudal es de $20,1 \text{ m}^3/\text{d}$. Por tanto, su TRH es $473 \text{ m}^3/20,1 \text{ m}^3/\text{d} = 23,5$ días. Esto corresponde a muy pocos días de TRH necesario para operar en clima frío, por lo que será necesario hacer una corrección a 40 días. Por lo tanto, $20,1 \text{ m}^3/\text{d} \times 40$ días sugeridos equivalen a un biodigestor de 805 m^3 de capacidad, en lugar de 473 m^3 .

La Figura 25 muestra una gráfica que correlaciona el TRH y el COVA con el contenido de sólidos totales en el sustrato. El área azul corresponde a las situaciones donde únicamente aplica un biodigestor de mezcla completa, mientras que el verde es donde aplica únicamente un biodigestor de flujo pistón. El amarillo es donde aplica un biodigestor convencional y el rojo es donde el predio debe considerar cambiar sus prácticas de lavado o bien el uso de otra tecnología no mencionada en esta guía.

Para el uso de la gráfica, es necesario ubicar la línea que corresponde al predio basado en el % de sólidos totales del sustrato que se dispone. Por ejemplo, el predio de Jaime tiene un contenido de sólidos totales de 10%, pues este no realiza lavados intensos. Vemos que la columna del 10% solo interseca con el área para un biodigestor de flujo pistón o bien de mezcla completa. También se ve como la columna del 10% de ST entra en la región del flujo pistón y el de mezcla completa en el rango de un COVA mínimo de $2,2 \text{ kg SV/m}^3/\text{d}$ hasta $4 \text{ kg SV/m}^3/\text{d}$. Utilizar un COVA inferior a estos valores implicará que el biodigestor será más grande y por lo tanto no rentable. Si logramos, tecnológicamente, que el biodigestor opere a temperaturas mesofílicas, es probable que pueda trabajar con un COVA cercano a $4 \text{ kg SV/m}^3/\text{d}$ y así reducir su tamaño considerablemente.

Figura 25. Gráfica para determinar el tipo de biodigestor apto según el contenido de sólidos totales en la mezcla (asume 85%(bs) de SV)



Fuente: elaboración propia, 2017.

Como se observa con los ejemplos de [Mariela](#), [Joaquín](#) y [Jaime](#), se nota que tanto Mariela como Joaquín, deberán construir biodigestores relativamente grandes, con largos periodos de retención hidráulica para compensar las bajas temperaturas, y así ahorrar la inversión en el sistema de calefacción y aislamiento térmico.

Seguido a este análisis, junto con el consultor o empresa experta en biodigestores, se deben considerar alternativas que existen para lograr un biodigestor más pequeño, de menor inversión, de la misma eficiencia. Por ejemplo, para el caso de [Mariela](#), ella puede fácilmente empezar por controlar el consumo de agua para limpieza y lograr que su sustrato (estiércol + agua) llegue a un contenido de sólidos totales de 1%; esto significa reducir su consumo de agua en casi un 50%. Esto le permitiría reducir su caudal de agua de 19,2 m³/d a 9,6 m³/d. Siguiendo la secuencia de cálculo mostrada anteriormente, Mariela ocuparía ahora un biodigestor de 421,1 m³, en lugar de 805 m³ (reducción en un 47% de tamaño). Esto es posible únicamente al reducir el consumo de agua de lavado.

De forma alternativa, para el caso de Jaime, se podría también considerar la posibilidad de usar un biodigestor de flujo pistón en lugar de uno de mezcla completa, dado que el nivel tecnológico requerido para el primero es menor y por lo tanto su costo de inversión y operación también lo será. Se recomienda realizar siempre un análisis con mayor detalle para asegurar que el tipo y tamaño de biodigestor ha sido seleccionado y dimensionado adecuadamente (estudios de factibilidad).

Buenas prácticas de lavado

Para Mariela, disminuir el uso de agua de lavado en 50 %, reduce el volumen de su biodigestor en 47 % (de 805 m³ a 421,1 m³)

La decisión final sobre el tipo y tamaño del biodigestor, **no puede ser una receta** y debe realizarse un análisis completo, donde se involucra el predio y su visión a largo plazo, más los conocimientos técnicos del diseñador. Adicionalmente se deben considerar factores de riesgo adecuados al nivel freático del terreno, la textura del suelo y limitantes para su construcción; límites y lindes de la propiedad, además de la separación de sólidos y el manejo que este representa, como también aspectos legales, financieros y de capacidades técnicas.

6.2 ¿CÓMO APROVECHAR LOS PRODUCTOS DEL BIODIGESTOR, EN NUESTROS EJEMPLOS?

6.2.1 USANDO EL BIOGÁS (CASOS DE ESTUDIO)

La cantidad de biogás que se puede generar depende de la cantidad de materia orgánica biodegradable de la que se alimente el biodigestor. No es tanto una relación del tipo de biodigestor, sino más bien del sustrato con el que se alimenta. Cada sustrato tiene un rendimiento potencial de metano o biogás, que corresponde a la cantidad que ese sustrato en particular es capaz de producir bajo condiciones de laboratorio. El estiércol de ganado es de los sustratos con menor rendimiento de biogás, y como referencia conservadora para esta guía se considera 0,2 m³ de biogás/kgSV).

Para estimar la cantidad de biogás que se generará se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Biogás (m}^3/\text{d)} = \text{Carga orgánica (kg SV/d)} \times \text{rendimiento (m}^3 \text{ de biogás/kgSV)}$$

Los ejemplos de esta guía, son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 21. Resumen de los resultados obtenidos del cálculo de producción estimada de biogás para los ejemplos de esta guía

Características	Mariela*	Joaquín	Jaime
Cantidad de ganado vacuno en el predio	200	400	600
Cantidad de vacas en ordeña	160	320	480
Tiempo de estabulado (hr/día)	4	6	24
Vacas estabuladas	160	320	600
Sólidos volátiles (kg/d)	94,7	336	2.142
Tipo de biodigestor sugerido	Convencional	Convencional o mezcla completa	Flujo pistón o mezcla completa
Tamaño biodigestor final (m ³)	805	1.680	714
Rendimiento de biogás (m ³ biogas/kg SV)	0,2		
Biogás (m ³ /d)	18,9	67,2	428,4
Biogas por vaca en ordeña (l/d)	118,3	210	892,5

Fuente: elaboración propia, 2017.

* Ejemplo de Mariela: (con 200 vacas, 160 de ellas en producción) Tiene 94,7kg de sólidos volátiles x 0,2 m³ de biogás/kgSV = 18,9 m³ de biogás/d.

Una vez cuantificada la cantidad de biogás a generarse, se procede a hacer un análisis de las formas en que el biogás puede ser aprovechado. La Tabla 21 muestra un resumen de los consumos de biogás de las diferentes aplicaciones para el sector lechero en Chile.

Tabla 22. Consumo de biogás de diferentes aplicaciones a biogás

Tipo de uso	Aplicación de biogás	Equipo (ejemplo)	Consumo de biogás (m ³ /hr)
Térmico	Caldera de vapor ¹ (Con 60% eficiencia)	Caldera de 20 BHP*	5
		Caldera de 50 BHP*	12
		Caldera de 100 BHP*	24
	Calefont de agua ¹	Tanque Lorenzetti (26 KW)	5
	Cocción (Cocina) ¹		0,40
Mecánico	Ordeña ²	Motor de 13 HP	2 - 3
	Picado de pasto ²	Motor de 14 HP	4
	Bombeo de digestato ¹	Bomba con motor de 3.5 HP	1,5 - 2
Eléctrico	Generación eléctrica ¹	5 a 20 KW	1,66 m ³ /kWh
		20 a 275 kW	0,66 m ³ /kWh
		> 275 kW	0,47 m ³ /kWh

* BHP: Caballos de fuerza de caldera (Boiler horse power).

Fuente: ¹. elaboración propia; ² SNV, 2017.

Jaime tiene 428,4 m³ de biogás que podría ser utilizado, por ejemplo, para la generación eléctrica. Para su tamaño de predio, su consumo mensual de energía ronda los 20.000 kWh. Con su biogás es probable que tenga la posibilidad de generar cerca de 19.300 kWh por mes, logrando ahorrar, dependiendo del tipo de tarifa, entre un 50-96% de su pago mensual por consumo eléctrico. Muchos agricultores tienen tarifa BT1¹², esto quiere decir que ahorrarían un 50% del valor de la factura si inyectan energía al sistema bajo la ley de generación distribuida. El tamaño de generador a utilizar deberá ser una decisión conjunta del productor y el proveedor, para asegurar que este no es sobredimensionado o subdimensionado, aunque ajustado a la cantidad de biogás disponible y equipos a operar.

¹² La BT1 es una tarifa monómica donde en el mismo valor se considera el cobro por energía y los cargos fijos por concepto de uso del sistema troncal, lectura de medidores, facturación, etc. Esto no ocurre con otras tarifas donde los cargos fijos y el cargo por consumo de energía están separados, siendo importante hacer un análisis detallado de los posibles ahorros e ingresos por venta de electricidad en función de la tarifa contratada (BT1, BT2, AT1 y AT2) y el perfil de consumo de cada caso.

Mariela en el otro extremo tiene únicamente 18,9 m³ de biogás por día. Sus operaciones consumen cerca de 5.000 kWh por mes y el biogás tendría que convertirse potencialmente en 850,5 kWh/mes o sea un 17% de su consumo eléctrico actual. Subjetivamente, sin respaldo de un análisis financiero, se puede presumir que no le será atractivo convertir su biogás en energía eléctrica, y será más eficiente su uso térmico o mecánico, pues estos dos últimos tienen un costo de implementación y operación mucho menor. Por ejemplo, Mariela podría considerar operar sus 4 horas de ordeña utilizando la bomba de vacío con un motor de 15 HP; para esto requiere de aproximadamente 12 m³ de biogás. Le estaría sobrando unos 6,9 m³ los que pueden utilizarse para bombeo de digestato (3,5 HP) dos horas al día consumiendo unos 4 m³ de biogás, y aun así le sobrarían 2,9 m³ de biogás al día, que podría dedicar para cocinar en la casa u oficinas (unos 1,5 m³/d) o alternativamente calentar agua para lavado de enseres de ordeña y limpieza.

Como se muestra en los ejemplos, una correcta estimación de la cantidad de biogás potencial es clave. El uso debe responder a una necesidad técnica existente, que tenga un buen balance financiero, el que debe acompañarse de un análisis de escenarios y evaluaciones técnicas y de contexto, para asegurar que el tipo y tamaño de biodigestor corresponde al uso que se le dará al biogás, con el fin de disminuir riesgos. Es preferible que el equipo que utilice el biogás esté fabricado para este propósito y que idealmente sea distribuido de forma local, con servicio técnico y repuestos disponibles.

En general en Chile los proyectos implementados hoy en día han traído equipos de Europa, cumpliendo con normativa y estándares de calidad que ofrecen garantía, atención al cliente, etc. Sin embargo, los productos chinos han mejorado sus estándares según opiniones de los propios implementadores.

6.2.2 USANDO EL DIGESTATO (CASOS DE ESTUDIO)

Los biodigestores producen una cantidad de digestato diariamente similar a la mezcla que se carga cada día al biodigestor. Como ya se ha comentado, las cantidades de NPK presente en el estiércol fresco se mantienen en el digestato, pero en concentraciones más diluidas (por la mezcla con agua de la carga) y en forma mineralizada (directamente asimilable por la planta).

En mercados en donde el digestato no es un producto en demanda, se ha intentado introducir a partir de su uso por productores que no cuentan con él, a partir del retiro del digestato a modo de “muestra gratis” de digestato por partes productores. Para su propia apreciación y valoración de resultados y rendimientos, sobre todo tras un par de temporadas de cosecha.

Tabla 23. Resumen de estimaciones preliminares para los ejemplos de esta Guía, en relación a la cantidad de nutrientes que podría generar el digestato

Características	Mariela**	Joaquín	Jaime
Cantidad de vacas en ordeña	160	320	480
Mezcla total (m ³ /d) ó (ton/d)	20,1	41,2	24,6
Tipo de biodigestor sugerido	Convencional	Convencional o mezcla completa	Flujo pistón o mezcla completa
% sólido del digestato	0,36%	0,36%	4,00%
Nitrógeno total (%bs)*	8,60%	8,60%	8,60%
Fósforo total (%bs)*	3,10%	3,10%	3,10%
Potasio total (%bs)*	8,10%	8,10%	8,10%
Cantidad de bio-fertilizante (m ³ /d)	20,1	41,2	24,6
Nitrógeno total (ton/año)	2,3	4,7	30,9
Fósforo total (ton/año)	0,8	1,7	11,1
Potasio total (ton/año)	2,1	4,4	29,1

Fuente: elaboración propia, 2017.

* Calculado de la información en la Tabla 8. Se refiere al % de nutrientes expresado en base seca.

** Ejemplo de Mariela para nitrógeno: Si Mariela alimenta 20,1 m³/d de mezcla al biodigestor, producirá también los mismos 20,1 m³/d de digestato. Este digestato, tiene 0,36% de ST (según datos de la Tabla 8) y 8,6% de nitrógeno, y por tanto la cantidad de nitrógeno que puede conseguir Mariela de su biodigestor sería:

$$20,1 \text{ m}^3/\text{d} \times 1.000 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 0,36\% \text{ ST} \times 8,6\% \text{ N (bs)} \times 365 \text{ días}/\text{año} \div 1.000 \text{ kg}/\text{ton} = 2,3 \text{ ton N}/\text{año}.$$

Cuando el digestato es usado en el propio predio, se puede aplicar de diversas formas: uso directo en todo tipo de cultivos y mejoramiento de suelos, reemplazo a la quema de rastrojos, almacenamiento, compostaje y/o complemento con venta del mismo en seco.

Según la norma chilena de calidad, NCh3375:2015 Digestato - Requisitos que aplica en caso de **autoabastecimiento**, las exigencias equivalentes serán las que se tienen con el uso de los purines, en que el valor de **DBO₅ máximo es de 250 mg O₂/L** (El digestato está más próximo a un purín que a un agua residual en cuanto a su contenido). En estos casos se hará necesario un tratamiento secundario.

Un análisis del digestato producido, para determinar la cantidad de nutriente disponible (NPK principalmente), ayuda a conocer las equivalencias entre cada m³ de digestato y kilogramos de NPK, y poder comparar con los fertilizantes nitrogenados. Cabe mencionar que el digestato tiene una consistencia mucho más manejable que los purines, ya que tras su paso por un biodigestor se homogeniza su textura y lo hace bastante más ligero. Las formas de aplicación son variadas, según la necesidad se puede utilizar aspersion, directo al suelo, o en fertirrigación. Los cálculos de cuanto utilizar y las épocas de aprovechamiento son equivalentes a las que se utilizan para los purines, tal y como se mencionan en la guía de Francisco Salazar "Manual de manejo y utilización de purines de lechería 2012".

Vale la pena mencionar que los purines digeridos de vacunos no tienen altos valores de conductividad eléctrica (indicador de la salinidad) como lo son los de cerdo, por lo tanto los riesgos ambientales asociados a su utilización, disminuyen. La conductividad eléctrica de los suelos y/o del agua de riego afecta negativamente

a los cultivos que se quieran desarrollar, haciendo el agua “no disponible” para su consumo por parte de las raíces de las plantas. Por otro lado el suelo produce costras superficiales, perdiendo su estructura y afectando el crecimiento de los cultivos.

Otra de las oportunidades de uso del digestato es el eventual **reemplazo de quema de rastrojos** (por ejemplo, de avena, trigo o arroz), ya que éste acelera la descomposición de éstos en el suelo, obteniéndose variadas ventajas (Varnero, 2016):

- Evitar la pérdida de 1/3 de las necesidades de fertilizantes de los cultivos (en el caso del trigo).
- Disminuye la conductividad eléctrica.
- Permitiría el uso de hasta 20 m³/ha por temporada.
- Evita emisiones de gases de efecto invernadero, de dioxinas y furanos, como también de material particulado, contaminantes que tienen efectos nocivos en el hombre y animales.
- El rastrojo de cereales degradado por procesos biológicos mejora significativamente las propiedades físicas y químicas del suelo, no siendo tóxico para la germinación y establecimiento de nuevos cultivos
- Esta metodología hace viable y factible evitar el uso del fuego en la quema de rastrojos, la cual degrada el suelo al existir pérdida de materia vegetal, humus y microorganismos benéficos

Es por todas estas razones recomendable tener un lugar de **acopio del digestato** que sea protegido del agua, diseñado mínimamente con un volumen de acopio que evite el escurrimiento, especialmente durante los meses en que no será utilizado. En Chile se les llama pozo secundario o de emergencia. A modo de referencia, en Nueva Zelanda se debe poder almacenar los purines producidos durante al menos dos días, y en regiones lluviosas, con precipitaciones mayores a 1.200 mm anuales, los agricultores deben tener pozos de acopio de por lo menos 2 meses. En ese país, el digestato puede ser aplicado en los cultivos a un ritmo equivalente de 150 a 200 kgN/ha/año (Leal, 2008). En nuestro país, de acuerdo al Manual INIA y Ministerio de Agricultura 2012 (Consortio Lechero, 2012), se recomienda tener la capacidad de almacenar de 3 a 4 meses de producción de

purines. Siendo el máximo permitido 300 kgN/ha/año, distribuido en otoño, primavera y verano. Todas las consideraciones recomendadas en el "Manual de manejo y utilización de purines de Lechería" deberían ser consideradas, con el objetivo de limitar al máximo la dilución de purines y/o sustrato y de esta manera limitar el tamaño del pozo de almacenamiento, ya sea de purines o de digestato.

En el caso de Mariela, que cada día estaría recuperando 6,2 kg de N diluidos en 20,1 m³ de digestato, implica que al año estaría en capacidad de reciclar 2.300 kg de N. Siguiendo la recomendación de Nueva Zelanda de 200 kg N/ha/año, Mariela podría disponer su digestato en cerca de 11,4 hectáreas de pastos propios. Jaime podría fertilizar con sus 84,65 kg N al día contenidos en el digestato unas 154,5 hectáreas al año, y Joaquín en torno a 23,5 hectáreas al año.

Otra alternativa es usar el digestato en **procesos de compostaje** para su uso postergado en el tiempo, y/o como mejorador de suelos, a aplicarse en las épocas más adecuadas para ello. En este caso su mezcla con material verde de poda es idónea.

Para poder comercializar el digestato, hará falta tomar unas muestras para su análisis de laboratorio cada 6 meses o 6.000 metros cúbicos de producción de digestato, y seguir las pautas de análisis que dicta la normativa (NCh 3375), además de las exigencia o requisitos del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) respecto a la comercialización de fertilizantes orgánicos. En el caso de estudio, Mariela tendría que tomar muestras cada 8 meses aproximadamente para mantener su producto actualizado y poder venderlo según requiere la NCh3375.

Los requisitos físicos y químicos y los valores permitidos para poder comercializar el producto son los siguientes:

- √ **Grado de fermentación:** ácidos orgánicos totales por debajo de 4.000 mg/l (en ácido acético equivalente).
- √ **Materia orgánica:** el digestato líquido debe contener al menos un 40% en base a materia seca, y el digestato sólido un 30%.

- ✓ **Germinación de malezas:** no deben germinar más de 2 propágalos de malezas por litro de digestato.
- ✓ **Materias extrañas:** no más de un 0,5% en peso de materia seca de impurezas del tipo vidrio, plástico, metal, u otros.

Adicionalmente se deben informar los siguientes parámetros, en una **ficha técnica**:

- ✓ Origen de la materia prima.
- ✓ Densidad aparente.
- ✓ Masa o volumen total de la partida.
- ✓ Contenido de nutrientes (N, P₂O₅, K₂O, MgO, S).
- ✓ pH.
- ✓ Conductividad eléctrica.
- ✓ Nitrógeno disponible (N-NH₄, N-NO₃).
- ✓ Relación carbono:nitrógeno.
- ✓ Sustancias activas (CaO).
- ✓ Materia orgánica total.
- ✓ Rango o valor de humedad.
- ✓ Presencia de impurezas.
- ✓ Recomendaciones adicionales de uso, formas de aplicación, prohibiciones y restricciones.
- ✓ Rotulado del producto.

Finalmente, se requiere de un registro relacionado al productor del digestato: número de resolución de autorización de la planta de biogás, identificación de la partida, masa o volumen total y origen de la materia prima; el que se podrá comercializar a granel o en dosificaciones más pequeñas.

Cabe mencionar que todo tipo de materias primas que no sean purines deben ser higienizadas previa utilización en un biodigestor, por ejemplo: canales y partes de animales sacrificados, subproductos cárnicos, sangre (sin signos de enfermedad transmisible), huesos, placenta, animales acuáticos, e invertebrados acuáticos y terrestres, etc.

6.2.3 TRATANDO LOS RESIDUOS (CASOS DE ESTUDIO)

Los residuos agropecuarios son en muchas ocasiones un problema de contaminación si es que no se tratan o aprovechan adecuadamente, ya que su acumulación puede suponer un criadero de moscas e insectos, sus lixiviados contaminar suelos y aguas subterráneas, y su vertido o escorrentía hacia cuerpos de agua, la eutrofización de éstos. El biodigestor es un buen sistema de tratamiento de residuos de purines lecheros, ya que estabiliza los componentes orgánicos (en la práctica reduce el DBO_5 y DQO), y además mineraliza los nutrientes presentes en los purines. Pero puede suceder que se genere una cantidad de digestato que no se aproveche, ya sea en la época de lluvias o por la carencia de pastizales. En este caso, si el digestato no es aplicado en los cultivos propios o de vecinos, y si no es vendido, es necesario darle un post tratamiento aeróbico antes de poderlo verter a los cuerpos de agua sin riesgos ambientales.

El digestato, producido en un biodigestor trabajando a altos valores de eficiencia, debería alcanzar valores de pH neutro que cumplen la normativa de vertidos, pero no siempre se alcanzan los valores de NPK o los de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5 , de 35 a 300 mg/l); es por lo tanto siempre importante hacer un análisis de laboratorio que lo certifique. De este modo puede ser necesario un post tratamiento, realizado a través de piscinas artificiales. Las piscinas artificiales (Figura 27) son estanques impermeabilizados donde las bacterias aeróbicas (diferentes a las que hay dentro del biodigestor) y la amplia gama de microorganismos que se desarrollan en el interfaz agua-raíces (de plantas como en la Figura 26), siguen “trabajando” el digestato que ingresa para mejorar su estabilidad.

Figura 26. Lentejilla de agua, esparganio y enea (*Lemna minor*; *Sparganium erectum* L. ssp. *Neglectum*, *Typha latifolia*); plantas utilizadas en piscinas artificiales



Fuente: Jardín Botánico Atlántico Gijón, 2017.

Figura 27. Sistema de post - tratamiento a partir de lirios acuáticos en biodigestor de tratamiento de aguas residuales, Nicaragua



Fuente: elaboración propia, 2012.

La rentabilidad de un proyecto determina si la inversión del biodigestor puede recuperarse con el tiempo gracias a los beneficios económicos que ha generado el mismo. Existe una diferencia clara entre a) proyectos en los que la implementación de un biodigestor representa una solución ambiental y/o legal al problema del manejo de purines y b) proyectos donde el biodigestor se hizo desde una perspectiva meramente financiera/energética.

En el primer caso la rentabilidad del biodigestor está sujeta a un valor intangible como el cumplimiento de leyes ambientales, que podría estar relacionado a evitar multas o disminuir el costo de tratamiento de riles en caso de ser necesario o incluso el cierre de la actividad lechera y por lo tanto, el ingreso o ahorro por uso o venta de energía pasa a un segundo plano. Existen herramientas financieras para valorizar estos ingresos intangibles, pero para efectos de esta guía no serán mencionados pues su uso es de carácter más académico que práctico.

En la práctica, con evitar que el predio deba cerrar sus operaciones gracias a que el biodigestor le ofreció una solución al manejo del estiércol, representa una rentabilidad suficiente y justificable. Esta es la situación más común en sistemas de tratamiento de purines de ganado bovino, ya que este sustrato ofrece un bajo potencial metanogénico.

Para los proyectos con una mirada financiera, la siguiente sección pretende dar una guía de cómo visualizar un análisis para una planta de biogás o un biodigestor, pues esta rentabilidad no es la misma para cada proyecto, ya que cada uno tiene sus peculiaridades técnicas que, aunque usando el mismo biodigestor, puede tener rentabilidades distintas.

7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

El análisis económico y financiero recae en juntar todas las variables para luego exponerlas a un cálculo de indicadores financieros (Sección 7.2) los que determinarán si un proyecto es o no rentable.

Para empezar con un análisis financiero, se deben tener en cuenta tres grandes categorías de información, por un lado: a) el costo de inversión del proyecto, b) los gastos que implica operar y mantener este biodigestor y c) los ingresos percibidos por la implementación del biodigestor (digestato/ahorro en fertilizantes y biogás principalmente). A continuación, se detalla cada una de estas categorías.

7.1.1 COSTO DE INVERSIÓN (CAPEX)

El costo de inversión de la planta de biogás es la sumatoria de todos los egresos relacionados a la preparación del predio para la implementación de un biodigestor, la compra de maquinaria y equipos, obras civiles, servicios ingenieriles u otros, relacionados a poner en marcha el biodigestor, el manejo del digestato y el aprovechamiento del biogás, además de cualquier otro costo relacionado a inversión fija.

El costo dependerá del tipo y tamaño de biodigestor, además de la forma de utilizar el biogás y disponer del digestato. Los costos de inversión en un digestor estarán principalmente relacionados a:

- **Manipulación y pretratamiento del sustrato:** el estiércol, para un biodigestor convencional como una laguna cubierta, requiere de separación de sólidos fibrosos previa a la entrada de la mezcla (estiércol más agua) al biodigestor. En el biodigestor de flujo pistón, el estiércol es usualmente alimentado con un sistema hidráulico, sin necesidad de separación de sólidos. Los costos relacionados con la preparación de sustrato, sea la separación de sólidos, picado e incorporación, pozos de bombeo, conducción de líquidos, o el mezclado con otros sustratos como el suero, representan los costos de este componente. Se incluyen materiales y equipos como separadores de sólidos (tornillos sinfín, unidades centrifugas, etc.), bombas sumergibles, infraestructura civil para almacenar y manejar el sólido separador, entre otros. Todos estos equipos se encuentran disponibles en el país.
- **Movimiento de tierra y preparaciones del terreno:** el movimiento de tierra representa la formación de terrazas, el establecimiento de un cimiento sólido y la excavación de la fosa, en caso de no poder adaptar estructuras ya

existentes. Dependiendo de la textura y estructura del suelo y otras características como condiciones de nivel freático o pedregosidad se podrá estimar cuánto representa este costo. Se incluyen materiales y arriendo de equipos y maquinaria para excavar y mover tierra, equipo de compactación, agua, servicios topográficos, entre otros. Adicional a este costo, se deberá incorporar en la inversión los trabajos asociados a la adaptación y mejoramiento de la estructura relacionada a evitar la entrada de aguas lluvia a los biodigestores.

- **Biodigestor:** Este es el tanque donde se llevará la fermentación del estiércol (sustrato) para su conversión a biogás y digestato. Su tamaño se extrae del capítulo ó ¿Qué tipo de biodigestor elegir y qué tamaño? Dependiendo del tipo de biodigestor, los costos pueden ser por ejemplo de la geomembrana y su instalación para un biodigestor de laguna cubierta, mientras que para un biodigestor de mezcla completa será un tanque por encima del suelo en concreto reforzado o planchas de metal tipo silo. Puede considerar sistema de calefacción, aislamiento, sistema de agitación, cúpula de biogás, tubería de sustrato/biogás, desulfurización biológica, deshidratación del biogás, instrumentación y equipos de control/seguridad, detector de fugas, etc.

- **Almacenamiento y manipulación del digestato:** El digestato, según la regulación (voluntaria) chilena (NCh3375), requiere de almacenarse como mínimo 3 a 4 meses durante el invierno. Por tanto, el costo referido para la manipulación incluye aspectos como lagunas o tanques de acumulación por determinado periodo. La forma de disponer del digestato, sea para autoconsumo (con sistema de fertirriego) o tratamiento y acondicionamiento para su comercialización o exportación del campo, debe ser sumado en esta categoría. Se incluyen materiales y equipos como sistemas de riego, bombas de riego, materiales para la construcción de tanques de almacenamiento, incluso unidades de separación de sólidos para biodigestores de flujo pistón y mezcla completa.

- **Seguridad, disposición y uso del biogás:** este ítem incluye diseño del trazado, trampas de condensado, equipos para su conversión en energía aprovechable, llámese generadores eléctricos, motores estacionarios, modificaciones y adaptaciones, son consideradas en este rubro. El acondicionamiento del biogás,

con tecnologías como micro aireación y filtrado químico o físico de compuestos como el sulfuro de hidrógeno deben ser considerados, se debe cuidar la elección de materiales, los cuales están descritos en el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017). El excedente de biogás, tras su uso habitual o esperado, debe quemarse en antorchas para biogás, las que deben ser instaladas obligatoriamente en todas las escalas, excepto en biogás domiciliario. Para este fin no se hace obligatorio limpiar el biogás del H_2S .

Las tuberías de biogás que deban ir enterradas y/o poseer cámaras de registro deben ser de color amarillo, con la palabra "biogás" y una flecha que indique la dirección del biogás dentro de ella. La profundidad mínima es de 30 cm bajo el nivel de la superficie. Existe una serie de consideraciones en el reglamento que deberán revisarse en mayor detalle; cómo por ejemplo el cruce y paralelismo con canalizaciones eléctricas deberá cumplir con al menos 30 cm de distancia entre ellos; y las indicaciones relacionadas a la inflamabilidad y toxicidad del biogás, "se prohíbe fumar", es una leyenda que debe quedar visible en una planta de biogás.

En cuanto a la seguridad, es imprescindible contar con detectores de fugas de metano en la parte superior de las salas de máquina, y fugas de ácido sulfhídrico en su parte inferior.

Otros rubros pueden ser el cogenerador (generador combinado de calor y electricidad) y su interconexión para autoconsumo o conexión y venta de excedentes al SIC, intercambiador de calor, distribución de calor, enfriamiento de emergencia, sistema de control, líneas de biogás, instrumentación y equipos de seguridad, sensores, separador de condensados (purgas de agua), sistema de compresión de aire y desulfurización adicional.

• **Planeación, ingeniería y aspectos legales:** por último, el dimensionamiento, diseño y asesoramiento para la construcción y puesta en marcha del biodigestor son servicios para la planeación e ingeniería que deben ser considerados en el proyecto y se recomiendan. Dependiendo de la escala del biodigestor, se deben considerar costos de ingeniería civil o de construcción, servicios topográficos,

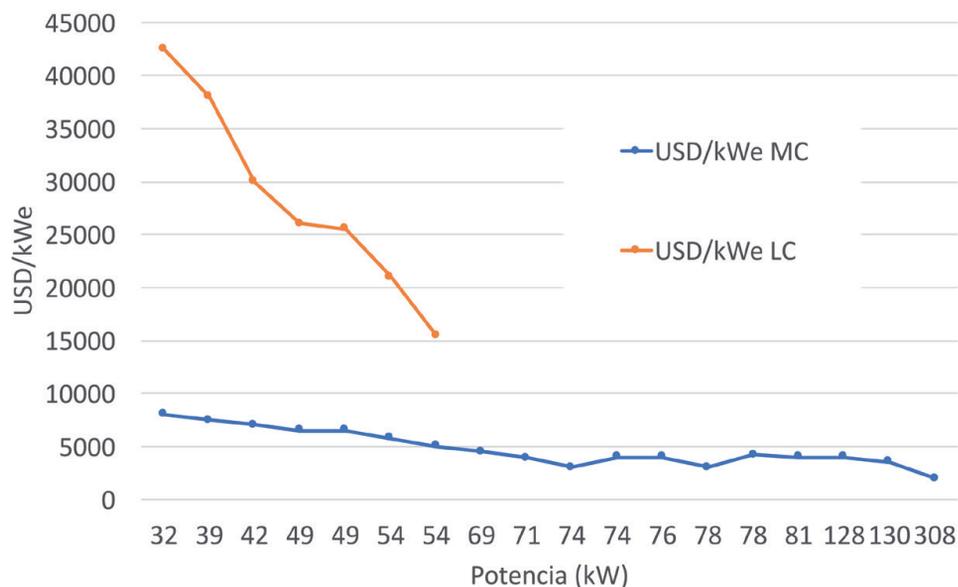
ingeniería electromecánica y/o eléctrica, además de servicios de aspectos legales de permisos, mencionado en la Guía de Planificación para Proyectos de Biogás en Chile (2012) (Ministerio de Energía, GIZ, 2012). En este aspecto, considerar que la norma solicita:

- Las instalaciones las debe realizar un instalador de biogás tipo 4, quienes podrán diseñar, proyectar, ejecutar y/o mantener las instalaciones de biogás.
- De acuerdo al reglamento se debe, al finalizar la obra, contar con un archivo que incluya: plan "as built" el que deberá quedar junto a la copia de la inscripción de la planta, los registros de producción de biogás, procedimientos de operación y seguridad, y manuales de seguridad.
- El diseño y construcción de obras civiles deben cumplir con el decreto con fuerza de ley N° 458 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- El diseño debe contemplar una clasificación de zonas de riesgo de explosión, la que determina el uso de instalaciones y productos eléctricos diseñados para estas condiciones, distancias entre el almacenamiento y la utilización del biogás, y alturas de estructuras que alojen el almacenaje del combustible. Se debe contar con extintores de inflamabilidad A, B y C.
- A su vez es necesario contar con instalaciones para la quema del biogás, con una capacidad de quema igual o mayor a la producción máxima de biogás prevista.

Existen algunos estudios que pueden ser utilizados como referencia para estimar el costo de implementar un sistema de biodigestión, pero estos deben ser utilizados entendiendo que han sido desarrollados para otras condiciones y esquemas legales; adicionalmente hay datos preliminares de estudios de prefactibilidad elaborados por el Ministerio de Energía en Chile.

La Figura 28 muestra un resumen del costo por KWe instalado, que incluye el digestor y todos sus componentes, como también el sistema de cogeneración eléctrica, rondando entre 28.500 USD / KWe para laguna cubierta, y 15.800 USD /kWe para mezcla completa.

Figura 28. Comparación de costos de inversión para proyectos de cogeneración con mezcla completa (MC) y laguna cubierta (LC) con relación a la potencia instalada



Fuente: datos referenciales de acuerdo a estudios de prefactibilidad efectuados en el marco del proyecto Biogás Lechero, 2017.

7.1.2 GASTOS EN LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BIODIGESTOR (OPEX)

Los gastos de operación de un sistema de biodigestión o biodigestor en algunos casos pueden ser considerables. Las acciones que haya que llevar a cabo varían según el tipo de instalación de biogás, siendo que entre más complejas las plantas, mayor sofisticación estará presente en su configuración. Pre tratamiento de sustrato, agitación y calefacción son algunos de los puntos que requerirán de mayor vigilancia y dedicación. Deben realizarse verificaciones regulares y registros de producción de biogás permanentes que los operadores deberán comprender y conocer durante la capacitación que reciban.

Algunos costos son:

- **Costo del sustrato:** aunque parezca sorprendente, conseguir el sustrato en las condiciones adecuadas para el biodigestor representa gastos adicionales, como en energía para bombeo o acondicionamiento (separación de sólidos) o personal para el barrido y limpieza.
- **Consumibles:** se consideran consumibles cualquier insumo para el proyecto, como por ejemplo aceite de ignición si se utiliza co-generadores, diésel para generación eléctrica o químicos para regulación de pH.
- **Mantenimiento y reparación:** existen rubros de mantenimiento y reparación en general del sistema de biodigestión. Algunos sugieren el uso de un % anual de costo total de inversión del proyecto.
- **Mantenimiento de equipos del uso del biogás:** si el biogás es utilizado por ejemplo en la generación eléctrica, se deben considerar gastos como cambios de aceite, filtros de aire y otros involucrados.
- **Mantenimiento y disposición del digestato:** el efluente debe ser bombeado consumiendo energía eléctrica, o deshidratado con separadores de sólidos, algunas veces consumiendo químicos como floculantes o coagulantes.
- **Mano de obra:** dependiendo de la escala de la planta se debe considerar agregar personal para un uso adecuado del biodigestor.
- **Imprevistos:** siempre es recomendable mantener un rubro de imprevistos, que permita reducir el riesgo del proyecto.
- **Análisis químicos:** es imprescindible para el monitoreo y seguimiento, inclusive la optimización del sistema de producción y uso de biogás y digestato. Existen laboratorios que realizan análisis y tomas de muestras (ST, SV, DQO, CH₄, etc), hay ciertos análisis que se podrían llevar a cabo en el mismo predio.
- **Comunicación e informe de accidentes e incidentes:** dentro de las 24 horas siguientes al evento o detección deberá comunicarse explosiones, fugas, atentas, incendios, roturas u otros hechos que perjudican la integridad estructural. Debe entregarse un informe completo que incluya desde la información detallada del accidente, las medidas de emergencia tomadas, hasta los organismos que hayan asistido la emergencia.

7.1.3 INGRESOS PERCIBIDOS POR EL PROYECTO DE BIODIGESTIÓN

Los ingresos del proyecto, a veces visualizados como los ahorros por la implementación del biodigestor, son un pilar importante y usualmente la variable con más altas expectativas por parte del propietario. Estos ingresos representan la valorización de los sub-productos de un biodigestor. Esta valorización no es una tarea fácil ni intuitiva y debe ser realizada con cautela para evitar sub-valorar y peor aún sobre-valorar un sub-producto.

- **Biogás:** el biogás es el sub-producto más obvio en un biodigestor y como fue desarrollado en la sección 6.2.1 y ejemplificado, puede utilizarse para usos térmicos, mecánicos o eléctricos. El biogás se valoriza estimando la energía que éste estará sustituyendo y no la energía que potencialmente puede generar. Tomando como referencia el caso de Jaime, este puede generar 428,4m³/d de biogás, convertibles en 19.300kWh por mes, que puede representar un ahorro o ingreso por venta de excedentes de electricidad, según el tipo de tarifa que tenga.

Alternativamente, podría ser que, para el caso de Jaime, por la dinámica de uso de electricidad en su lechería, el enfoque sea producir electricidad para autoabastecer los equipos de mayor consumo, como el sistema de enfriamiento, bomba de vacío, bomba de leche, agitadores, entre otros. Sus ahorros entonces serían menores a esta cifra. El biogás puede ser valorizado por la energía eléctrica que puede sustituir, es decir el costo de la electricidad del usuario. De la misma forma, se puede valorizar por cualquier otro combustible que el biogás pueda sustituir, por ejemplo, gas propano, diésel o incluso leña.

- **Digestato:** El digestato es otro sub-producto de mucho valor en un proyecto de biodigestión. Su forma de valorización es algo más compleja y muchas veces cruza a un área gris de valores intangibles o difíciles de valorar. La forma más típica de valorización es comparar su valor nutritivo con los mismos nutrientes, pero de origen sintético.

Tomemos como ejemplo el caso de Joaquín. Este estará produciendo 41,2m³/d de digestato, según su análisis de laboratorio este efluente contiene 6% de nitrógeno total en base seca, lo que significa 3.248 kg de nitrógeno al año ($41.200 * 0,0036 * 0,06 * 365 = 3.248$). Si este nitrógeno es adquirido en forma de Urea (46% N) esto significa la compra de 153,5 quintales (sacos de 46 kg). A un precio de mercado de \$USD 36,59/quintal de urea (241,5 \$ chilenos /kg), esto representa un valor USD \$2.583 al año (~1.704.780 \$ chilenos). De igual forma se debería hacer con los macronutrientes como fósforo, potasio e inclusive micronutrientes. En este caso, Joaquín encuentra que en el análisis de laboratorio se dice que su digestato tiene un 3,1% de fosforo y un 8,10% de potasio en base seca. Esto equivale a 79,3 quintales de superfosfato triple (46% P) al año (valorado en USD \$1.596 al año (~1.053.460 \$ chilenos)) y 207 quintales de muriato (60%K) al año (valorado en USD \$4.029 al año (~2.659.646 \$ chilenos)). De este modo, el reciclaje de nutrientes en el caso de Joaquín equivale a USD \$8.208 (5.417.280 \$ chilenos). El riesgo de este tipo de evaluaciones es que solamente se valoriza el fertilizante que se ahorrará y no el verdadero potencial del digestato, los beneficios e impacto a largo plazo ya mencionados (Tabla 12). Otra forma más tangible, es si el digestato es comercializado en forma de abono líquido o inclusive como abono sólido.

- **Otros ingresos:** potencialmente, el biodigestor puede ofrecer servicios ambientales. Jaime, con su biodigestor mesofílico de mezcla completa, podría ofrecer potencialmente el servicio ambiental de tratamiento, por ejemplo, de residuos orgánicos de alguna agroindustria cercana, lo que puede representar un ingreso adicional al proyecto. Esta alternativa debe contemplarse desde la planificación y diseño del proyecto.

7.1.4 TÉRMINO DEFINITIVO DE OPERACIONES DE PLANTAS DE BIOGÁS

El propietario u operador deberá presentar ante la SEC un informe señalando los siguientes detalles: identificación, fecha de término de operaciones, procedimiento de cierre empleado, y deberá adoptar las medidas de seguridad necesarias a fin de evitar situaciones de riesgo posteriores. Se deberá inhabilitar la planta de biogás, sellar conexiones, purgar todo el biogás e inertizar y eliminar todo el material que pudiese seguir produciendo biogás.

7.2 INDICADORES FINANCIEROS (TIR, VAN, FLUJO DE CAJA, TIEMPO DE RETORNO, ETC.)

El análisis financiero concluye con la estimación de los indicadores usando los costos de inversión, gastos operativos e ingresos del proyecto, ampliados en la sección anterior. Los cálculos de los indicadores financieros son fórmulas aritméticas que deben ser calculadas por consultores del proyecto. Los principales indicadores son:

- **Flujo de caja o efectivo:** un flujo de efectivo es una proyección en el tiempo de los ingresos estimados, menos los gastos de operación y mantenimiento, dejando por tanto un flujo de caja, efectivo o dinero, idealmente positivo que va cancelando el costo de la inversión en el tiempo. Un ejemplo de flujo de caja o efectivo se muestra en la Tabla 23. Este corresponde a un proyecto hipotético en Costa Rica de un reactor de 2.700m³ de capacidad, para generación eléctrica en un cogenerador (CHP) de 200 kW. El ejemplo en sí no corresponde al de *Mariela, Jaime ni Joaquín*, pero sí ejemplifica el concepto de un flujo de caja. *Cabe mencionar que en la actualidad el tope para la venta de excedentes bajo la ley de generación residencial se encuentra en los 100kW de generación* (Ley 20.571) por lo tanto para el diseño del aprovechamiento del biogás producido se recomienda su uso en energía calórica, o la venta de excedentes de electricidad bajo el rango correspondiente (generación residencial).

Como se ve en el ejemplo, el costo de inversión del biodigestor es de USD \$ 1,16 millones, y genera un ahorro anual en electricidad de cerca de USD

\$330.000. Esto le permite pagar los gastos anuales de aproximadamente USD 70.000 - 100.000, logra pagar la inversión en el año 6 aproximadamente, mostrado como un flujo neto acumulado en la última línea.

Se debe notar que adicionalmente, el flujo de caja debe considerar gastos administrativos, depreciación del equipo e incluso impuestos de renta. El flujo de caja se hace usualmente por 20 años o bien por la vida útil estimada del proyecto; el ejemplo, que es utilizado únicamente con fines demostrativos está a tan solo 6 años.

Más que un indicador, el flujo de caja permite entender la necesidad de financiamiento del proyecto, pues no solamente es el costo de inversión y puede requerir también capital de trabajo para operar, mientras este genera suficientes ingresos. Adicionalmente, permite determinar el tiempo de retorno, un indicador que establece cuánto tardarán los ahorros en pagar la inversión, tras cubrir los gastos asociados al mantenimiento.

• **Tasa interna de retorno (TIR):** la tasa interna de retorno es un indicador financiero utilizado para medir la rentabilidad de la inversión. Entre más alto el TIR mejor es la inversión y entre menor el TIR menos atractiva será la inversión. Este es un indicador meramente financiero y no tiene un vínculo directo con el sector biogás, pero sí en el mundo de las finanzas y a la hora de pedir un crédito para una inversión. Se calcula utilizando el flujo neto de efectivo, donde muestra en el año 0 la inversión requerida y a partir del año 1 el dinero generador (idealmente) a lo largo del periodo.

Para el ejemplo de la Tabla 23, la tasa interna de retorno es de 14,7%. ¿Cómo se puede interpretar este resultado? Esta tasa indicará en qué se convertirá el dinero. Si el TIR es negativo indica pérdida y si es 0 indica que no hay ni pérdida ni ganancia. Si el TIR es positivo, se puede comparar con otras tasas de referencia como la tasa de un crédito a plazo. La pregunta que trata de responder este indicador es: si coloco el dinero invertido en el biodigestor en algún otro negocio o una cuenta a plazo fijo, por ejemplo, ¿cuál será la tasa? Si este es mayor al TIR del biodigestor, significa que las otras posibles inversiones son más rentables.

El TIR es un indicador financiero que puede ayudar a tomar una decisión sobre uno u otro biodigestor o sobre diferentes alternativas de tratamiento de residuos.

- **Valor actual neto (VAN):** el valor actual neto es considerar el flujo de efectivo, y traer su valor real actual, basado en una tasa de interés determinada por el consultor. Entre más alto el VAN, mejor será la rentabilidad del proyecto.

Obtenidos y estimados los indicadores financieros, el proyecto puede exponerse a un análisis de sensibilidad. Este análisis pretende analizar los costos, los gastos y los ingresos del proyecto a prueba y modelar los peores (o mejores) escenarios. Algunas preguntas a incorporar al análisis:

¿Qué ocurre si mi estiércol produce 15 % menos biogás que el estimado? ¿Qué ocurre si el costo de inversión se incrementa 20% por dificultades en el movimiento de tierra? ¿Cómo será la rentabilidad del proyecto si los gastos de mantenimiento son superiores a los estimados?

Este análisis toma como referencia algún indicador financiero, como por ejemplo el TIR. Luego, se reducen los ingresos del proyecto en un % determinado y se recalcula el TIR. Se evalúan las variables técnicas utilizadas en el diseño del proyecto individualmente, aumentando o disminuyendo sus valores originales y luego recalculando los indicadores. Al final del análisis se tendrán las variables que representan una **mayor sensibilidad** para tomar las precauciones del caso o bien re-analizar el proyecto. Por último, la decisión final tomará en cuenta el requerimiento de inversión y capital de trabajo, el TIR, VAN, además del análisis de sensibilidad.

Tabla 24. Flujo de efectivo de ejemplificación de un reactor de mezcla completa de 2.700 m³ de volumen de biodigestor, con generador de 200 kW para autoconsumo. (Moneda en USD \$ dólares americanos)

Rubro	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos								
Ahorro en energía eléctrica		\$328.527	\$344.953	\$362.201	\$380.311	\$399.326	\$419.292	\$440.257
Valor de rescate de equipos						\$16.250		
Subtotal (I)	\$0	\$328.527	\$344.953	\$362.201	\$380.311	\$415.576	\$419.292	\$440.257
Egresos								
Costo de capital	\$259.338							
Almacenamiento de sustrato y alimentación	\$260.457							
Digestor	\$288.125							
Aprovechamiento de biogás y control	\$92.626							
Almacenamiento del digestato Inóculo	\$2.500							
Equipos preparación del sustrato	\$65.000					\$65.000		
Subtotal (I)	\$968.046	0	0	0	0	\$65.000	0	0
Planeación, ingeniería, y permisos.	\$96.805							
Imprevistos	\$96.805							
Subtotal (II)	\$193.609	0	0	0	0	0	0	0
Inversión total	\$1.161.656	\$0	\$0	\$0	\$0	\$65.000	\$0	\$0
Costos operativos. Variables								
Costo de sustrato		\$24.723	\$25.959	\$27.257	\$28.620	\$30.051	\$31.553	\$33.131
Consumibles		\$4.840	\$5.082	\$5.336	\$5.603	\$5.883	\$6.177	\$6.486
Mantenimiento y reparación		\$9.680	\$10.164	\$10.673	\$11.206	\$11.767	\$12.355	\$12.973
Mantenimiento de CHP		\$2.403	\$2.523	\$2.649	\$2.782	\$2.921	\$3.067	\$3.220
Manejo de digestato		\$5.683	\$5.967	\$6.266	\$6.579	\$6.908	\$7.253	\$7.616
Imprevistos		\$2.366	\$2.485	\$2.609	\$2.739	\$2.876	\$3.020	\$3.171



Costos operativos. Fijos									
Mano de obra (2 operarios - tiempo completo)		\$20.400	\$21.420	\$22.491	\$23.616	\$24.796	\$26.036	\$27.338	
Gastos administrativo		\$350	\$368	\$386	\$406	\$426	\$447	\$470	
Costo total de operación		\$70.447	\$73.969	\$77.667	\$81.551	\$85.628	\$89.910	\$94.405	
Costos administrativos		\$352	\$370	\$388	\$408	\$428	\$450	\$472	
(-) Depreciación (5 años; valor de rescate 25%)		\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	
(-) Depreciación (10 años; valor de rescate 25%)		\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	
(-) Depreciación (15 años; valor de rescate 25%)		\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	
Egresos totales	\$1.161.656	\$153.439	\$156.979	\$160.696	\$164.599	\$233.697	\$173.000	\$177.518	
Flujo neto de efectivo (antes de impuestos)	(\$1.161.656)	\$175.087	\$187.974	\$201.504	\$215.712	\$181.879	\$246.293	\$262.739	
(-) Impuesto (30%)	\$0	\$52.526	\$56.392	\$60.451	\$64.713	\$54.564	\$73.888	\$78.822	
(+) Depreciación (5 años; valor de rescate 25%)		\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	\$13.000	
(+) Depreciación (10 años; valor de rescate 25%)		\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	\$28.813	
(+) Depreciación (15 años; valor de rescate 25%)		\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	\$40.828	
Flujo neto de efectivo (después de impuestos)	(\$1.161.656)	\$205.202	\$214.222	\$223.694	\$233.639	\$209.956	\$255.045	\$266.558	
Flujo neto acumulado		(\$956.454)	(\$742.232)	(\$518.538)	(\$284.900)	(\$74.944)	\$180.102	\$446.660	

Fuente: elaboración propia, 2017.

7.3 ALGUNAS CONCLUSIONES DE LOS ESTUDIOS DE PRE-FACTIBILIDAD DEL PROYECTO

Con el interés de incorporar información generada por el Programa GEF Biogás, basada en estudios de pre factibilidad llevados a cabo en predios lecheros de las regiones de Los Ríos y Los Lagos, y de esta manera poder presentar ideas o análisis más acabados, se presentan una serie de conclusiones que buscan transparentar la información local.

Se evaluaron las tecnologías de laguna cubierta, y mezcla completa con las siguientes características:

Laguna Cubierta	Mezcla completa
<ul style="list-style-type: none">• ST < 3% (hasta 6% según experiencia consultores)• Sin agitación• Temperatura ambiente (idealmente sobre 15°C)• Baja eficiencia• Menores costos de inversión	<ul style="list-style-type: none">• ST entre 3 – 12%• Agitación• Calefacción (35°C)• Mayor eficiencia• Mayores costos de inversión

Las variables evaluadas incluidas fueron: la cantidad de purines y su caracterización, sólidos totales, sólidos volátiles y temperatura de funcionamiento. Frente al consumo de los planteles según tipo de combustible, y consumos eléctricos de los predios.

Los ingresos considerados para los efectos del estudio fueron los alcanzados por ahorro de energía eléctrica y/o térmica, y los ingresos por venta de energía eléctrica a la red. Sólo para los análisis de sensibilidad se consideró el ingreso por concepto de venta del digestato como fertilizante agrícola.

Algunas conclusiones preliminares:

- Existe un marcado efecto de la escala de los proyectos sobre la inversión inicial/unidad de potencia instalada.
- Al optar por la cogeneración, la tecnología de mezcla completa ofrece una menor inversión inicial/unidad de potencia.

- Se descartaron los casos asociativos por su elevado costo de transporte y la baja cantidad de biogás generada.
- La reducción de gases de efecto invernadero alcanzan valores en el rango de 69% a 87% para sistemas de pastoreo, y en torno al 86% para la estabulación completa.

Otros desafíos y conclusiones **generales** que arrojó el estudio fueron las siguientes:

1. No existe una única solución tecnológica, y siempre deberá optarse por el óptimo entre simplicidad, eficiencia y bajo costo.
2. Se requiere avanzar en la medición de periodos de al menos 1 año para realizar una adecuada caracterización del potencial de biogás, y con esto poder determinar si efectivamente en la zona habría o no una menor producción de biogás promedio, comparada a la literatura.
3. Se hace imprescindible contar con acciones para el uso eficiente del agua (limpieza en seco, canalización de aguas lluvia, etc).
4. En los sistemas de producción de biogás actuales se hace necesario poder medir y analizar las variables para determinar el real funcionamiento de estos sistemas.

Específicamente en torno a los aspectos económicos y financieros:

1. Los indicadores estrictamente financieros, no muestran la industria de los biodigestores como una alternativa atractiva de manejo de residuos orgánicos del predio bajo el manejo agronómico actual: corto período de estabulación, ausencia de sustratos para la co-digestión, lecherías alejadas de potenciales puntos de demanda de calor y/o electricidad, exceso de dilución de los purines a partir de las aguas lluvia, costos de disposición actual de purines cercano a cero, el uso de energía calórica en la zona es de muy bajo costo (leña), bajo porcentaje de gasto asociado a uso de combustibles en la matriz de costos del sistema productivo. La venta de electricidad no sería un negocio relevante.
2. Sin embargo, el proyecto muestra sensibilidad a la valorización del digestato, el que actualmente no tiene un valor de mercado determinado.

3. Existe una gran variabilidad de costos según los estudios realizados, los que en general estarían sobre la media de lo que existe en mercados internacionales (Europa y Asia principalmente), lo que refleja una industria inmadura, con una gran brecha que permitiría la reducción importante de costos si se desarrollase estratégicamente.
4. En Chile y, específicamente para la escala contemplada en el Programa GEF, el mercado del biogás, digestato y biodigestores, es aún incipiente, y aún hace falta una masa crítica de operadores, potenciales usuarios y ofertantes de la tecnología que puedan vender sistemas eficientes, a costos de inversión y operación de mercados maduros (con adecuada disponibilidad de accesorios y equipamiento por ejemplo). Eventualmente algunos incentivos económicos o mecanismos financieros podrían revertir estos resultados, como por ejemplo: tarifas preferenciales para la inyección de excedentes (no se generarían excedentes en la mayoría de los casos) o incentivos tributarios, por ejemplo.

A pesar de lo anterior se mencionan como antecedentes conducentes al éxito de los proyectos, las **externalidades positivas** que puede traer un proyecto de biogás, **la rentabilidad de los proyectos, y el grado de compromiso e interés que despierta en los usuarios**, quienes han buscado esta tecnología enfrentando ciertos grados de incertidumbre.

5. Se menciona al Reglamento de seguridad como un eventual factor que elevaría los precios de implementación de la tecnología en los sistemas a implementarse a partir de agosto de 2017, en comparación a las formas de implementación anterior.

Las externalidades positivas, son factibles de lograrse independientes de los valores económicos que arrojen los VAN, y las TIR del proyecto, y para ello aún haría falta incorporar formas y metodologías de medición a los modelos de "business as usual"¹³ de las lecherías de la región que incorporaran la tecnología. No cabe duda que la **disminución de gases de efecto invernadero, la disminución de contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, la disminución de olores y vectores, la utilización de digestatos, y con ello el mejoramiento de suelos, la disminución de la**

13 Forma de producción convencional.

presión sobre los recursos forestales, y ciertos grados de autosuficiencia energética juegan roles muy necesarios hoy en día, y cada vez serán más importantes dada la creciente presión antropogénica y (afortunadamente) una conciencia ambiental social dinámica. Es muy relevante mencionar y reflexionar entorno a estas alternativas ya que la competitividad del sector lechero está en manos de la sustentabilidad que el mismo pueda desarrollar.

Los próximos pasos debieran ir por la ruta de la realización de estudios de factibilidad y modelos de negocios que incluya otras regiones del país; abrir líneas de investigación para estudiar disponibilidad y efecto de co-digerir sustratos (suero, residuos de cultivos anuales, residuos de la agroindustria); realización de análisis de mercado para el digestato y costos reales relacionados, seguir avanzando en la generación de capacidades, asistencia técnica y disminución de costos de operación, además de realizar análisis de sensibilidad en base a resultados entregados por empresas consultoras en los estudios realizados.

El diseño, construcción y arranque de un biodigestor debe realizarse con la asesoría y apoyo de un consultor o empresa. Sin embargo, las empresas proveedoras de biodigestores no ofrecen el mismo tipo de servicio o producto. De esta manera se encontrarán en el mercado de empresas proveedoras algunas que ofrecen únicamente el diseño, pero no la construcción. Otras harán la construcción, pero no el diseño, algunas empresas serán especialistas en lagunas cubiertas, mientras que otras lo podrán ser en biodigestores de mezcla completa. Algunas ofrecerán la puesta en marcha de equipos de generación eléctrica, pero no proveerán los equipos para el acondicionamiento del biogás. Habrá empresas que harán todo menos los aspectos legales. En fin, encontrar una empresa que haga todo el proceso, desde diseño, tramitología, instalación, puesta en marcha y entrenamiento no es necesariamente la mejor opción, siempre será importante considerar en qué factores el predio requiere de más apoyo e idealmente buscar una empresa proveedora especialista que se adapte también a las condiciones financieras de la escala del proyecto de biodigestión. A continuación se detallan algunos aspectos que se deben tomar en cuenta cuando se seleccione una empresa.

8.1 RESPONSABILIDADES DE LA EMPRESA PROVEEDORA

A continuación, se detallan las principales áreas que conllevan la ejecución de un proyecto de biodigestión. Cada sección indica las responsabilidades mínimas que una empresa contratada debería cumplir para ser considerada, lo que debe quedar reflejado en un contrato, el que determinará la responsabilidad de la empresa. No deben olvidarse las tareas y responsabilidades que el predio deberá incorporar en sus operaciones habituales.

- **Pre-factibilidad y factibilidad completa:** realizar un estudio de pre-factibilidad o factibilidad puede servir para disminuir riesgos, evaluación de escenarios y escoger el más óptimo. El consultor o empresa que apoye en esta área deberá entregar un documento que detalle los datos del proyecto (como cantidad de animales en ordeño, agua de lavado, caracterización del estiércol) y las variables y/o supuestos (rendimiento de metano, COVA, TRH, entre otros) utilizados. Usualmente será necesario hacer un pre-diseño o ante-proyecto con el fin de realizar una estimación de las obras, pero no es común un diseño constructivo en detalle.

Deberá estimar los costos de inversión, los gastos de operación y mantenimiento y los ingresos esperados por el proyecto y se deberá realizar una estimación de los indicadores financieros, junto con un análisis de sensibilidad.

- **Diseño:** corresponde a la búsqueda y procesamiento de toda la información relevante del proyecto para poder plasmarlo en un diseño. Este es la combinación de una memoria de cálculo acompañada de un plano constructivo, mecánico, eléctrico e inclusive topográfico. La memoria en esencia es un documento que detalla los datos del proyecto (como cantidad de animales en ordeño, agua de lavado, caracterización del estiércol), las variables y/o supuestos (rendimiento de metano, COVA, TRH, entre otros) utilizados y el paso a paso para llegar, por ejemplo, al dimensionamiento del reactor o biodigestor, así como la cantidad y forma de aprovechamiento del biogás. Debería incluir todos los detalles de dimensiones y materiales de construcción para cada componente del proyecto (desde pretratamiento hasta disposición del digestato).

Esta información es plasmada luego en un plano constructivo con todas las vistas (en planta, transversal y longitudinal) y cortes, además de los detalles constructivos específicos. Estos planos deben seguir los formatos de la normativa vigente en Chile y se debe mencionar un plano conjunto con curvas de nivel o plano topográfico, además de un detalle de cada componente. Adicionalmente, se suman (según aplique), planos de estructuras electromecánicas como bombas y motores, además de planos eléctricos.

- **Aspectos Legales:** Para la ejecución del proyecto, hay dos grandes líneas normativas que todo proyecto de biogás debe cumplir, la de seguridad (Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017)) y la ambiental (Decretos Supremos, APL, NCh, etc). Se deberá incluir el registro de la planta de biogás según lo que indica el reglamento, ante la Superintendencia de Electricidad y Combustibles. La inscripción no debe necesariamente hacerla la empresa proveedora, sino que queda sujeto a la decisión entre ambas partes. Eso sí, debe ser un instalador de gas Clase 4 quien haga este trabajo. Los trámites exigen los siguientes requisitos:

- Presentar el formulario “Declaración de Plantas de Biogás” (DTSC-CBFOR-71).
- Presentar el documento “Antecedentes Técnicos y Operacionales de Instalaciones de Biogás” (DTSC-CB-FOR-72).
- Presentar el documento “Resumen Especificaciones Técnicas de Instalaciones de Biogás” (DTSC-CB-FOR-73).
- Cumplir con lo especificado en el “Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017) de Diseño, Construcción y Operación de Instalaciones de Biogás”.
- Presentar el documento llamado “Notificación de inicio de obras instalaciones de biogás nuevas o sus modificaciones” (DTSC-CB-FOR-091)
- Cumplir con la futura resolución exenta que establece procedimiento para la notificación de inicio de obras, cambio de propietario y cierre definitivo de las instalaciones de biogás.

Si la planta de biogás además va a contar con un sistema de generación de electricidad debe pasar por el sistema de evaluación ambiental descrito en la sección 12.1.6 (Estudio de Impacto Ambiental-EIA), y una declaración de impacto ambiental (DIA). Los proyectos de biogás entran en el sistema de evaluación ambiental por el numeral o Proyectos de saneamiento ambiental.

- **Construcción, instalación electromecánica y colocación de geomembranas:** la construcción del proyecto de biodigestión puede ir subdividido en la obra civil, la instalación eléctrica y electromecánica, y la colocación de geomembranas. Cada empresa (o solo una empresa) deberá responsabilizarse por la obra asignada en su totalidad. Esto incluye la compra de los materiales constructivos (hormigón, cemento, piedra, acero, entre otros) o los equipos electromecánicos, materiales eléctricos y la geomembrana, cordón de extrusión, entre otros; la empresa deberá asegurar la calidad de los materiales y ser factibilidad de uso en contacto al biogás. Por otro lado, deberá responsabilizarse también de la contratación de la maquinaria, además de la mano de obra, asumiendo todas las cargas y responsabilidades sociales sobre este personal y no el predio. Por último, la empresa deberá realizar pruebas a la obra, como por ejemplo llenar los tanques que serán utilizados para el biodigestor con agua y revisar fugas, probar que los agitadores y mezcladores funcionen correctamente y que el sistema de captación de biogás esté libre de fugas.

- **Puesta en marcha:** la empresa líder que asesora el proyecto en su totalidad se responsabiliza de realizar la puesta en marcha del proyecto. Esta consiste en hacer las primeras alimentaciones al biodigestor, asegurando que todo opere correctamente. En este paso, es prudente afinar la operación de cada componente del biodigestor y realizar las calibraciones correspondientes. El biodigestor empezará una etapa delicada para lograr que el sistema empiece la producción de biogás exitosamente, y el paso de la puesta en marcha es clave para una continua y permanente operación.

- **Uso y aprovechamiento del biogás:** es recomendable que la empresa encargada inicie la instalación de estos componentes, antes que se de por confirmado la producción estable de biogás. La empresa deberá instalar el equipo correspondiente, pero además deberá realizar las pruebas, ajustes y calibraciones correspondientes para que el equipo opere adecuadamente con el biogás que es generado en el proyecto.

- **Uso y aprovechamiento del digestato:** la empresa deberá responsabilizarse por garantizar que el almacenamiento, manejo y tratamiento (si aplica) del digestato corresponda a lo normado en Chile. Este es tal vez una de las áreas de mayor negligencia por las empresas consultoras en biogás. Normalmente se asume que el manejo del digestato es fácil y será dispuesto para uso agrícola, pero cuando la planta está operando se puede encontrar que el área disponible no es suficiente, o las condiciones físicas y químicas del digestato no cumplen los estándares para exportarlo fuera del campo, o el sistema de tratamiento instalado post-biodigestor no es suficiente. Se debe asegurar que la empresa se responsabilice por un diseño adecuado, su calibración y el adecuado entrenamiento para el manejo del digestato.

8.2 EXPERIENCIA PREVIA Y REFERENCIAS

Como se mencionó, las empresas que ofertan servicio y productos en biodigestores poseen diferentes niveles de especialidad y de experiencia previa. Latinoamérica, incluyendo a Chile, no posee un mercado maduro en biodigestión y por tanto no habrá una oferta amplia de empresas que diseñen y construyan biodigestores (detalle de empresas actuales en Chile más adelante).

Será necesario hacer una indagación más profunda para asegurar que el consultor o empresa cuenta con las credenciales y referencias suficientes para liderar la puesta en marcha de un biodigestor. Los factores de mayor relevancia son:

- La empresa debe contar con un equipo propio y/o de consultores externos, con formación **multidisciplinaria** que permita ver el **proyecto de forma integral**. Es importante que demuestren experiencia y alto conocimiento en la tecnología de biodigestión.

• Si la empresa no es originaria de Chile, esta debe dominar la normativa chilena, además de entender el contexto lechero nacional, esto con el fin de que adapte la tecnología a las condiciones locales y competencias técnicas humanas actuales. Es común que empresas de biodigestión tengan paquetes tecnológicos transferibles a otras latitudes, siguiendo los estándares de su país de origen, por lo que es indispensable que los adapten a Chile.

- Contar con experiencia previa de la escala de tu predio, e idealmente en las mismas condiciones de funcionamiento. No es lo mismo el biodigestor requerido para el caso de Mariela que para el caso de Jaime a pesar de que ambos son predios lecheros.
- Es altamente recomendable que la empresa tenga la disposición de compartir detalles de otros proyectos e incluso que exista la posibilidad de visitar algún proyecto similar ya instalado.

8.3 PROPUESTA TÉCNICA, CALIDAD Y GARANTÍA

Las propuestas técnicas de cada empresa variarán en formato, calidad y extensión. No existe un estándar para esto. Lo importante es que la empresa que oferte el proyecto de biodigestión (o algún componente) sea clara en los detalles, variables y supuestos utilizados para dimensionar y escoger el modelo, material o tamaño del componente o planta de biogás en su totalidad. Está claro, como se ha mencionado a lo largo de este documento, que es imprescindible que esté alineada con la normativa chilena. Para evaluar una propuesta, se recomienda poner atención a los siguientes detalles:

- **Desembolsos:** debe especificar cuál es el monto total por los servicios y productos ofrecidos y cuáles serían los desembolsos por realizar, contra el cumplimiento de hitos y avances en el proyecto. Asegurar que los desembolsos se ajusten al valor de los avances entregados.
- **Acuerdo legal:** sin importar la escala del proyecto, se sugiere que se detalle la posibilidad de formalizar legalmente la contratación de los servicios por medio de un contrato, carta de entendimiento o documento similar, que detalle la forma en que se llevará a cabo el negocio.
- **¿Qué incluye, qué no incluye?:** el cumplimiento de expectativas es un detalle muy importante en la construcción de la confianza entre el predio y la empresa. Por tanto, la propuesta debe dejar muy claro cuáles son los productos, servicios o responsabilidades que estará asumiendo la empresa y de la misma forma mencionar explícitamente qué otros trabajos (antes, durante o después) se deben llevar a cabo y no son incluidos en la oferta o deben ser asumidos por el predio. Por ejemplo, la oferta puede incluir el biodigestor, pero puede que no incluya el movimiento de tierra.
- **Los productos:** llámese un servicio de ingeniería o un producto físico como un biodigestor, un agitador o un generador, deben ser indicados en la oferta, incluidos aspectos relacionados a garantías. Las características técnicas como marca, modelo o país de origen deben ser mencionadas. Si es un servicio debe ser claro en el producto final, por ejemplo, un documento o una hoja de cálculo, entre otros.

- **¿Cómo se evalúa si terminó o no terminó el contrato?** La propuesta o el contrato (en caso de formalización) debe indicar cuáles son los criterios para determinar si ha cumplido con lo ofertado. Por ejemplo, la generación de biogás estable puede ser un indicador para demostrar que el proyecto ha finalizado y por tanto se puede dar por terminada cierta etapa de la consultoría.
- **Garantías:** El concepto de garantías es un tema delicado que debe ser discutido con la empresa para evitar malentendidos. Existen diferentes niveles de garantías, por ejemplo, se pueden aplicar garantías de fiel cumplimiento que equivale a un documento valor como un cheque o pagaré, que es retornado a la empresa después de cumplir fielmente con su propuesta. Algo similar es una garantía de vicios ocultos que equivale a un desembolso, en donde la cancelación depende de un periodo de tiempo, usualmente 1 o 2 meses continuos de operación para asegurar que ningún equipo falle. Por último, están las garantías propias del equipo estas deben indicar claramente bajo qué condiciones la garantía sí cumple y bajo qué condiciones no.

8.4 SERVICIO POST VENTA

La relación con la empresa proveedora, una vez implementado y puesto en marcha el biodigestor, no tiene por qué acabar. Tanto la empresa como su cliente están interesados en mantener una buena relación. El biodigestor implementado y la satisfacción del usuario es la mejor propaganda de la tecnología y de la empresa proveedora en particular. La empresa proveedora es quien mejor conoce el biodigestor instalado y su potencial para mejoras y ampliaciones en el uso del mismo, del biogás y digestato.

El servicio post venta va más allá del cumplimiento de la garantía. El servicio post venta puede considerar la actualización al usuario por parte de la empresa proveedora de nuevos productos o información y puede estar relacionada a la formación de una red de usuarios que incentive el intercambio de experiencias y conocimiento. Dudas, posibles inconvenientes que surjan en la operación del biodigestor, o posibilidades de ampliación, durante o después de que finalice la garantía, son consultas que el usuario puede querer realizar a la empresa proveedora, siendo esto parte del servicio post venta.

Los biodigestores son una tecnología viva a pesar de estar consolidada, en cuanto a mejoras en su operación, y aprovechamiento de sus productos. Por ejemplo, siempre está surgiendo nueva información sobre un mejor aprovechamiento del digestato, o su aplicación en cultivos y climas específicos, y un buen servicio post venta debería de asegurar que los usuarios estén al tanto de estas mejoras a las que la empresa proveedora tiene acceso.

8.5 CALIDAD DE LA INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR

Para el usuario promedio, un productor lechero en este caso, no es fácil evaluar la calidad de la instalación de un biodigestor más allá de los acabados y detalles exteriores. Aun así, estos aspectos son importantes, no solo por el funcionamiento del sistema, sino también por la seguridad necesaria para operarlos y aprovechar sus productos. Hay que considerar que los biodigestores se deben entregar en funcionamiento, o sea produciendo biogás combustible y digestato sin olores. Hasta que no se dan estas circunstancias no se puede considerar que haya acabado el proceso de instalación. Es necesario que la empresa proveedora realice acompañamiento y supervisión durante el arranque del biodigestor.

Se recomienda que el cliente atienda al proceso de instalación del biodigestor, pues de este modo podrá conocer las partes antes de que se convierta en un todo. Además, podrá plantear preguntas y clarificar dudas sobre el biodigestor que está integrando a su actividad lechera.

La calidad de la instalación también va asociada a la capacitación que recibe el cliente y trabajadores del predio para poder operarlo, mantenerlo y evaluar su correcto funcionamiento. Lo primero es exigir un manual de usuario, donde se describa el sistema, sus partes, su operación, mantenimiento y posibles reparaciones que pueda hacer el propio usuario, y en qué casos llamar al técnico.

Una vez instalado el biodigestor, es recomendable realizar una evaluación de su hermeticidad, o sea que el sistema captura y no deja escapar el biogás generado, además de comprobar el funcionamiento del sistema de alivio cuando se alcanza la presión máxima (antorcha o válvula de alivio). Esto se puede hacer llenando de aire el sistema recién instalado mediante un soplador (no un compresor, pues este

tiene potencia, pero no caudal), hasta que se active el paso de gas, la antorcha, o se active el sistema de alivio de biogás excedente. En el caso de la antorcha esta no combustionará pues es aire lo que está pasando a través de ella, pero sí debería de abrirse el paso de gas al alcanzar cierta presión. Al alcanzar la presión máxima, lo ideal será dejar el biodigestor inflado para comprobar que no pierde gas durante los dos o tres días siguientes. Hay que considerar que la presión del biogás dentro del biodigestor puede variar entre el día y la noche por la temperatura ambiental, sobre todo en el caso de biodigestores convencionales, como las lagunas cubiertas.

La presión se conocerá con la instalación de manómetros (Fig. 29) los que existen para diferentes rangos de presión. Deben cumplir con los artículos 15 y 38 del reglamento de biogás, deben ser resistentes al H_2S (fabricado de acero inoxidable, por ejemplo) y tener aptitud para el uso y contacto con el biogás.

Figura 29. Manómetro para rangos bajos de presión (0 a 40 mbar, o 400 mca)



Fuente AS&D, 2017.

También es relevante conocer el contenido de metano en el biogás que está produciendo el sistema, ya que esto incide directamente en el funcionamiento de calderas, motogeneradores y cogeneradores (Fig. 30). Existen sistemas portátiles, o estacionales, algunos pueden medir otro tipo de variables adicionalmente. La lectura de la información puede ser local o remotamente, llevándose registros de variables tales como caudal, volumen, presión, temperatura, y % de CH₄. Deben cumplir con los artículos 15 y 38 del reglamento de biogás, con aptitud para el uso y contacto con el biogás en zona ATEX. Existen para diferentes rangos de producción de biogás 1,3 a 3.000 m³/h (según el diámetro del medidor, 32 a 300 mm), y porcentajes de producción de metano entre 30 y 100% vol. En los sistemas de mezcla continua y flujo pistón hay que comprobar los sistemas de calefacción y agitación, así como los posibles automatismos y sistemas de control.

Figura 30. Medidor multiparámetros para biogás



Fuente: AS&D, 2017.

8.6 SEGURIDAD EN EL SISTEMA DE USO DEL BIOGÁS Y DIGESTATO

En Chile, existe el Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás del Ministerio de Energía (2017) (decreto del ministerio de energía n°119; con fecha del 02 de febrero del 2017), que establece requisitos obligatorios a cumplir, categorizándolos según el tamaño de la planta de biogás (en doméstica pequeñas, medianas y grandes), y a la vez en domiciliarias, industriales y de quema de biogás. Para cada una de ellas se establecen requisitos de seguridad. Existen guías y manuales completos como la "Guía de especificaciones técnicas para biodigestores pequeños tipo laguna" del Sagarpa en México (2013), o las "Directrices para el uso seguro de la tecnología del biogás" publicado por la Asociación Alemana de Biogás (2016). A continuación, se detallan algunos puntos críticos de seguridad, pero se recomienda la consulta a guías específicas para este tema, ya que existen riesgos medio ambientales, hacia los equipos, entre otros que podrían ser nocivos para la salud humana.

Entre los requisitos, el reglamento exige que los **aparatos** que utilicen biogás como combustible hayan sido diseñados, fabricados o adaptados para su uso con biogás y que su instalación debe ser realizada por un instalador certificado, por lo que esto asegura la calidad de los equipos, su correcto funcionamiento y seguridad. Consideraciones básicas incluidas en planes de mantención y prevención jugarán un rol fundamental, al igual que medidas simples tales como la ventilación e identificación de zonas de riesgo.

Es importante asegurarse de que el biodigestor disponga de un sistema de alivio de presión del biogás (artículos 16 y 17), el que incluye una antorcha que quema el excedente de biogás, de acuerdo al artículo 32 (Figura 31), y una válvula de alivio de presión (Figura 32). Se recomienda instalar este sistema de incineración del excedente de biogás lo más cercano posible del biodigestor, para evacuar excedentes y minimizar la posibilidad de que se produzca una sobrepresión de la línea de biogás y sus sistemas acoplados, lo cual provocaría la activación de los sistemas de alivio que liberan el biogás bruto y los malos olores al entorno.

Figura 31. Antorcha abierta para caudales desde 50 m³/hora



Fuente AS&D, 2017.

Figura 32. Válvula de alivio de presión/vacío



Fuente AS&D, 2017.

La válvula de alivio de presión trabaja controlando aumentos (sobre presión) y disminuciones de la presión (vacío) evitando de esta manera la ruptura de digestores, estanques y redes de biogás. Las válvulas de alivio deben cumplir con los artículos 15, 16 y 17 del reglamento de biogás, y deben tener aptitud para el uso y contacto con el mismo (materialidad resistente al H_2S).

Después del biodigestor se debe instalar una válvula de corte sobre la línea de conducción, para aislar el digestor del resto del sistema de conducción y aprovechamiento de biogás. Se debe colocar esta llave de paso después del sistema de alivio para, en caso de cierre, permitir evacuar el exceso de biogás producido por el biodigestor, evitando de esta forma producir excesiva presión y/o una rotura.

La instalación de un **arresta llamas** (Figura 33) en la conducción de biogás que impida el paso de una combustión por el interior de la tubería y de una **válvula anti retroceso** de biogás que impida el retorno de flujo de biogás, son elementos importantes de seguridad. En el caso de que la conducción de biogás se contamine (se mezcle con oxígeno), y se produzca una combustión que se traslade por el interior de la tubería, estos elementos impedirán la propagación de una llama por la tubería. Deben ser fabricadas de materiales aptos para uso y contacto con el biogás, y resistentes al H_2S , y cumplir con los artículos 15 y 37 del reglamento.

Figura 33. Válvula arresta llamas



Fuente AS&D, 2017.

A partir de este punto, lo recomendable es disponer de los sistemas de tratamiento de biogás. Es importante considerar que, si no se elimina el vapor de agua presente en el biogás (ya que podría generar inconvenientes en los equipos, o podría obstruir las tuberías de distribución del mismo). Existen diversas alternativas según la escala de producción de biogás, la infraestructura asociada y el uso final del

biogás. Se puede disponer de trampas de agua a lo largo de la conducción del biogás, las que condensan el vapor de agua en los puntos fríos o más bajos de la red de distribución, haciendo frecuente la necesidad de purgar las tuberías. Existen otros métodos, basados en este principio simple, para secar el biogás en forma controlada y a tasas más altas para cuando la demanda es exigente en la calidad y volumen de entrega.

El filtrado y captura de sulfuro de hidrógeno (H_2S) se realiza a través de filtros (Figura 34) lo que debe considerarse en la conducción de biogás antes de que este interactúe con aparatos y maquinaria.

Figura 34. Filtro de H_2S de carbón activado para altos flujos de biogás (hasta $1.200m^3/h$)



Fuente: Gloria Trombin 2017, www.ibbk-biogas.de

Incluso si se usan sopladores (Figura 35), o bombas para aumentar el flujo y presión de biogás, se recomienda que éstos se ubiquen posteriores a los filtros de H₂S. La única excepción se observa en sistemas que quemaran el 100% del biogás. Estos sopladores existen a diferentes rangos de transporte del biogás, pueden partir en 10 m³/h, llegando hasta los 1.200 m³/h, con presiones de descarga entre 50 y 650 mbar, son configurables y se puede modular el flujo a través de un variador de frecuencia.

Figura 35. Soplador centrífugo con flujo y presión configurable, con motor ATEX



Fuente AS&D, 2017.

De este modo, en el caso de la línea de biogás lo primero es darle al biodigestor una salida de alivio al posible exceso, después una llave para aislar el sistema, un sistema arresta llamas o válvula anti retorno, y posteriormente los sistemas de post tratamiento del biogás (condensación de agua y filtrado de H₂S), para terminar con la conducción de biogás en los sistemas que hagan su aprovechamiento.

Las zonas de riesgo de explosión deben ser representadas sobre un “plano de zonas de riesgo de explosión” definido en el artículo 27 del reglamento. La cual considera ciertas consideraciones de diseño y construcción para las instalaciones eléctricas y productos eléctricos, fuentes de ignición, emisión de calor y elementos combustibles. Se incluye la utilización de sensores de detección de gases a diferentes umbrales de alarma (Artículo 41). En Alemania la normativa solicita la utilización de equipamiento que no corran riesgo de generar explosiones en aquellas áreas. Y denomina a aquellos equipos que cumplen con los requerimientos “ATEX”. La Figura 36 ilustra un plano de zonas explosivas ubicado en una planta de biogás.

Figura 36. Plano de zonas de riesgo de explosión



Fuente: Tristan Gruszko 2017, www.ibbk-biogas.de

El reglamento también solicita, en su artículo 25, el uso de señales en plantas de biogás, la que deberá mencionar que el biogás es un gas inflamable y tóxico, en donde se prohíbe fumar, los que deben ser visibles en la zona de producción y uso del biogás. La figura 37 identifica la señalética utilizada en Alemania.

Figura 37. Señalética zonas de peligro en planta de biogás en Kodersdorf



Fuente: Tristan Gruszko 2017, www.ibbk-biogas.de

Para el caso del digestato la situación es más sencilla pues no se requiere de tantos elementos. Lo primero que se debe encontrar en el digestato a la salida del biodigestor es un tanque abierto de almacenamiento con volumen suficiente para albergar unos cuantos días de producción. El tanque puede ser abierto, pues el digestato todavía puede producir pequeñas cantidades de biogás que deben

tener la posibilidad de escapar a la atmósfera, o idealmente también capturarlo, si se sospecha que está regular, ya que pasa a ser una amenaza para el medio ambiente, específicamente frente a los aspectos del cambio climático.

El volumen de digestato producido por día es equivalente a la cantidad de mezcla (estiércol más agua) que entra al biodigestor, por lo que es fácil determinar el volumen del tanque. Este puede ser un tanque purinero reconvertido a tanque de digestato o una obra nueva. El digestato puede utilizarse en forma líquida, o seca, separando la fracción sólida de la líquida, e inclusive puede ser compostado. Es interesante considerar una cubierta para este tanque, de modo que las aguas lluvias no diluyan su contenido si se quiere hacer un aprovechamiento agrícola como fertilizante del digestato. También se puede considerar poner un cobertor (similar a las que se ponen en las piscinas recreativas) para evitar la volatilización de los compuestos nitrogenados, si se va a hacer un uso agrícola del digestato. Este tanque debe protegerse con un perímetro cercado para evitar la posible caída de animales o personas.

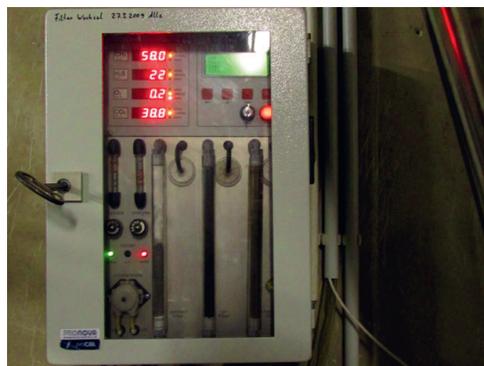


9.1 ¿CÓMO SÉ QUE MI BIODIGESTOR ESTÁ FUNCIONANDO BIEN?

Para lograr el beneficio económico, medioambiental y productivo que el biodigestor ofrece, es importante saber determinar si el sistema se encuentra trabajando en óptimas condiciones. Un biodigestor funciona bien si su digestato no tiene olores fuertes que recuerden al estiércol original (pues el digestato tiene su propio olor característico) y tampoco atrae moscas e insectos. **Este es un primer indicador, muy fácil de evaluar, para saber si se está produciendo una digestión anaerobia completa.** El otro factor es que el biogás generado tenga una concentración de metano suficiente para ser inflamable, simplemente probando si combustiona en un quemador. Estos dos indicadores los puede medir cualquier usuario sin necesidad de aparatos de medición específicos. Sin embargo, los sistemas de monitoreo y control deben siempre encontrarse en funcionamiento, actualizados y vigentes, según lo mencionado en los capítulos 2.3.2 y 2.3.3.

Por otro lado, existen parámetros que podrán ser conocidos a partir del panel de control de los sistemas de producción de biogás "industrializados" o simplemente a través de instrumentos instalados para ello en sistemas de menor escala, por ejemplo: flujómetro de biogás, medidor de pH o acidez, composición del biogás (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S , etc.) y presión del sistema. Un ejemplo se puede apreciar en Figura 38. Estas mediciones son indispensables para saber que el sistema está operando correctamente.

Figura 38. Ejemplo de un medidor de composición de biogás instalado en una planta de biogás en Alemania



Fuente: elaboración propia, 2014

Para asegurarse de no sobrecargar el sistema, es importante cuidar los caudales para los cuales fue diseñado (en términos de agua y estiércoles), sobre todo para evitar desbalances y perjudicar a las bacterias metanogénicas, que son las más sensibles a cambios de pH, temperatura y presencia de oxígeno, y requieren un TRH mínimo para mantener una población estable. Y que son, por lo tanto, el indicador que marca la pauta en cuanto a la estabilidad del sistema bioquímico. Una buena forma de saber que el sistema se encuentra en adecuado funcionamiento es conociendo el % de metano producido. Este valor debería ser estable en el tiempo, ya que será un indicador de la salud de la colonia de bacterias metanogénicas, pero se requiere de aparatos de medida específicos, como el mostrado en la Figura 38.

La producción de biogás debe monitorearse para conocer si hay pérdidas por fuga dentro del sistema, como también en los casos de venta de excedentes o generación de electricidad, determinar cuánta energía se estará produciendo para autoabastecimiento y/o venta de excedentes. Igualmente es importante evitar que haya emisiones a la atmósfera, ya que el metano es 28 a 36 veces más contaminante que el CO₂ en su relevancia entre los gases de efecto invernadero (EPA, 2017).

Por otro lado, hay valores que no es necesario evaluar diariamente. Por ejemplo, conocer el % de remoción de la DQO (Demanda química de oxígeno) ayudará a saber si la planta es efectiva en su objetivo de disminución de carga orgánica, previo a su uso como abono. El DQO se analiza en laboratorio o alternativamente se instala un taller de campo.

En conjunto todos estos valores permitirán obtener una imagen general puntual, y en el tiempo del funcionamiento del digestor y de la producción de biogás, lo que permitirá optimizar el sistema. Lo ideal será disminuir tiempos de nulo o bajo funcionamiento, para lo cual es importante planificar las mantenciones (plan de mantenimiento), predecir y prever repuestos e insumos para no retrasar los procesos de la producción tanto como el uso del biogás y/o electricidad.

9.2 OPTIMIZAR MANEJO, PREVER CRECIMIENTO DE MI PREDIO

Cuando uno convive con un biodigestor se da cuenta que al final se asemeja a tener otro animal más en la lechería, un estómago artificial que come residuos orgánicos y produce biogás y digestato. Como tal, cada biodigestor tiene su propia “personalidad” de acuerdo al tipo de alimentación (estiércol de vaca, añadir suero, otros estiércoles, etc.), la forma en la cual se le provee (frecuencia de carga, dilución, etc.) y el lugar donde está (clima, días soleados, lluvias, etc.). De este modo, al biodigestor hay que conocerlo, entender sus procesos, y observar cómo reacciona a cambios en la alimentación o clima.

Un caso muy típico en los biodigestores donde se acumula el biogás en una cúpula flexible, es que al amanecer (el momento más frío del día), la cúpula aparece medio inflada y cuando sale el sol y calienta a media mañana, la cúpula se infla en su máxima expresión. Muchos usuarios consideran que el calor del sol durante esas pocas horas de la mañana ha ayudado a producir más biogás y por eso se ha inflado la cúpula, pero no. Es un gas y cuanto más calor haga más espacio trata de ocupar. Entonces el biogás al amanecer, con más frío ocupa menos espacio y por eso se ve la cúpula medio inflada y con el calor el biogás que se expande y llena la cúpula. **Este tipo de comportamientos del biodigestor es el que el usuario tiene que aprender a detectar.**

Otro fenómeno vinculado a este tema de la expansión de los gases cuando aumenta la temperatura, es que normalmente un biodigestor rebalsa digestato cuando es cargado, lo que es lógico, ya que el nuevo material entrante al biodigestor, desplaza material ya digerido hacia afuera. Pero se da el caso en algunos tipos de biodigestores que cuando hace calor en el día, también hay rebalse de digestato, aunque no se está cargando el biodigestor en esas horas. Eso es debido a que el calor expande el biogás dentro del biodigestor y es capaz de empujar digestato en el interior haciéndolo rebasar por la salida.

Conociendo que la mayor parte del digestato va a rebalsar en el momento de la carga del biodigestor, y que esta carga normalmente será cuando se lavan los corrales, se puede pensar en combinar esto con la aplicación de digestato. Por

ejemplo, preparando antes de comenzar con el lavado de los corrales la salida del digestato, de modo que se pueda aplicar como riego directo por inundación en pastizales cercanos, a un depósito u otro para después ser bombeados, almacenados, o el manejo que se quiera dar. Este tipo de secuencias de actividades puede ayudar mucho a un manejo eficiente en tiempo del biodigestor. De hecho, la introducción de un biodigestor en una lechería puede servir como motivación para revisar la secuencia de otras actividades de la lechería y optimizarlas.

Otro caso es seguir la analogía del biodigestor como estómago artificial en referente a la cantidad de alimentación. Los biodigestores se diseñan de acuerdo a una cantidad de carga diaria (sustrato) y un tiempo de residencia de esa carga, que será suficiente como para que las bacterias puedan desarrollar la digestión anaerobia (cuanto más frío más tiempo necesitan) y producen biogás y digestato de calidad. Si a un biodigestor se le carga con mayor cantidad de material respecto a la cantidad con la que fue diseñado, se dice que el biodigestor tendrá "diarrea". Esto es que producirá un efluente (que ni siquiera se puede llamar digestato) con olores y producirá menos biogás. Esto se debe a que al aumentar la carga del biodigestor se reduce el tiempo que este material estará dentro del biodigestor y por tanto a las bacterias no les dará tiempo a realizar todo el proceso de la digestión anaerobia. Digamos que en este caso de sobrealimentación el efluente sale demasiado fresco, no ha sido propiamente digerido. Por el contrario, si al biodigestor se le carga con menos cantidad de la recomendada, se dice que está "a dieta" y generará menor cantidad de biogás, ya que las bacterias tienen menos materia prima para producirlo. Pero en este caso de subalimentación el tiempo de retención del material dentro del biodigestor será más largo y las bacterias realizarán una digestión lenta, haciendo que el digestato (en este caso sí es digestato, pues da tiempo de sobra a que ocurra todo el proceso de la digestión anaerobia) no tendrá ningún tipo de olor. El biodigestor también puede tener un corte de digestión, en el caso de un biodigestor diseñado para alimentarse con cierta cantidad de estiércol y suero de leche, y un día o una semana lo cargan con un exceso de suero de leche, en este caso se puede dar un corte de digestión. Se rompe el equilibrio entre diferentes grupos de bacterias y el biodigestor dejará de producir biogás inflamable (producirá más dióxido de carbono que metano) y el digestato saldrá con olor. Entonces, con esta referencia

de estómago artificial es más fácil comprender esta tecnología.

La operación del biodigestor se debe optimizar principalmente en cuanto a carga de trabajo para el cliente y su predio. Las actividades diarias de carga del biodigestor y revisión del sistema deben incorporarse a la rutina de manejo de la lechería. Por ello, debe haber un compromiso entre los requerimientos del biodigestor y las actividades propias del productor, logrando una sinergia positiva. Por ejemplo, la carga se tratará de hacer por gravedad cuando sea posible, aprovechando los canales por donde van las aguas de lavado, de modo que no implique una actividad extra al propio lavado de los pisos. La revisión de las cajas de registro que haya o la apertura o cierre de canales para que las aguas de lavado entren al biodigestor pero no las aguas lluvia, debe integrarse de forma habitual en la rutina de lavado. Es recomendable una visita diaria al biodigestor para tomarle el 'pulso', saber cómo está, analizar los indicadores externos y su correcto funcionamiento, ver que la carga se está realizando sin problemas, que no hay obstrucciones en los canales, o revisar la salida de la digestión y que en este no hay moscas u olores. Estas deben ser actividades de unos pocos minutos que conviene realizar a diario.

¿Qué actividades propias del biodigestor pueden integrarse con otras que ya realizaron en la lechería? Esta es la clave para que el biodigestor se integre en el campo y la lechería, y en el propio manejo de la misma. Para esto no es posible un manual o guía, pues cada lechería es particular, sino la experiencia diaria del usuario. Considerar al biodigestor como un animal más que requiere sus propios cuidados y alimentación, y que produce sus propios productos para el usuario y la lechería, es una buena referencia.

9.3 OPTIMIZAR USOS DE BIOGÁS

El biogás que se produce en un biodigestor puede variar tanto en calidad como en cantidad a lo largo del año. Esto es más común en biodigestores convencionales pues al no tener sistemas de calefacción, dependen de la cambiante temperatura ambiente entre estaciones. En el caso de los biodigestores que consideran sistemas de calefacción también pueden darse variaciones en la producción de biogás

debido al cambio de alimentación de las vacas (que también depende de las estaciones), de la mayor o menor producción de estiércol (también dependiente de las estaciones y principalmente de las lluvias y disponibilidad de forraje). Por lo tanto, es necesario conocer las diferencias de producción de biogás a lo largo del año, para optimizar su uso.

Por ejemplo, durante la época de sequía, podrá convenir usar el biogás para alimentar una bomba que permita el fertirriego del digestato sobre praderas cercanas. Durante la época de lluvias, más fría, pero más abundante en forraje para los animales y por tanto estiércol para el biodigestor y más biogás, quizás los requerimientos estén más enfocados a usos térmicos, como puede ser calentar el biodigestor. De este modo, es necesario tomarle el pulso a la producción de biogás y conocer cómo varía a lo largo del año, para mantener los sistemas fijos de consumo de biogás y evaluar en qué emplearlo dependiendo de la época del año.

Un aspecto importante es cómo gestionar los excedentes de biogás que no se consuman de forma productiva. En este caso es recomendable que el productor primero estime la cantidad de biogás excedente que produce (que quizás es solo durante una época del año) y comience a analizar donde consumirlo. Los usos más interesantes, sencillos y eficientes, son los térmicos: calentar agua, cocinar, calefacción de la casa, oficina o los establos.

El manejo de los sistemas de post tratamiento del biogás, principalmente el condensado del vapor de agua y de filtrado de H_2S , también se pueden optimizar en cuanto a tiempos y automatización dedicados. En el caso del condensado, conociendo cada cuanto tiempo purgar el agua o en qué puntos de la conducción de biogás se puede acumular agua, y ponerle remedio previamente.

9.4 OPTIMIZAR USOS DE DIGESTATO

Los digestatos, aunque comparables, son diferentes entre un predio y otro. La optimización del uso del digestato en el predio es un proceso local que requiere motivación y tiempo. Se recomienda nunca aplicar digestato en horas de alta

radiación solar y reservar las mañanas o tardes para hacerlo. La forma de aplicarlo (riego, aspersión, foliar, etc.) dependerá de las capacidades materiales e interés de cada predio. Se recomienda realizar ensayos en propios suelos y condiciones de cultivo, que permitan conocer el mejor modo y frecuencia de aplicación del digestato. Esto puede variar entre diferentes tipos de suelo y de cultivo. Si en el predio existen otros cultivos frutales, forestales, hortalizas, floricultura, etc., el digestato también puede aplicarse como fuente de nutrientes.

Los análisis fisicoquímicos del digestato pueden ayudar a definir cantidades y frecuencias de aplicación de acuerdo a los cultivos y tipos de suelo. Para realizar pruebas de campo del digestato es importante dejar una parte del cultivo como testigo, sin aplicar digestato (aunque sin olvidar el riego equivalente) y manteniendo la forma tradicional de manejo que venía desarrollando el productor. De este modo, al cabo de unas semanas o pocos meses, se podrán evaluar las diferencias cualitativas apreciables, incluso cuantitativas si es que hay un proceso de medición.

Las pruebas de campo que puedan realizarse pueden estar referidas a los efectos sobre la protección que da el digestato a los cultivos en episodios de heladas, a la recuperación de los cultivos tras las heladas, a mayor productividad y recuperación de suelos, a resistencia a enfermedades y afectación de plagas, entre otras.

El digestato, aunque muchas veces se mide en cantidades de NPK al intentar compararlo con los fertilizantes sintéticos, es mucho más que NPK. Tiene vitaminas, fitohormonas y microorganismos que enriquecen su valor como fertilizante, frente a los sintéticos. Es por esto que optimizar su uso en forma individual es parte de un proceso que cada productor debiera seguir, observar y compartir.

El hecho de producir digestato en grandes cantidades también puede generar actividad económica extra, comercializándolo. Otros productores de la zona de frutales u hortalizas, viveros forestales o municipales, incluso vecinos para sus jardines y flores, pueden estar interesados en comprar digestato. Esto genera toda una nueva línea, pues los digestatos (conocidos como biol en el resto de Latinoamérica) pueden ser enriquecidos y mejorados; normalmente los posibles compradores solicitarán un análisis químico para conocer su composición. En este

punto es necesario recordar de donde procede el valor que se le da al digestato; la forma mineralizada de los nutrientes que contiene. Estos nutrientes son los que estaban ya presentes en el estiércol, pero ¿de dónde salieron? Si un productor no importa insumos de fertilización a sus praderas, o alimento concentrado para sus ganados, entonces si saca o vende digestato fuera de su lechería, estará sacando o vendiendo la fertilidad de sus suelos. Al fin y al cabo, el digestato conserva los nutrientes del estiércol y éste los tiene porque los animales los sacaron los pastizales, y éstos de suelo. Si no hay un reciclaje de nutrientes en el predio, este acabaría sin nutrientes. Entonces es interesante realizar un análisis de la cantidad de nutrientes que entran al campo en forma de fertilizantes externos y alimento concentrado para tener una idea de cuánto digestato se podría sacar fuera de él, sin romper el equilibrio en nutrientes del campo.

9.5 SINERGIAS CON INSTITUCIONES Y MECANISMOS ASOCIADOS

Un biodigestor es un sistema que integra muchos aspectos: energías renovables, agroecología, tratamiento de residuos, cambio climático, eventual autosuficiencia energética y de insumos agrícolas, resiliencia, lucha contra la deforestación, cierre de ciclos de materia orgánica e inclusive calidad del aire y aguas, que permite la relación con otras instituciones de muy diversa índole.

Las universidades son un claro ejemplo, ya que, para ellas, tener acceso a un sistema operado en condiciones reales, donde se pueden considerar aspectos de ingeniería ambiental, mecánica, civil, química, agronómica, física y biología, significa un gran potencial como herramienta didáctica e investigación para los alumnos. De este modo el productor puede aprovechar la realización de análisis físico-químicos de su digestato, ensayos en parcela sobre frecuencia y dosificación de digestatos en diferentes cultivos y tipos de suelo de su predio, aprovechamiento de biogás en otros usos, caracterización del funcionamiento del biodigestor, análisis económicos, etc.

Un biodigestor operativo puede ser un impulsor de visitas de otros productores, o incluso como parte de un turismo rural y concientizado medioambientalmente, abriendo posibilidades de diversificar los ingresos a la lechería. El hecho de que

el productor maneje sus propios residuos y los aproveche en el predio, también es un aspecto que los clientes pueden valorar, dándole valor agregado a los productos. Se puede hacer un sello de buenas prácticas, venta de productos con una menor huella ecológica, profundización con las actividades agropecuarias sostenibles, venta directa a clientes en ferias, mercados locales, etc. Al fin y al cabo, la introducción de un biodigestor en una lechería, y el aprovechamiento de sus productos, aporta un grado de sostenibilidad al productor, que muchos sabrán valorar, pero para ello es necesario hacerlo visible y accesible.

Otras posibles sinergias pueden surgir al relacionarse con otros productores de residuos, por ejemplo, o pequeñas y medianas empresas demandantes de calor, cervecerías artesanales, queserías, mermeladas, etc. ya que el productor agropecuario usuario del biodigestor puede estudiar la posibilidad de tratar los residuos de estos otros emprendimientos en su propio biodigestor, previo estudio de factibilidad. Este estudio puede ser desarrollado por un consultor o empresa especializada, pero también puede ser parte de las sinergias desarrolladas con las universidades cercanas.

9.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA CONTINUA

Un productor que instale un biodigestor en su predio puede evaluar fácilmente el impacto económico del mismo. Si llevaba un registro de los costos directos de su producción, principalmente en aspectos de consumo de energía y consumo en fertilizantes, podrá comparar los gastos asociados a estos rubros antes y después del biodigestor.

Dependiendo de cada caso el biodigestor puede estar desplazando consumo de GLP o electricidad, incluso vendiendo electricidad a la red y generando un ingreso adicional. Las facturas mensuales de consumos energéticos antes y después le dirán al productor lo que ha significado integrar un biodigestor en su lechería. Por supuesto hay que considerar que, si se ha instalado un biodigestor y además se ha invertido en nuevas infraestructuras, maquinaria o ampliado el número de animales, se dificultará identificar los ahorros en gastos en energía que supone producir y usar el biogás en la lechería.

El otro aspecto es el uso del digestato, que tiene varios impactos. Por un lado, reduce gastos en fertilizantes químicos y por otro puede aumentar la productividad de los cultivos incluso por encima de los valores obtenidos con el uso de fertilizantes sintéticos. Esto se debe a que un buen uso del digestato incide además en un buen uso del agua, programando fertirriego durante los meses de estiaje y aportando nutrientes durante los meses de lluvias. En el medio plazo, además, las pasturas mejorarán su fertilidad y productividad. En esta situación, incluso si el productor no estaba llevando un registro de los costos directos de su actividad lechera, será fácil recordar cuántos sacos compraba de fertilizantes sintéticos antes del biodigestor y cuántos compra ahora. También podrá apreciar si existe una mayor producción y calidad de los forrajes, en la calidad y cantidad de leche producida a lo largo del año.

Finalmente, al incrementar el autoabastecimiento energético de la lechería al instalar un biodigestor, el productor podrá apreciar cómo sus costos ya no dependen de posibles fluctuaciones del precio de la energía, ya sea eléctrica o GLP. Del mismo modo, el reciclaje de nutrientes en el campo a través del aprovechamiento del digestato, incrementa la autonomía respecto a los recursos e insumos necesarios, haciéndolo menos dependiente de insumos sintéticos externos y de la fluctuación de precios que se pueda dar.



Para seguir profundizando en el mundo de los biodigestores cada vez se encuentra más información en castellano, pero es cierto que la mayoría se encuentra en inglés. Una búsqueda en Google de cualquiera de los términos “digestión anaerobia”, “biogás”, “biodigestor”, “digestato” devolverá multitud de resultados y a veces es difícil identificar cuáles serán los documentos o páginas más interesantes. Para dar un filtro, a continuación, se muestran una serie de documentos y webs que se pueden consultar en internet. Esta selección no trata de ser definitiva ni completa, pero sí un muestrario de documentos relevantes para el tema.

10.1 SOBRE BIODIGESTORES Y BIOGÁS

- En la página web del programa lechero, del Ministerio de Energía de Chile, en su sección de biblioteca tiene información muy útil y atinada a las realidades chilenas. Lo pueden encontrar en: <http://www.minenergia.cl/biogaslechero/>.
- La página web de la Red de Biodigestores de Latino América y Caribe (RedBioLAC) se ofrece un apartado de “documentos y archivos” muy interesantes, con recopilación de material de difusión, manuales de biodigestores, experiencias y todas las presentaciones que se han ido realizando a lo largo de los últimos en los congresos anuales. Estas ponencias pueden servir para ver los avances, retos y experiencias en la actualidad latinoamericana en el contexto de los biodigestores. www.redbiolac.org
- La revista de la Universidad Técnica Nacional de Costa Rica “UTN informa al sector agropecuario” ha publicado diversos artículos sobre la introducción de biodigestores en el sector agropecuario: <http://www.utn.ac.cr/content/revista-de-atenas>. Una selección de estos artículos se encuentra en: <http://www.viogaz.com/publicaciones.html>
- La reciente publicación del libro “Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en Latinoamérica y el Caribe” editado por la RedbioLAC, muestra los retos del sector de los biodigestores en la región desde diferentes puntos de vista. Este documento está dirigido a tomadores de decisiones y se puede descargar en: <http://reddigestatoac.org/2016/11/ya-esta-disponible-la-publicacion-sobre-biodigestores-en-version-digital-descarguela-aqui/>
- Ecuador, en 2015, publicó un libreto titulado “Introducción de Biodigestores

en Sistemas Agropecuarios en el Ecuador” donde se realiza una introducción a los biodigestores convencionales, y mediante ejemplo se visualiza el potencial de esta tecnología en el contexto ecuatoriano. Se puede descargar en: http://beegroup-cimne.com/kt-content/uploads/2017/02/2015_Manual_Biodigestores_Ecuador.pdf

10.2 EN INGLÉS

- Libro publicado online por la FAO que contiene toda la información biológica, técnica sobre la digestión anaerobia y los biodigestores en general: <http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E00.htm#Contents>
- Hedon, household energy network <http://www.hedon.info/tiki-index.php>
- Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI) <https://www.sei-international.org/tools>.
- Compendio de tecnologías y sistemas de tratamientos de saneamiento: <http://ecompendium.sswm.info/sanitation-technologies>
- Compendio de tecnologías y aprovechamiento de biogás: <http://bio-gas-plant.blogspot.com/>
- Sobre el interés de desarrollar plantas de biogás con sustratos propios del campo, en escala pequeña (<180 kW) <http://www.bioenergyfarm.eu/en/downloads-links/>
- En inglés existe un documento interesante en que se repasan experiencias de biodigestores en diferentes países del mundo, enfocados al “biogás productivo”, que es la escala intermedia entre los biodigestores domésticos e industriales. Fue publicado por SNV y FACT en 2014 y se puede encontrar aquí: <http://beegroup-cimne.com/kt-content/uploads/2016/07/Productive-Biogás-current-and-future-development-2014.pdf>
- Una página de la Universidad de Florida, USA; <http://biogás.ifas.ufl.edu>

10.3 SOBRE USOS DEL DIGESTATO

El uso del digestato ha despertado mucho interés en los últimos años y como resultado existen actualmente diferentes manuales de uso que pueden servir de referencia. A continuación, se muestran algunos de estos documentos publicados en castellano:

- El Digestato: Fertilizante supremo (Hivos, 2015)
- Manual de Digestato (Sistema Biobolsa, 2016): <http://sistemabiobolsa.com/wp-content/uploads/2016/09/MANUAL-DE-DIGESTATO-MX-2016.pdf>
- Guía del aprovechamiento del Biogás y el Digestato (Hivos, 2015):

En inglés se encuentran los trabajos publicados por la FAO y SNV:

- Bio-Slurry as fertilizer (SNV, 2014): https://www.nmi-agro.nl/images/NMI_Alterra_1527_Bioslurry.pdf
- Bio-slurry = Brown Gold? (FAO, 2013): www.fao.org/docrep/018/i3441e/i3441e.pdf
- Aguas Andinas. (Agosto de 2010). Proyecto de biogás: Nueva energía para Santiago. Recuperado de <http://www.expansiva.cl/media/archivos/20100819181526.pdf>

- Avalos P., V. (2013). Situación y perspectivas de la Bioenergía en Chile. Euroclima Bioenergy Workshop . Santiago: Ministerio de Energía de Chile.
- Bioenergy farm (2017): Online feasibility calculator. Recuperado de : <http://www.bioenergyfarm.eu/en/tool-scan/>
- Bley Jr, C. (2014). Biogas, la energía invisible. (I. B. CIBiogas, Ed.) Sao Paulo: CiBiogas.
- Consorcio Lechero. (2012). Manual de manejo y utilización de purines de lechería. Osorno, Chile: Consorcio Lechero.
- Consorcio Lechero. (2015). Indicadores del sector lechero productivo.
- Demanet F., R. (2014). Manual de especies forrajeras. Valdivia: Pplan Lechero Watts.
- División EERR, MinEnergía. (2016). Compendio cartográfico regionalizado, proyectos de EERR en Chile.
- Dumont, J. (2000). Manejo eficiente de purines. (INIA, Ed.) Osorno, Chile .
- EC-Programme IEE Intelligent Energy Europe. (2015). Recuperado de BIOGASHEAT – Development of sustainable heat markets for biogas plants in Europe: <http://www.biogasheat.org/>
- EPA. (16 de Agosto de 2017). Greenhouse gas emissions. Recuperado de Understanding Global Warming Potentials: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- Fachverband Biogas e. V. (November de 2016). [www.http://biogas-safety.com](http://biogas-safety.com). Recuperado de [http://biogas-safety.com/Download/biogas_spa.pdf](http://biogas-safety.com/Download/biogas_safety_spa.pdf)
- Fernandez, J. (s.f.). Humedales artificiales para depuración. En Manual de fitodepuración (págs. 79-89). Universidad politécnica de Madrid.
- FNR. (2010). Guía sobre el biogás, desde la producción hasta el uso. Gülzow: FNR, (BMELV) Ministerio Federal de Alimentación y Protección al Consumidor.
- Fulford, D. (2015). Small-scale Rural Biogas Programmes: A Handbook. Practical Action Publishing.
- Gallozi, R. P. (2012). Biofertilisers help fight coffee rust disease in Honduras. SNV.
- Gerbio. (2014). Abstract booklet of the International Conference. Progress in Biogas III-Biogas production from agricultural biomass and organic residuos (pág. 161). Stuttgart: IBBK.
- Groot, L. D. (2013). Bioslurry= Brown Gold? A review of scientific literature

- on the co-product of biogas production. Rome: FAO.
- INDAP, GORE Los Ríos). (2016). Biogas de recursos agropecuarios en la región de los Ríos. Valdivia: INDAP.
 - INE. (20 de Septiembre de 2015). Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Recuperado de www.odepa.cl: <http://www.odepa.cl/estadisticas/productivas/>
 - INIA. (2016). Fortalecimiento del marco regulatorio, capacidades técnicas y cartera de proyectos para el desarrollo de una industria local de biogás en el sector lechero. Osorno.
 - INN. (2015). Digestato, requisitos de calidad. Santiago.
 - Leal, C. (2008). Estimación del costo de implementar producción limpia en predios lecheros de alta producción de la décima y decimocuarta regiones. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
 - Martí, J. (2013). Biodigestores en Bolivia: Desarrollo, difusión e implementación de tecnologías apropiadas en el área rural. La Paz: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Recuperado de http://beegroup-cimne.com/kt-content/uploads/2016/07/Biodigestores-Lecciones-Bolivia-2014_compressed.pdf
 - Martí-Herrero, J. C. (2014). Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. . Renewable Energy, 71, 156-165.
 - Ministerio de Energía. (2017). Resultados preliminares, estudios de pre-factibilidad de plantas de biogas en Chile. Santiago.
 - Ministerio de Energía de Chile. (2016). Fortalecimiento del marco regulatorio, capacidades técnicas y cartera de proyectos para el desarrollo de una industria local de biogás en el sector lechero. Ministerio de Energía de Chile. (2016). Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017),. Gobierno de Chile.
 - Ministerio de Energía, GIZ. (2012). Guía de planificación para proyectos de biogas en Chile. Santiago.
 - Ministerio de Energía, PNUD, FAO, GEF. (2011). Manual de biogás. Santiago de Chile: FAO.
 - ONUDI, MinEnergía, SEC. (2016). Guía didáctica para el registro de plantas de biogas en Chile. 38.
 - Resources, A. f. (2010). Guide to biogás for production use. 5th Edition.

Gülzow: GIZ.

- Roos, K. F. (1997). Agstar Handbook: A manual for developing biogas systems at commercial farms in the United States. United States Environmental Protection Agency. EPA.
- Rutz, D. M. (2015). Sustainable heat use of biogas plants. Munich, Germany: WIP Renewable Energies.
- Salazar S., F. (2012). Manual de Manejo y Utilización de Purines en Lechería. Osorno: Consorcio Lechero.
- SNV. (2001). Biogas support programme.
- SNV. (2011). Technology and mass dissemination experiences from Asia. Oldenburg.
- SNV. (2017). SNV Organization. Recuperado de <http://www.snv.org/>.
- SNV and Hivos. (2016). African Biogas Partnership Program. Recperado de <http://www.africabiogas.org/>
- SNV, Netherlands Development Organisation. (2014). Productive Biogás. Current and future development. Obtenido de [www.snv.org: http://www.snv.org/public/cms/sites/default/files/explore/download/snv_fact_productive_biogas_2014_final.pdf](http://www.snv.org/public/cms/sites/default/files/explore/download/snv_fact_productive_biogas_2014_final.pdf)
- Valdovinos, R. (2015). Diagnostico energético del sector lechería en la Región de Los Ríos. (M. d. INDAP, Ed.) 125.
- Varnero, M. S. (2016). Alternativa a la quema de rastrojos mediante inoculantes provenientes de biodigestores. Santiago de Chile: Centro AGRIMED.
- Walsh, J. L. (1988). andbook on biogas utilization. Atlanta, GA. USA: Prepared for US Department of Energy, Southeastern Regional Biomass Energy Program. Prepared by Georgia Institute of Technology, Engineering Technology Branch.
- Warnars, L. O. (2014). Bioslurry: a supreme fertiliser. A study on bioslurry results and uses. HIVOS.
- Wellinger, A. M. (2013). The biogas handbook: science, production and applications. Elsevier.

12.1 EL MARCO REGULATORIO OBLIGATORIO, EN MÁS DETALLE

12.1.1 TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Existe una serie de artículos y decretos que son comunes al tema de tratamiento de residuos:

- **Artículo 71 del Código Sanitario (Autoridad Sanitaria):** establece que cualquier proyecto relacionado a la construcción, reparación, modificación y ampliación de obras destinadas a la evacuación, tratamiento o disposición de desagües y aguas servidas que proporcionen agua potable, riego o balneario, sin previo tratamiento, lo que debe ser aprobado por la autoridad sanitaria. La Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) de salud tiene el rol de fiscalizar y sancionar las infracciones. Infringir el código sanitario significa una multa de hasta 1.000 UTM y eventualmente la clausura del establecimiento, por asociarse a problemas de salud de las personas, directamente.
- **Decreto supremo n° 609** establece condiciones a las emisiones que se viertan en el alcantarillado.
- **Decreto supremo n° 90/2000** la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es el agente fiscalizador del cumplimiento de los niveles de contaminación de asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y aguas continentales superficiales. La tabla 9 muestra los valores máximos permitidos de carga contaminante y los aspectos que considera. Estos son equivalentes a la contaminación por aguas servidas de una población de 100 personas.
- **Decreto supremo n° 46/2003** la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), junto a la Autoridad Sanitaria y la Dirección General de Aguas (DGA) fiscalizan que se cumpla la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas, ya que estas sirven para el consumo humano rural y urbano.
- **Decreto supremo n° 236/1926** del Ministerio de Salud, que aprueba el reglamento general de alcantarillados particulares, los que se definen exclusivamente para el uso humano. Conforme a esto no se permite la

incorporación de aguas servidas domésticas a los purines, considerando un elevado riesgo sanitario para el ambiente y las personas.

1.2.1.2 REGULACIÓN MARCO, ESPECÍFICA A PROYECTOS DE BIOGÁS

Específicamente en relación al biogás hay 1 reglamento y 2 normas chilenas:

1. Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017) de diseño, construcción y operación de instalaciones de biogás (SEC, Superintendencia de Seguridad y Combustibles).
2. Norma chilena 3381, Gestión de residuos, consideraciones para el diseño y operación de plantas de digestión anaeróbica (INN).
3. Norma chilena 3375, Requisitos de calidad digestato (INN).

1.2.1.3 REGLAMENTO DE SEGURIDAD DE LAS PLANTAS DE BIOGÁS DEL MINISTERIO DE ENERGÍA (2017) DE INSTALACIONES DE BIOGÁS

En la actualidad el reglamento (decreto n°119 del ministerio de energía) da directrices de seguridad básicas, para su cumplimiento y seguimiento a partir de sistemas de producción de biogás con fines energéticos o alternativamente el uso o consumo de biogás proveniente de la captura de metano en rellenos sanitarios. El reglamento determina 4 escalas de biodigestores y para cada una de ellas define grados de complejidad y materialidades diferentes acordes a las implicancias de las diversas escalas. Desde su puesta en vigencia, el 2 de agosto de 2017, existe la obligación de velar por el cumplimiento de los artículos y definiciones descritas en ella, obligatoriamente.

Para la escala en que se enfoca el proyecto Biogás lechero, aplican los artículos que se relacionan a las escalas: pequeña y mediana según la estimación de producción y uso del biogás en cada plantel lechero.

- Comprende todas las etapas del proceso, desde el tratamiento y manejo de los sustratos, diseño y construcción, hasta el uso (operación y mantención) del biogás en las instalaciones correspondientes.

- Establece responsabilidades, inspecciones periódicas.
- Solicita notificaciones de inicio de obras, registros de producción de biogás, término definitivo de operaciones de plantas de biogás y la comunicación de informes de accidentes e incidentes.
- Considera instalaciones hasta la etapa de suministro a redes concesionadas o distribución.
- En casos de rellenos sanitarios, desde tuberías de transferencia de biogás producido por la ocurrencia espontánea de biogás a partir de la digestión de la materia orgánica.

Instalador de gas clase 4: La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) otorga esta categoría según los requisitos establecidos en el DS 191. Según el Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017) de las plantas de biogás (art. Primero) la presentación del proyecto la debe realizar un instalador de gas certificado para asegurar parámetros homogéneos de calidad y seguridad. En cada una de las instalaciones de biodigestores de la escala de los proyectos de esta guía (>100 kW), debe existir un instalador o instaladora certificada por la SEC y se deben utilizar aparatos que hayan sido diseñados, fabricados o adaptados para su uso con biogás. De igual forma el diseño, construcción, modificación, reparación e intervención de instalaciones de biogás sólo podrá realizarlo un instalador autorizado.

1) Registro de plantas de biogás en Chile

Existe una guía didáctica para el registro de plantas de biogás en Chile¹⁴, fue elaborada gracias al Ministerio de Energía, ONUDI y GEF (ONUDI, MinEnergía, SEC, 2016) En ella se describen los procesos que se requieren para iniciar el proyecto y las oficinas a las cuales habrá que acercarse, además de los documentos que se requerirán de principio a fin. Un resumen se puede encontrar en la Figura 39.

Entre estos se solicitan formularios, documentos, la solicitud de cumplir con los aspectos técnicos que se establecen en el Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017) de diseño, construcción y operación

¹⁴ <http://www.biogáslechero.cl/novedades/noticias/guia-didactica-registros-plantas-de-biogás-en-chile/>

Figura 39. Resumen de la guía didáctica para el registro de plantas de biogás en Chile



Fuente: Biogás Lechero, 2017

de instalaciones de biogás y el cumplimiento de la futura resolución exenta. Según los casos de estudio aquí analizados, los casos A, B, C y D, corresponden respectivamente a lo mencionado en la Tabla 24.

Tabla 25. Casos de estudio mencionados en esta guía

Productor	Producción de biogás diario (m³/d)	Potencia nominal kW	Clasificación
Mariela	18,9	3,1	Planta pequeña
Jaime	428,4	69,6	Planta pequeña
Joaquín	71,4	11,6	Planta pequeña

Fuente: elaboración propia, 2017.

Las categorías van entre los siguientes rangos de potencia nominal¹⁵: pequeña hasta los 180 kW, mediana entre los 180 y los 900 kW y grande cuando producen más de 900 kW. Y también se clasifican según su uso: industrial para procesos productivos o manufactureros, domiciliaria para uso residencial o comercial a beneficio directo de los ocupantes de las edificaciones o de quema de biogás cuando se trata de proyectos de captura de biogás desde rellenos sanitarios y no existe aprovechamiento de la energía.

Algunos otros puntos fundamentales al respecto son los siguientes:

1. La SEC, supervisa y fiscaliza los proyectos bajo el mandato del Ministerio de Energía.
2. La presentación del proyecto debe hacerla un instalador de gas certificado Clase 4.
3. El proceso inicia una vez terminada la ingeniería del proyecto, junto a su construcción se debe llenar la "notificación de inicio de obras" en la página web de SEC.
4. Finalizada la construcción llega el momento de llenar el formulario "Declaración de plantas de biogás".
5. SEC revisará los formularios e incluso visitará el lugar para comprobar que todo está en orden según la información recibida. De esta manera SEC se manifestará conforme y continuará con el proceso de registro. De lo contrario se harán las observaciones correspondientes para llevar a cabo correcciones.

¹⁵ Por potencial nominal se entiende: Capacidad energética (kW) que potencialmente puede ser generada por una planta de biogás. Se calcula multiplicando el caudal de metano teórico producido (Nm³/h) por el poder calorífico inferior (kWh/Nm³) del biogás. Para los cálculos de la tabla 24 no se ha normalizado el biogás y se ha considerado un 65% de CH₄ en el biogás.

6. Una vez solucionadas las correcciones, la SEC realizará el registro de la planta y entregará el número de registro que acredita que puede operar bajo las normativas de seguridad chilenas y puede, por lo tanto, iniciar su puesta en marcha. Todo el detalle en la figura 39 (abajo).
7. Se deben detallar los principales procedimientos de cada una de las áreas de la planta, además de describir los sistemas de monitoreo y control.
8. Certificaciones y catálogos de los equipos utilizados en la construcción y montaje son necesarios.
9. El registro no conlleva gastos en SEC, sin embargo, los gastos y/o honorarios que recibe el instalador certificado deben ser absorbidos por el propietario del biodigestor. Gastos asociados a modificaciones requeridas por SEC también son responsabilidad del propietario del proyecto.
10. Plantas existentes y en funcionamiento deben registrarse ante SEC, lo mismo las modificaciones que se hagan y sobre todo afecten la potencia nominal de la planta o que mejoren la concentración de metano del biogás.
11. Las únicas plantas de biogás que no requieren registro (independiente de la escala) son las plantas piloto, las que se caracterizan por operar un periodo determinado y no tener montaje ni obra civil permanente.
12. La regularización eléctrica de la instalación, o de combustibles y el ingreso al sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) son independientes del registro de la planta ante SEC.
13. Cambios de propietarios, como también el cierre definitivo de las instalaciones de biogás deben ser notificadas.
14. El reglamento establece consideraciones para el diseño y la construcción, así como también la operación, mantenimiento e inspección de las plantas.

12.1.4 NORMA CHILENA DE 3381, GESTIÓN DE RESIDUOS, CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA (INN).

Cabe mencionar que en este documento se establecen:

- a. Alcances y campo de aplicación: consideraciones de diseño y operación, pero se excluyen materias de seguridad asociadas. Se clasifican las plantas

- según la materia prima a procesar.
- b. Requisitos de diseño: generalidades, tipo y cantidad de materia prima, características del sitio, manejo de olores, manejo de emisiones y descargas, manejo de percolados, manejo de aguas lluvia, consideraciones climáticas y geográficas, el destino de la materia orgánica digerida y un plan de contingencia en caso de comportamiento anormal.
 - c. Requisitos de operación: control de la materia prima, nutrientes, pH, t°, alcalinidad, tóxicos e inhibidores, monitoreo del proceso de digestión anaeróbica, controles a la salida del proceso.
 - d. Registros del proceso previamente mencionado
 - e. Requisitos del producto (digestato).

12.1.5 NORMA CHILENA 3375, REQUISITOS DE CALIDAD DIGESTATO (INN).

Esta norma determina las pautas de calidad sobre el digestato que (únicamente) sería comercializado en la agricultura, y las condiciones en que este debe ser producido, por ejemplo:

- a. El digestato debe provenir de la digestión anaeróbica.
- b. Establece los tipos de materia prima que pueden utilizarse con estos propósitos.
- c. Se excluyen productos de la acumulación ocurrida en lagunas de almacenaje, pozos y estanques.
- d. Ofrece referencias normativas.
- e. Términos y definiciones.
- f. Los requisitos de calidad propiamente generales, de la materia prima, sanitarios, físicos y químicos, los parámetros a informar.
- g. Métodos y ensayos.
- h. Muestreo y preparación de las muestras en laboratorio.
- i. Registros.
- j. Rotulados del producto.
- k. Ficha técnica que deberá ofrecer el producto.

12.1.6 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

En cuanto a la evaluación de impacto ambiental la “Guía para la evaluación de impacto ambiental” establece que las plantas que produzcan biogás deben proceder a una evaluación ambiental que sigue un procedimiento según el tipo de proyecto. En general los pasos son los siguientes:

- a. Descripción del proyecto: antecedentes generales, localización y superficie del proyecto, partes y obras del proyecto, fase de construcción del proyecto, fase de operación del proyecto y fase de cierre del proyecto.
- b. Efectos, características y circunstancias del artículo 11 de la ley n° 19300: impactos ambientales más frecuentes de este tipo de proyecto, pertinencia de presentar una declaración o un estudio de impacto ambiental, consideraciones de la evaluación de impacto ambiental.
- c. Normativas ambientales aplicables, a continuación, se tabulan los decretos supremos que tienen que ver con el emplazamiento del proyecto generador, se invita adicionalmente al titular a revisar las normas ambientales de carácter municipal o regional más relevantes relacionados a esta actividad. Existen normas específicas a la actividad, cómo también otras relacionadas a las partes, obras, acciones, emisiones residuos y sustancias peligrosas del proyecto. Por último, normas relacionadas con componentes ambientales y permisos ambientales sectoriales a tomar en consideración.

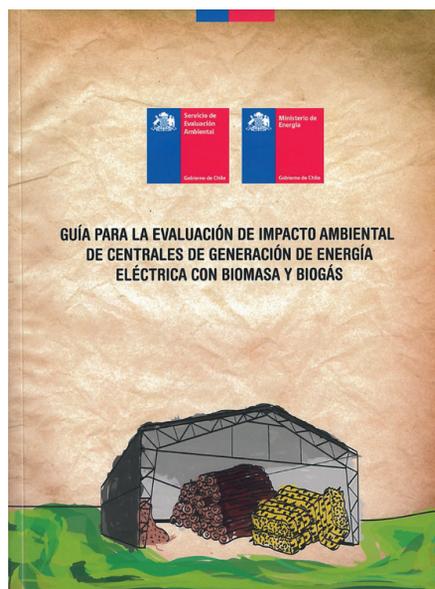


Tabla 26. Tabulación resumen de decretos supremos que están vinculados a biogás

Decretos supremos	Organismo competente	Materia regulada	Consideraciones especiales
DS n° 144/1961	Ministerio de Salud	Regula emisiones o contaminantes atmosféricos producto de la construcción, operación y cierre, ocasionados por movimiento de tierras, tránsito de vehículos y funcionamiento de maquinaria.	A cumplir: los gases, vapores, humos, polvo, emanaciones, contaminantes deberán captarse o eliminarse en forma tal que no causen peligros, daños o molestias al vecindario.
DS n° 47/1992	Ministerio de vivienda y urbanismo	Materia regulada: emisiones a la atmosfera de ruido, polvo y material, debido a la ejecución de actividades.	A cumplir: medidas de control de ruido, polvo y material (riego, pavimentos estables, transporte de materiales en caminos cubiertos, lavado lodo ruedas, etc.).
DS n° 38/2011	Ministerio de Medio Ambiente	Obligación a declarar emisiones de ruido por fuentes emisoras.	A cumplir: niveles máximos según lo establecido por horario y zona geográfica del país.
DS n° 236/1926	Ministerio de higiene, asistencia, previsión social y trabajo	Regula las emisiones al agua durante la construcción, operación y cierre: generación de aguas servidas (aguas negras) provenientes de las instalaciones sanitarias de trabajadores y la imposibilidad de conectarse a una red de alcantarillado público.	Fiscaliza SEREMI de salud. A cumplir: disponer de sistema de alcantarillado.
DS n° 725/1967	Ministerio de salud	Regula la emisión de aguas servidas durante construcción, operación y cierre.	Por cumplir: Respetar la prohibición de descargar aguas servidas, residuos industriales o mineros en ríos o lagunas, u otra fuente o masa de agua que sirva para proporcionar agua potable a una población, riego, o balneario, sin antes depurarla según artículo 73.

DS n° 90/2000	Ministerio secretaria general de la presidencia	Cumplimiento de los niveles de contaminación de asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y aguas continentales superficiales.	A cumplir: Respetar límites máximos permitidos, condiciones establecidas en la norma y realización de monitoreos de la norma de emisión descarga residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es el agente fiscalizador.
DS n° 609/1998	Ministerio de obras públicas	Establece una norma de emisión que regula contaminantes asociados a descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. Durante la operación.	Fiscaliza la superintendencia de servicios sanitarios, debiendo cumplirse los límites máximos permitidos, además de las condiciones establecidas por la norma y los monitoreos que establece la misma.
DS n° 594/1999	Ministerio de salud	Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en lugares de trabajo. Regula residuos, emisiones y sustancias peligrosas, y aguas servidas.	Organismo fiscalizador: SEREMI de salud. Por cumplir: respetar la prohibición de vaciar a la red pública de desagües de aguas servidas, sustancias peligrosas (art 16) así como en napas de aguas subterráneas, o arrojar a cursos o cuerpos de aguas superficiales las aguas contaminadas con productos tóxicos sin previa neutralización. El tratamiento se puede hacer fuera del predio (art 19). En caso de faenas temporales se deben disponer de baños químicos (art 24). Aguas servidas (art. 26).
DS n° 75/1987	Ministerio de transporte y telecomunicaciones	Establece condiciones para el transporte de cargas durante construcción, operación y cierre, para evitar emisiones a la atmosfera, agua y suelo.	Fiscaliza: carabineros e inspectores municipales. A cumplir: adoptar medidas apropiadas para evitar derrumbes o dispersión de material.

DS n° 298/1994	Ministerio de transporte y telecomunicaciones	Regula el transporte de carga peligrosa por calles y caminos, las que presenten riesgos para la salud de las personas, la seguridad pública o el medio ambiente.	A cumplir: Condiciones, normas y procedimientos.
DS n° 3557/1981	SAG	Regula emisiones, residuos y sustancias peligrosas generadas, o el uso que pueda contaminar el suelo.	A cumplir: considerar la manipulación de productos que contaminen la agricultura, y adoptar medidas técnicas y prácticas previas que eviten o impidan contaminar.
DS n° 46/2003	SISS	Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.	

Fuente: elaboración propia, 2017.

Tabla 27. Normas ambientales que pueden aplicar a una planta de biogás

Identificación de la norma (Ley, DFL, DL, DS, resolución)	Organismo competente	Materia regulada	Consideraciones especiales
Artículo 10 de la LBGMA	2012 Ministerio de energía y el SEA (Servicio de Evaluación ambiental)	Impacto ambiental de centrales de generación de energía eléctrica con biomasa y biogás.	Define un proceso de evaluación ambiental de los proyectos. Se inicia con una descripción del proyecto, ubicación geográfica, sus partes y obras, fase de construcción, fase de operación, y cierre del proyecto.
Ley n°20.283	DS n°93 y n° 82 Ministerio de Agricultura	Regula la intervención de bosque y flora nativa, la alteración de su hábitat, flora leñosa, y suculentas, durante la construcción.	A cumplir: respetar prohibición de intervención a menos de 500 metros de glaciares, o eventualmente cumplir con requisito de excepcionalidad, para intervenir. Además de respetar prohibiciones y normas establecidas en reglamento de suelos, aguas y piscinas.
Ley n° 18.378	Deroga ley 15.020 y DFL n° RRA 26 de 1963	Durante construcción, regula las intervenciones de árboles y arbustos.	Cumplir formas y condiciones que la autoridad determine (art 4).
Ley n° 4.601	DS n°5 de 1998, Ministerio de Agricultura	Regula al habilitar caminos de acceso, instalación de faenas, u otras obras.	A cumplir: respetar prohibiciones de caza, captura de fauna silvestre, levantar nidos, destruir madrigueras, recolectar huevos y crías.
Ley n° 17.288	DS n° 484 de 1990 del ministerio de educación	Regula la realización de excavaciones, construcción, u otras obras.	A cumplir: denunciar inmediatamente la existencia de ruinas, yacimientos, piezas u objetos de carácter histórico, antropológicos o arqueológicos. (Art 26).

Fuente: elaboración propia, 2017.

12.2 ENTIDADES QUE HAN APOYADO LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES

En Chile el desarrollo de biodigestores en esta escala productiva es limitado en la actualidad, aunque ha aumentado y se ve apoyo a partir de algunas iniciativas y programas que han iniciado sus actividades en los últimos años.

Además del **programa de biogás lechero**, existe en la actualidad un programa de biogás para las PYMES del sector porcino de la zona central, ejecutado por SEREMI de Energía de la RM, y la colaboración del ex Consejo de producción limpia (CPL) ahora Agencia para la sustentabilidad y el Cambio Climático¹⁶ y financiado por CORFO. El programa buscará promover el uso de las tecnologías energéticas y ambientales para el tratamiento de purines de cerdo, hacer la producción de carne de cerdo más sostenible, con menor emisión de GEI y amoníaco, reducción de olores y mayor vinculación con comunidades aledañas. Este proyecto tiene una duración de 18 meses e inició sus actividades en noviembre de 2016.

••••• **“Programa de Transformación Tecnológica Energética y Ambiental para el Segmento PyME de la industria porcina”** •••••

Se recomienda la utilización del “Buscador de financiamiento para proyectos de ERNC”. A través de esta herramienta se puede conocer y acceder a los fondos disponibles relacionados con las energías renovables no convencionales <http://www.minenergia.cl/pfinanciamiento>, los que varían cada año y no son necesariamente específicos al biogás. Sin embargo los proyectos de biogás podrían cumplir con los criterios para postular.

Históricamente, el Ministerio de Energía (a través del Fondo de Acceso a la Energía, por ejemplo), el Ministerio de Medio Ambiente (FPA), CORFO, INDAP, FIA (Proyectos de energías renovables no convencionales para el sector agroalimentario y forestal), SERCOTEC, AChEE, y la Agencia para la Sustentabilidad y el Cambio Climático han apoyado u otorgado el financiamiento de proyectos para la generación de capacidades e implementación de proyectos en torno al biogás.

¹⁶ <http://www.agenciasustentabilidad.cl/>

Dentro del mundo de cooperación chileno-alemán también se ha desarrollado un proyecto específico en eficiencia energética y uso de ERNC en la agroindustria, el “Smart Energy Concept”. El que busca mejorar la competitividad del sector, disminuyendo la emisión de GEI en el país. La iniciativa se ejecuta en conjunto entre CAMCHAL (Cámara Chileno-Alemana de Comercio e Industria) y la AChEE (Agencia Chilena de Eficiencia Energética), financiado por el Ministerio del Medio Ambiente Alemán.

Adicionalmente, las siguientes Universidades chilenas realizan, o han realizado, investigación activa en el tema:

- Universidad de Chile, facultades de agronomía, ciencias, ingeniería.
- Universidad de Concepción.
- Universidad de Playa Ancha.
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Núcleo Biotecnológico de Curauma).
- Universidad Austral de Chile (Grupo Biogás del Sur; Dr. Alfredo Erlwein).
- Universidad Adolfo Ibañez.
- Universidad de la Frontera (Núcleo científico tecnológico en Biorecursos).
- Universidad Técnica Federico Santa María.
- Universidad Católica de Chile.
- Universidad de Los Lagos.
- Universidad Católica de Valparaíso.

12.3 ASISTENCIA TÉCNICA

La **Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)** ha venido impulsando desde 2016 - a través de diferentes actores - la posibilidad de certificarse como instalador de gas clase 4 (categoría que otorga la SEC de acuerdo a los requisitos establecidos en el DS 191), ya que según el Reglamento de Seguridad de las Plantas de biogás del Ministerio de Energía (2017) de las plantas de biogás (art. Primero) la presentación del proyecto la debe realizar un instalador de gas certificado.

El **convenio de cooperación intergubernamental** implementado por el Ministerio de Energía y la Agencia de Cooperación alemana (GIZ) inició en 2004 el **proyecto Energías Renovables No Convencionales**. El que se ha traducido en una fuerte asistencia técnica para el desarrollo de estudios, la instalación de estaciones de medición, análisis de potencial de recursos, diseño e implementación de pilotos, capacitación de profesionales y técnicos, proyecciones de largo plazo y soporte analítico al perfeccionamiento del marco regulatorio, entre otros.

La primera publicación del proyecto, es una guía que complementa conocimientos y ofrece mucha de la información necesaria de conocer en torno al biogás: "Potencial de biogás" describe a detalle la identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás y su uso en producción de electricidad o calor (Publicado en 2007 por la CNE y GIZ, ex GTZ).

En materia de biogás y en conjunto con el Ministerio de Energía, se desarrolló una segunda publicación: Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile (2012). Una guía técnica que busca entregar conocimientos y contribuir a difundir la tecnología. Más información en <http://www.4echile.cl/>

Adicionalmente, la GIZ tiene hoy en día dentro de otras funciones la de implementar el componente técnico del instrumento NAMA de fomento de tecnologías ERNC para autoconsumo (Chilean Self-supply Renewable Energy (SSRE) NAMA), del fondo "NAMA facility". Este componente implica la implementación de una serie de actividades tendientes a entregar asistencias técnicas, capacitaciones, generación y difusión de información en relación a ERNC en general, donde el biogás tiene cabida.

El objetivo del programa es promover la incorporación de sistemas ER en pequeñas y medianas empresas abordando las barreras relevantes y creando condiciones financieras y técnicas adecuadas para el desarrollo de esta emergente industria.

12.4 MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

La relación de la producción ganadera con el cambio climático ha sido un tema controversial en el mundo, se le da una alta responsabilidad a la agricultura en general de provocar cambios en los niveles de contaminación atmosféricos que generan cambios en el clima a nivel mundial, lo que trae graves consecuencias en todo el mundo.

La iniciativa de Cap and Trade que fijaba valores de mitigación de emisión de gases de efecto invernadero, que en su momento impulsó la ONU, perdió vigencia en una de las últimas reuniones de las partes en su edición de la cumbre en Francia en junio de 2016. Desde entonces cada país fijó sus propias metas y propuestas, en un convenio que entraría en vigor en el año 2020. El nuevo objetivo es el de no permitir el aumento de las temperaturas globales sobre 2°C, como fruto de las emisiones de metano, CO₂ y otros gases contaminantes con efecto invernadero.

Mientras tanto existen 3 vías posibles para colaborar en la lucha contra el cambio climático 1) la acción que los sectores públicos y privados ejerzan en los diferentes países, 2) inversiones públicas y privadas para apoyarlas, y 3) la cooperación internacional en temáticas relacionadas con el clima, la energía y los alimentos.

Respecto al primero, Chile adhirió la ciudad de Santiago¹⁷; respecto al segundo se creó una alianza mundial que estaría trabajando para brindar apoyo (técnico y financiero) a las naciones que quieran alcanzar la tecnología, sus desarrollos en torno al clima y al desarrollo sostenible. Adicionalmente en las Naciones Unidas se trabaja en un reglamento que haga el acuerdo de París operativo y garantice que los países cumplen las metas que se han propuesto. Respecto a los patrones de inversión, se espera que gobiernos, instituciones multilaterales y el sector privado sean capaces y estén dispuestos a destinar grandes sumas de dinero a favor del clima y la sostenibilidad¹⁸.

17 <https://www.theclimategroup.org/project/under2-coalition>

18 <http://newsroom.unfccc.int/es/acuerdo-de-paris/celebracion-y-balance-en-el-primer-aniversario-del-acuerdo-de-paris/>

Lo relevante es conocer que el ahorro que los biodigestores pueden ofrecer en términos de la liberación de gases nocivos para la atmósfera es conocido como **mitigación**, lo que significa un ahorro de emisiones a la atmósfera a partir de la implementación de un sistema de producción y uso de biogás (por medio del reemplazo de combustibles fósiles y/o leña). Las empresas o los proyectos que deciden ir por este proceso impulsados por los planes nacionales que hayan suscritos sus países, podrán transar este saldo a favor bajo el mercado voluntario¹⁹.

Los estándares más utilizados normalmente para garantizar y certificar estos bonos de carbono son el Gold Standard, VCS (Verified Carbon Standard) y el Climate Action Reserve (CAR).

19 <http://finanzascarbono.org/mercados/mercado-voluntario/>



