



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura

Modelo de negocio de aprovechamiento energético de biogás en frigoríficos

COLECCIÓN
INFORMES
TÉCNICOS

N.º 6



Secretaría de Energía
Ministerio de Hacienda
Presidencia de la Nación



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación

Modelo de negocio de aprovechamiento energético de biogás en frigoríficos

COLECCIÓN INFORMES TÉCNICOS N.º 6

FAO. 2019. *Modelo de negocio de aprovechamiento energético de biogás en frigoríficos*. Colección Informes Técnicos N.º 6. Buenos Aires.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-131994-9

© FAO, 2019



Algunos derechos reservados. Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales.; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>.

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en inglés será el texto autorizado".

Toda mediación relativa a las controversias que se deriven con respecto a la licencia se llevará a cabo de conformidad con las Reglas de Mediación de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI) en vigor.

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Este documento fue realizado en el marco del Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG), iniciativa de los siguientes ministerios:

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca

Luis Miguel Etchevehere
Ministro de Agricultura, Ganadería y Pesca

Andrés Murchison
Secretario de Alimentos y Bioeconomía

Miguel Almada
Director de Bioenergía

Ministerio de Hacienda

Hernán Lacunza
Ministro de Hacienda

Gustavo Lopetegui
Secretario de Gobierno de Energía

Sebastián A. Kind
Subsecretario de Energías Renovables

Maximiliano Morrone
Director Nacional de Promoción
de Energías Renovables

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Hivy Ortiz Chour
Oficial Forestal Principal
Oficina Regional América Latina

Francisco Yofre
Oficial de Programas
Oficina Argentina

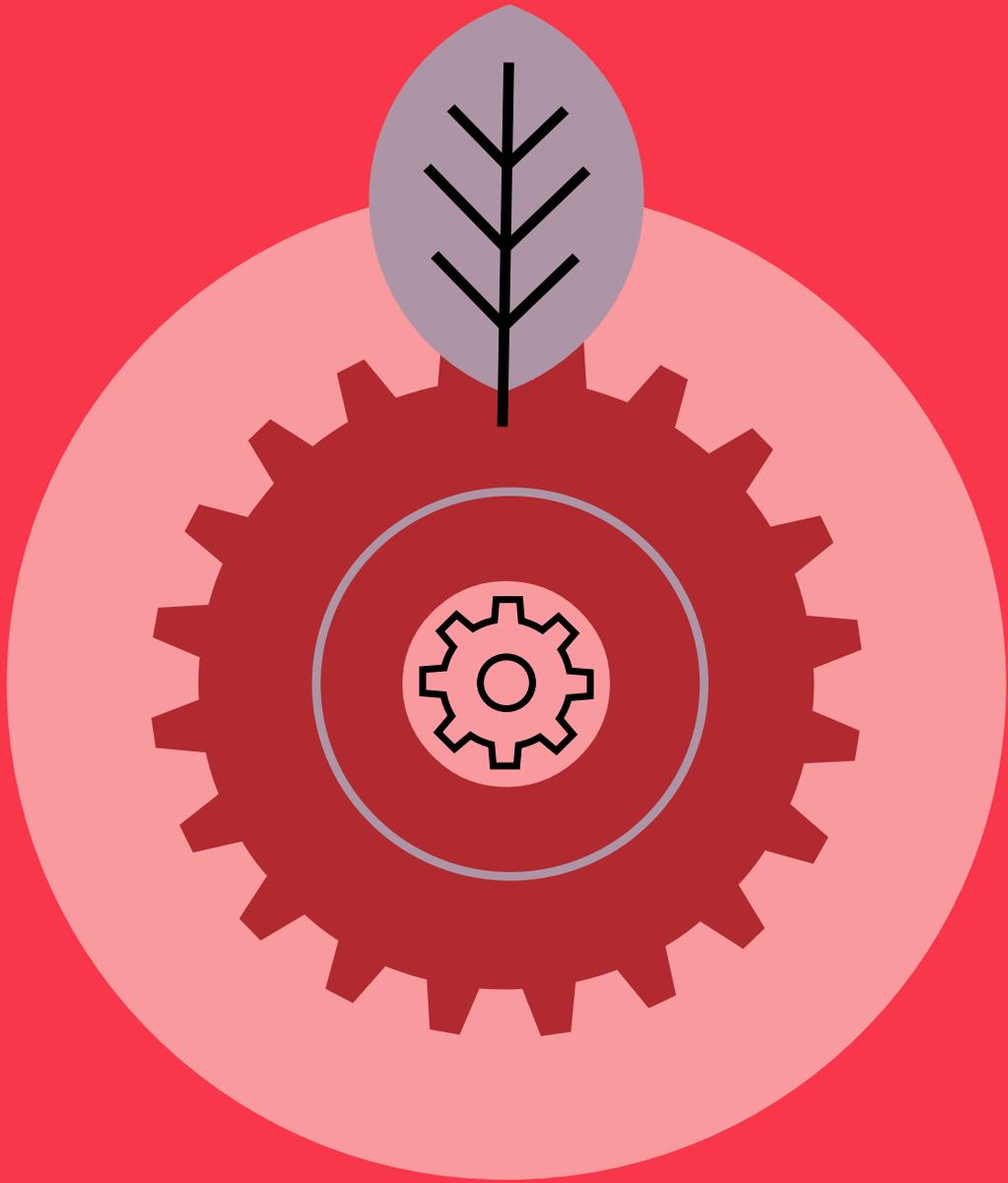
Tomás Portela
Autor

Verónica González
Coordinación Colección

Sofía Damasseno
Colaboración Colección

Alejandra Groba
Edición y corrección

Mariana Piuma
Diseño e ilustraciones



ÍNDICE

Prólogo	vii
Agradecimientos	ix
Siglas y acrónimos	xi
Unidades de medida	xi
Resumen ejecutivo	xiii

1.	
Introducción	1

2.	
Descripción de las empresas analizadas	3
Gestión actual de los efluentes y residuos orgánicos	3

3.	
Proyectos de generación de energía	8
Empresa A	10
Análisis del potencial de generación de biogás	10
Tecnología elegida y descripción de instalaciones del digestor	10
Dimensiones del digestor	11
Potencialidad de uso del biogás	11
Consumo interno del proyecto y costos de operación	13
Digestato	14
Inversión del proyecto	14
Empresa B	15
Análisis del potencial de generación de biogás	15
Tecnología elegida y descripción de instalaciones del digestor	16
Dimensiones del digestor	17
Potencialidad de uso del biogás	17
Consumo interno del proyecto y costos de operación	20
Digestato	21
Inversión del proyecto	21
Empresa C	22
Análisis del potencial de generación de biogás	22
Tecnología elegida y descripción de instalaciones del digestor	23
Dimensiones del digestor	23
Potencialidad de uso del biogás	23
Consumo interno del proyecto y costos de operación	24
Digestato	26

Inversión del proyecto	26
Análisis financiero de los proyectos	27
Valor de la energía eléctrica generada	27
Análisis de sensibilidad	27

Conclusiones	30
---------------------	-----------

Bibliografía	33
---------------------	-----------

Anexo I. Análisis con financiamiento	35
Anexo II. Caracterización de efluentes	36

Cuadros		
Cuadro 1	Datos de operación y residuos de los frigoríficos	4
Cuadro 2	Valores asumidos para estimar el potencial de generación de biogás en Empresas A y C	10
Cuadro 3	Pérdidas térmicas, Empresa A	14
Cuadro 4	Costo de inversión, Empresa A	15
Cuadro 5	Potencial de generación y características del biogás, Empresa B, Modelos A y B	17
Cuadro 6	Generación y consumos internos, Empresa B, Modelos A y B	19
Cuadro 7	Potencialidad de reemplazo de combustibles, Empresa B, Modelos A y B	19
Cuadro 8	Pérdidas térmicas, Empresa B	21
Cuadro 9	Costo de inversión, Empresa B, Modelos A y B	22
Cuadro 10	Pérdidas térmicas, Empresa C	25
Cuadro 11	Costo de inversión, Empresa C	26
Cuadro 12	Resumen comparativo del análisis financiero de las empresas A, B y C	28
Cuadro 13	Análisis de sensibilidad con distintos precios de energía eléctrica	29
Cuadro 14	Análisis de sensibilidad con distintos precios de cosustratos, Empresa B, Modelo B	29
Cuadro 15	Análisis con financiamiento de los proyectos	35
Cuadro 16	Análisis de sensibilidad con financiamiento de los proyectos	35
Cuadro 17	Estudio de efluentes y sólidos de descarga, Empresa B	36
Cuadro 18	Estudio de efluentes y parámetros de diseño, Empresa B	38

PRÓLOGO

La matriz energética argentina está conformada, en su gran mayoría, por combustibles fósiles. Esta situación presenta desafíos y oportunidades para el desarrollo de las energías renovables, ya que la gran disponibilidad de recursos biomásicos en todo el territorio nacional constituye una alternativa eficaz frente al difícil contexto energético local e internacional. En este escenario, en 2015, la República Argentina promulgó la Ley 27191, *Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica* –que modificó la Ley 26190–, con el objetivo de fomentar la participación de las fuentes renovables hasta que estas alcancen un 20% del consumo de la energía eléctrica nacional en 2025, otorgando a la biomasa una gran relevancia.

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación térmica y eléctrica. En virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas, y las ventajas comparativas y competitivas de su sector agroindustrial, la Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

La energía derivada de biomasa respeta y protege el ambiente, genera nuevos puestos de trabajo, integra comunidades energéticamente vulnerables, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, convierte residuos en recursos, moviliza inversiones y promueve el agregado de valor y nuevos negocios.

No obstante, aún existen algunas barreras y desafíos de orden institucional, legal, económico, técnico y sociocultural que deben superarse para incrementar, de acuerdo con su potencial, la proporción de bioenergía en la matriz energética nacional.

En este marco, en 2012, se creó el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa – UTF/ARG/020/ARG (PROBIOMASA), una iniciativa que llevan adelante el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, y la Secretaría de Gobierno de Energía del Ministerio de Hacienda, con la asistencia técnica y administrativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

El Proyecto tiene como objetivo principal incrementar la producción de energía térmica y eléctrica derivada de biomasa a nivel local, provincial y nacional, para asegurar un creciente suministro de energía limpia, confiable y competitiva y, a la vez, abrir nuevas oportunidades agroforestales, estimular el desarrollo regional y contribuir a mitigar el cambio climático.

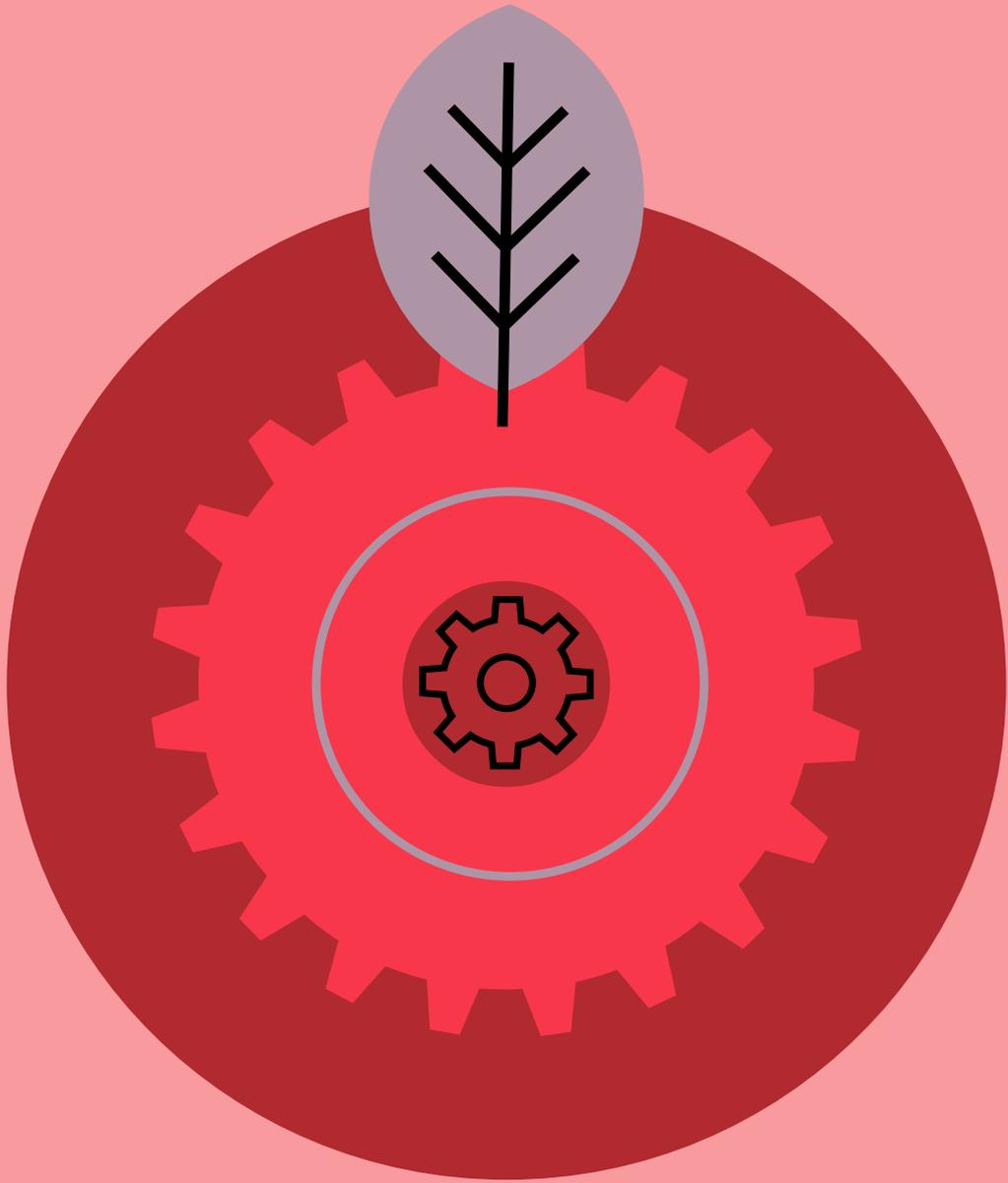
Para lograr ese propósito, el Proyecto se estructura en tres componentes principales con objetivos específicos:

- Estrategias bioenergéticas: asesorar y asistir, legal, técnica y financieramente, a proyectos bioenergéticos y tomadores de decisión para aumentar la participación de la energía derivada de biomasa en la matriz energética.
- Fortalecimiento institucional: articular con instituciones de nivel nacional, provincial y local a fin de evaluar los recursos biomásicos disponibles para la generación de energía aplicando la metodología WISDOM (*Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping*, Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles).
- Sensibilización y extensión: informar y capacitar a los actores políticos, empresarios, investigadores y público en general acerca de las oportunidades y ventajas que ofrece la energía derivada de biomasa.

Esta Colección de Informes Técnicos pone a disposición del público estudios, guías y recomendaciones sobre aspectos específicos de la generación de energía derivada de biomasa, elaborados por consultoras y consultores del Proyecto e instituciones parte, con el propósito de contribuir tanto al desarrollo de negocios como al diseño, formulación y ejecución de políticas públicas que promuevan el crecimiento del sector bioenergético en la Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Guido Casanovas por su lectura y comentarios sobre este documento.



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

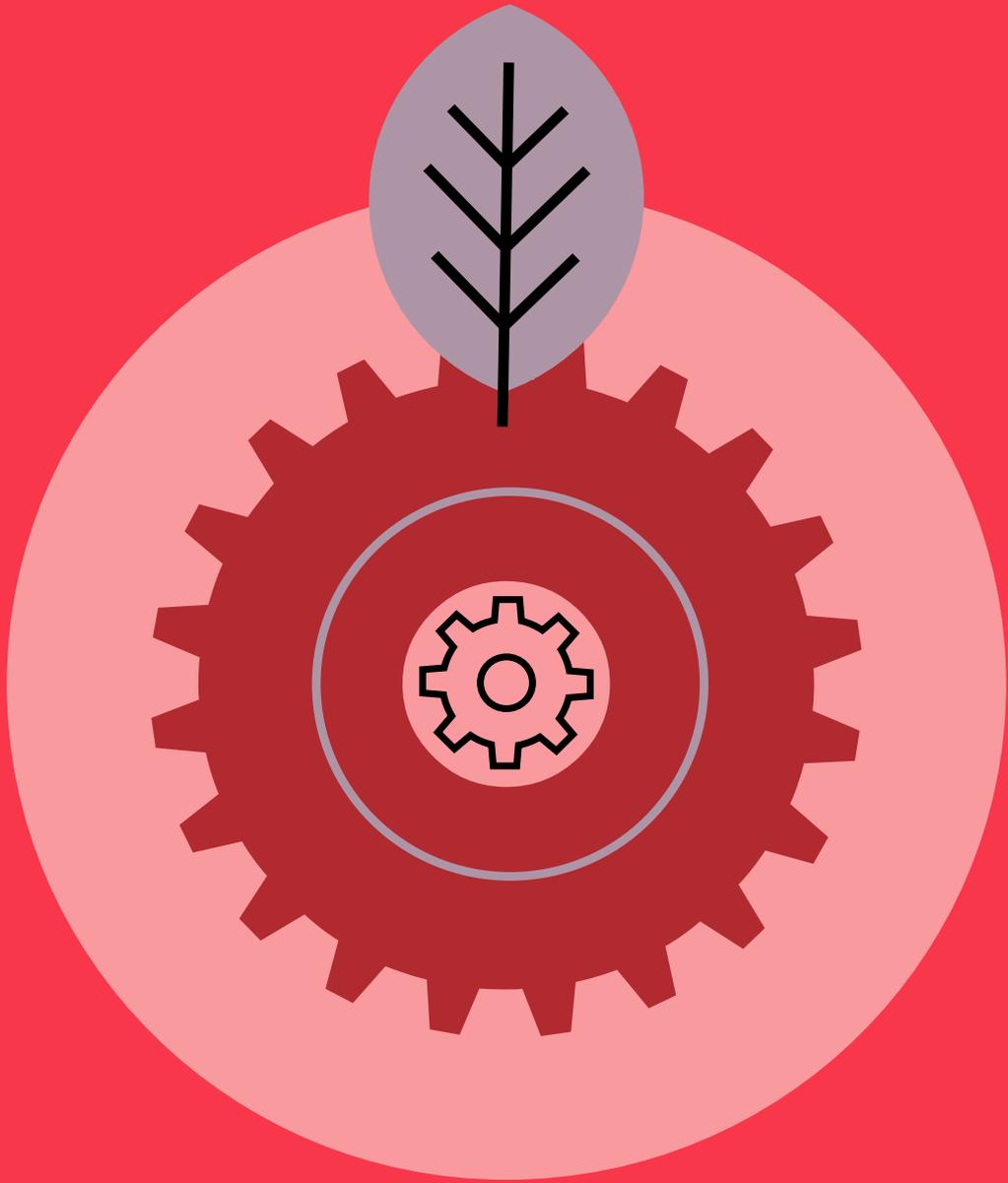
ARS	Pesos argentinos
BTU	<i>British thermal unit</i> – unidad térmica británica
Capex	<i>Capital expenditure</i> – gastos de capital
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
CSTR	<i>Continuous-flow stirred tank reactor</i>
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EE	Energía eléctrica
LHV	<i>Lower heating value</i> – poder calorífico inferior
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
MEyM	ex Ministerio de Energía y Minería
MS	Materia seca
MV	Masa volátil
SA	Sociedad Anónima
SENASA	Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria
SS	Sólidos suspendidos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TIR	Tasa interna de retorno
TRH	Tiempo de retención hidráulica
TRS	Tiempo de retención de sólidos
USD	Dólares estadounidenses
VAN	Valor actual neto
WACC	Tasa ponderada promedio de Costo Capital

Unidades de medida

°C	grado centígrado	m ³	metro cúbico
Hz	hercio	mbar	milibar
kcal	kilocaloría	MJ	Megajulio
kg	kilogramo	MWh	megavatio hora
km	kilómetro	Nm ³	metro cúbico normal de biogás o gas
kWe	kilovatio eléctrico	ppm	partes por millón
kWh	kilovatio hora	t	tonelada
m ²	metro cuadrado		

Elementos químicos

CH ₄	metano
H ₂ S	sulfuro de hidrógeno
N	nitrógeno
Na	sodio
NO _x	óxidos de nitrógeno
P	fósforo



RESUMEN EJECUTIVO

Este informe presenta un resumen del análisis de proyectos de generación de biogás y energía eléctrica a partir de residuos de frigoríficos bovinos, con el objetivo de ayudar a evaluar la viabilidad técnica y económica de emprendimientos de este tipo, dando cuenta de la complejidad de factores que deben analizarse al encararlos. Así, se pretende que resulte de utilidad para el desarrollo de modelos de negocios y la formulación de políticas sectoriales.

El documento detalla las inversiones necesarias para proyectos llave en mano de distinta escala en tres empresas, así como sus costos operativos. En uno de los casos se analizó el uso de cosustratos, un factor que mejora la ecuación desde el punto de vista del potencial energético del biogás y del negocio, pero debe estudiarse detenidamente debido a que incurre en mayores costos y riesgos de variaciones de precio y disponibilidad en el tiempo.

Los tres proyectos que no utilizaron cosustratos tuvieron tasas internas de retorno (TIR) muy bajas o bajas y valores actuales netos negativos con el precio de la energía que les correspondería de acuerdo con la normativa vigente y realizando la inversión con capital propio. Esos números mejoran tanto con mayores precios de la energía generada como si se toma un porcentaje de deuda para financiar la inversión.

Debido a la inexistencia de un mercado formal para el efluente tratado como bioabono en el país, no se ha propuesto un precio de venta para este producto, aunque podría ser rentable.

La alta inversión inicial se presenta como una gran limitante para este tipo de proyectos.



1. INTRODUCCIÓN

La generación de efluentes y residuos orgánicos de los sectores agroindustriales puede convertirse en un recurso clave para promover proyectos de bioenergía de distintas escalas en la Argentina. Bajo esta premisa, en 2017, el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) encargó el desarrollo de modelos de negocios de aprovechamiento energético de biogás en tres sectores productivos: frigoríficos bovinos, tambos y criaderos de cerdos, con el fin de generar información sólida para tomadores de decisiones en este campo de los sectores público y privado.

La matriz energética argentina tiene una muy alta dependencia de los combustibles fósiles. En la búsqueda de nuevas fuentes energéticas para una sociedad con consumo en aumento, la valorización de residuos de la industria frigorífica surge como una alternativa técnica viable para la generación de biogás a partir de la degradación anaeróbica y su aprovechamiento energético.

Un beneficio adicional es que esa degradación anaeróbica que sucede dentro del biodigestor da como resultado un efluente con valor agronómico (digestato), que puede considerarse un biofertilizante ya que en el sistema se reduce la carga orgánica del sustrato original y tiene un grado de estabilización que permite que los compuestos originales estén, en gran parte, biodisponibles para ser aprovechados como nutrientes por las plantas. Así, puede devolver parte de los nutrientes extraídos del suelo por los procesos de cultivo intensivos habituales, lo que disminuye la necesidad de químicos para la fertilización de los campos. Se trata de mejoras ambientales y operativas que generan valor agregado, además de una imagen positiva de las empresas que las llevan a cabo entre sus vecinos y clientes. Por esto, el digestato puede tener un alto valor comercial.

Si bien los beneficios son conocidos de forma general, la falta de estudios concretos sobre las condiciones de los efluentes y su potencial aprovechamiento en la industria local hace que se deba trabajar en los proyectos con estimaciones y valores teóricos.

Este estudio evaluó la prefactibilidad técnica, económica y ambiental de la generación de energía a partir de residuos y efluentes orgánicos en tres frigoríficos bovinos de distintas características y escalas, con sus costos de inversión y de operación, los valores de generación de energía y su uso potencial (como térmica o eléctrica), y la capacidad de repago de la inversión. El propósito es que este trabajo sirva como referencia para el fomento de nuevas estrategias energéticas a nivel regional y nacional, con una noción real de la tecnología empleada y su potencialidad de generación de energía.

Para llevarlo a cabo, se partió de información suministrada por personal de los establecimientos y se estimó, con fundamento empírico, el potencial de digestión anaeróbica y de generación de biogás. Los datos necesarios para los cálculos de generación y realización del proyecto que no suministraron los establecimientos fueron supuestos a partir de los de otros establecimientos de la industria con residuos y efluentes similares.

Además de la información brindada por las empresas, se han considerado las condiciones de contorno, ubicación de las plantas, disponibilidad real de residuos propios y de terceros, calidad de estos, posibilidades de entregar la energía y otros factores.

El costo de conexión a la red para poder entregar la energía eléctrica generada fue estimado, debido a las dificultades técnicas de la conexión en cada caso y, particularmente, por la baja generación. Para poder establecer con precisión estos costos y requerimientos se debe trabajar con las distribuidoras de energía eléctrica.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS EMPRESAS ANALIZADAS

Los tres frigoríficos elegidos para este análisis son de ciclo completo, es decir, llevan a cabo tanto la faena de los vacunos (lo que se conoce como *ciclo 1*), como el proceso de desosado (o despostada, o *ciclo 2*).

Debido a la confidencialidad de la información pactada al realizar el relevamiento, aquí se presentan los datos de las empresas distinguiéndolas por letras, sin identificarlas. El Cuadro 1 presenta algunas de sus características.

Empresa A: Ubicada en el Gran Buenos Aires, se concentra en la producción de medias reses y cortes vacunos destinados al consumo interno y se encuentra trabajando para desarrollar una línea de exportación. Mantiene niveles de faena de entre 1 500 y 2 500 animales semanales, aunque la capacidad de las instalaciones es mayor.

Empresa B: Está ubicada en la provincia de Córdoba. Para este estudio se consideran solo los efluentes de su planta de ciclo completo, que tiene una capacidad diaria de faena de 1 000 animales. Sus productos se destinan al mercado interno y también al exterior.

Comercializa cortes vacunos con y sin hueso y subproductos como harina de carne esterilizada, sebo, sangre entera, plasma, hemoglobina y suero de sangre en polvo.

Esta empresa tiene diversos sistemas de calidad implementados para alcanzar los estándares internacionales, como Buenas Prácticas de Manufacturas (BPM), Procedimientos Operativos Estandarizados de Saneamiento (POES) y Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC o HACCP por sus siglas en inglés).

Empresa C: Se encuentra en la provincia de Buenos Aires. Es la mayor de las tres estudiadas y una de las más importantes del país. Produce carne fresca y cocida, para el mercado interno y para la exportación. Al momento del relevamiento faenaba en promedio unos 1 200 vacunos por día, aunque su capacidad era de 2 000 cabezas diarias. Las salas de desposte pueden procesar 1 500 cabezas por día y la producción de carne cocida es de 400 toneladas por mes. La jornada de trabajo es de 9 horas.

Además de carne y productos derivados, la empresa comercializa menudencias y subproductos, como sebo, cuero, plasma y hemoglobina, harina de carne y hueso, entre otros.

Gestión actual de los efluentes y residuos orgánicos

Los efluentes y residuos orgánicos de los frigoríficos conforman el principal sustrato para las plantas de digestión anaeróbica y generación de biogás. Estos efluentes pueden dividirse en dos grandes grupos: la corriente roja, que proviene de la faena, desposte y

Cuadro 1. Datos de operación y residuos de los frigoríficos

Detalle	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Promedio diario de animales faenados	550	700	1 200
Capacidad máxima de faena diaria	s/d	1 000	1 400
Días semanales de operación	4	Faena: 4 Desposte: 5	5
Horas diarias de proceso	9	9	9
Efluente líquido (m ³ /día)	333	1 430	3 000
Estiércol (t/día)	4	s/d	35
Residuo semisólido (t/d)	s/d	s/d	1,1

Fuente: Elaborado por el autor sobre datos de las empresas.

elaboración, y la corriente verde, compuesta por el rumen de los animales y el agua de lavado de corrales, camiones y jaulas.

Empresa A

La Empresa A contaba con información muy genérica sobre sus residuos orgánicos, por lo que se consideraron sus estimaciones de volumen, pero las características y condiciones de las corrientes se establecieron en función de casos comparables de la industria.

La corriente roja se colecta en canaletas que la conducen, por gravedad, hacia una cámara de rejillas rojas. Allí, mediante un tamiz grueso, se separan los sólidos, que luego se retiran y envían a la planta de tratamiento. La parte líquida se dirige por gravedad a un pozo desde donde se bombea junto con la parte líquida de la corriente verde a la laguna de tratamiento.

La corriente verde también es colectada en canaletas y enviada por gravedad por ductos hacia una cámara de rejillas verdes. La parte líquida sigue hacia el pozo de bombeo, desde donde es enviada hacia un tamiz estático. Allí los sólidos se extraen y depositan en una plataforma de hormigón, y luego son cargados mecánicamente sobre camiones. En tanto, la parte líquida se dirige por gravedad junto con la roja hacia el sistema de tratamiento de efluentes.

Los sólidos de la corriente verde, que suman 120 toneladas (t) por mes, se gestionan como un residuo no especial y son entregados a productores agropecuarios y hortícolas que los requieren para usar como enmienda orgánica. Se trata de una disposición sin costo para la empresa, por lo que la gestión diferenciada que puede surgir como beneficio de la implementación de un sistema de digestión anaeróbica no puede considerarse en el estudio.

Sistema de tratamiento de efluentes

La planta de tratamiento de efluentes, tras la separación de sólidos explicada, consiste en una pileta de tratamiento de 5 500 metros cúbicos (m³) sin sistema de mezcla ni oxigenación, donde ingresan las dos corrientes ya juntas. A continuación de esta pileta hay una

etapa de reducción de sólidos por precipitación en un sedimentador secundario, de donde el efluente clarificado sale para dos lagunas en serie para la última etapa del tratamiento. En la empresa desconocen su volumen ya que no saben qué profundidad tienen ni cuáles son las condiciones del fondo. El efluente recorre una serie de zanjas hasta llegar a un afluente del Río de la Plata.

La Empresa A no tiene un control de rendimiento de las etapas de tratamiento ni la variación de las concentraciones de los parámetros en el proceso completo, ya que no cuenta con una caracterización de los efluentes previa a la entrada al sistema de tratamiento, ni en etapas intermedias, ni del vuelco final. Se asume que este último alcanza la calidad exigida por la legislación vigente.

Empresa B

La Empresa B brindó una caracterización de sus efluentes líquidos llevada a cabo en 2009 con asistencia del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Se generó una muestra compensada a lo largo de un día de faena de 930 animales, cercano a la capacidad máxima del establecimiento. Se realizaron mezclas de las corrientes roja y verde sobre el ingreso a las lagunas de tratamiento y se efectuó un balance de materia. En el laboratorio INGAR se realizaron los ensayos sobre las muestras para determinar la concentración de los distintos parámetros, entre ellos, los sólidos totales (ST), la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), datos principales que se consideraron para la realización del proyecto (ver Anexo II).

La corriente roja en esta planta se compone principalmente de aguas de lavado empleadas en la faena y restos de sangre y grasa, ya que la mayor parte de la sangre va por otra línea a la planta de procesamiento de sangre. Esta corriente también lleva restos de la faena y vísceras en trozos de diferentes tamaños, que se separan, en forma poco eficiente, a la salida de la planta por medio de rejillas, tamices y pileta de sedimentación. Posteriormente, se bombea el sobrenadante al sistema de lagunas.

El canal verde sale de la planta con alto contenido de sólidos (fibras de celulosa y mucho resto de grano entero de maíz), que se separan en una zaranda. El líquido de escurrimiento, con restos de fibras, se junta con el canal rojo y es enviado a las lagunas. Las fibras que quedan en la zaranda se descargan en camiones y se trasladan fuera del frigorífico para la fabricación de ladrillos. Todo este proceso se encuentra al aire libre, fuera de la planta de faena.

Ambas corrientes se unifican y pasan por una etapa de pretratamiento, donde un tamiz extrae parte de los sólidos. El remanente se envía al sistema de tratamiento mediante un sistema de ocho lagunas, donde se produce la sedimentación, aireación, tratamiento facultativo y maduración.

Una tercera corriente se genera a partir de las aguas generales de lavado de la zaranda, corrales y otros. Existen otras dos corrientes, más recientes, que no se consideran en el estudio ya que no se han caracterizado ni cuantificado: una proviene de la planta de producción de harina de carne y grasa bovina y se compone del agua de lavado general de la planta y grasa solubilizada, y la otra es una parte del agua de retorno de la caldera de esta grasería y se encuentra a entre 60 y 70 grados centígrados (°C) de temperatura. Estos efluentes aún deben ser analizados y cuantificados por la empresa, ya que al momento de este relevamiento no cuenta con una estimación de sus características que pueda considerarse en el estudio.

Hay una corriente adicional, también proveniente de la grasería, que contiene borras de lavado compuestas por agua y grasa, que tampoco está caracterizada y actualmente se comercializa. Al tener una caracterización de la corriente general previa a la separación de grasas, un 10% de estas se incluyó y puede ser asimilado como parte de esta corriente.

Sistema de tratamiento de efluentes

Todos los efluentes descritos convergen, secuencialmente, en el sistema de ocho lagunas, que cumplen la función de tratamiento ya que a la salida se alcanza la calidad de agua buscada, que se utiliza para riego interno. Estas lagunas no tienen impermeabilización. Su tiempo de retención hidráulica (TRH) es de aproximadamente 75 días, con un volumen de cerca de 110 000 m³.

Este proceso de tratamiento de efluentes no cuenta con sistemas de control de parámetros de tratamiento biológico.

Para el análisis se presentan dos modelos de proyecto: uno que utiliza únicamente los residuos propios (Modelo A) y otro que también considera cosustratos de terceros (Modelo B). En el caso de que se agreguen sustratos ajenos al establecimiento para la generación de biogás, el producto del proceso de digestión anaeróbica (digestato) no debe incorporarse al sistema de tratamiento de efluentes actual ya que, al modificarse el efluente a tratar y por ende el tratamiento, se corre el riesgo de generar alteraciones no deseadas en la calidad del vuelco. Estas no pueden estimarse al no contar con ningún control sobre el proceso de tratamiento de efluentes. La empresa actualmente dispone el efluente de las lagunas en campo propio como riego, en hectáreas aledañas al frigorífico.

La legislación de Córdoba permite el uso del digestato en el suelo siempre que se realice de forma controlada y con una dosis de aplicación específica en función de sus características físico-químicas y de las características del suelo, práctica que debe ser aprobada por la autoridad competente.

En este caso, no se consideró en el proyecto la aplicación del efluente en suelo ya que no se tiene información específica (costo de operación, caracterización de suelos, cálculos de aplicación, necesidades en función de las precipitaciones, cultivos, etc.). Pero, como la empresa está realizando esta práctica con el efluente tratado, se puede asumir que los costos de operación serán los mismos que los actuales, y por lo tanto no se incluyen en el estudio.

Para el Modelo B, el caudal diario de cosustratos es muy bajo y no tiene un impacto significativo en estas prácticas.

Los residuos sólidos y semisólidos separados en las distintas etapas de tratamiento primario tienen un almacenamiento específico, son seleccionados y retirados por una empresa especializada. Por separado se gestionan residuos patógenos y peligrosos. Estos últimos no fueron considerados en el proyecto.

Empresa C

La Empresa C dispone de 3 000 m³ diarios de efluentes líquidos, de 1,1 t diarias de residuos semisólidos y 35 t diarias de estiércol para considerar su aprovechamiento para generación de biogás. No cuenta con algunas corrientes típicas de gran potencial de generación de biogás, como la sangre, la grasa y otros restos orgánicos, ya que estos son procesados y comercializados como subproductos.

Luego de separados los sólidos con tamiz grueso para enviar a la planta de tratamiento, la corriente roja se dirige por gravedad al pozo desde donde, mediante bombas sumergibles,

se envía a un nuevo filtrado, con un tamiz rotativo. Los sólidos se vuelcan a una tolva elevada con compuerta interior, desde la que son vaciados directamente sobre un camión para su retiro. Los líquidos rojos desbastados y tamizados se dirigen por gravedad al sistema de tratamiento de efluentes.

La corriente verde se envía, también por gravedad a través de ductos, a la cámara de rejillas verdes, donde los sólidos de gran tamaño que quedan retenidos en las rejillas se colectan, de forma manual, en un depósito específico, de donde se retiran posteriormente. La parte líquida es dirigida a un nuevo filtrado, mediante un tamiz estático, y los sólidos extraídos son vaciados directamente sobre un camión para su disposición en campo. El residuo orgánico obtenido luego de esta separación tiene un contenido de humedad del 70% y es el principal sustrato para el proyecto de generación de biogás. Mientras tanto, la corriente líquida se dirige por gravedad hasta el sistema de tratamiento de efluentes.

Los lodos generados se gestionan como un residuo no especial y se entregan para enmienda orgánica de uso agropecuario y hortícola a productores. Esta disposición no tiene costo para la empresa, por lo que no puede considerarse en el estudio la gestión diferenciada de la implementación de un proceso de generación anaeróbica.

En los días de operación se generan 35 toneladas de sólidos de la corriente verde. Una vez retirados de la tolva del tratamiento primario se transportan por un camión que los vuelca en el terreno natural al lado de las lagunas. Se adiciona cal como único tratamiento, por su bajo costo y sencillez de aplicación, mezcla considerada por la empresa como un fertilizante orgánico, debido a su utilidad para neutralizar los suelos ácidos.

Sistema de tratamiento de efluentes

El sistema de tratamiento de efluentes consiste en seis lagunas para depuración biológica, y busca alcanzar los parámetros de vuelco exigidos por la legislación vigente, cuyo organismo de control es la Autoridad del Agua de la provincia de Buenos Aires.

La primera etapa del sistema consiste en un tratamiento anaeróbico, con tres lagunas en serie, la primera con un volumen aproximado de 6 240 m³ y otras dos de 10 290 m³. Luego siguen las tres lagunas "aeróbicas", también en serie, de 13 460 m³, 12 200 m³ y 9 500 m³ aproximadamente, que no poseen aireación. Como última etapa, se realiza una cloración. Finalmente, el efluente tratado se envía a la cámara de aforo y toma de muestra de la planta. Luego desemboca a un canal que conecta con un afluente del Río de la Plata.

Este sistema tratamiento de efluentes no cuenta con control de parámetros de tratamiento biológico, ni con una etapa de sedimentación, por lo que los sólidos precipitables se van depositando en las distintas lagunas, lo que forma parte fundamental del proceso de reducción de carga orgánica. Tampoco se tiene control de rendimiento de las distintas lagunas ni la variación de las concentraciones de los parámetros en el proceso completo, ya que no cuenta con una caracterización previa de los efluentes.

El presente estudio considera el aprovechamiento de estas corrientes únicamente, ya que incluir otros sustratos para aumentar la generación de biogás modificaría el efluente a tratar así como el proceso, lo que podría alterar de modo indeseado la calidad de vuelco.

3. PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Los proyectos tienen como objetivo principal la generación de energía eléctrica y/o térmica, y para ello se busca la maximización de la generación de biogás con los sustratos existentes. Con ese objetivo, se plantea una digestión anaeróbica de los residuos orgánicos mediante un sistema de alta eficiencia.

Como descripción general, los residuos alimentan los digestores anaerobios de mezcla completa, con adecuación de la temperatura mediante intercambiadores de calor. Allí tiene lugar una fermentación por bacterias que trabajan en condiciones de ausencia de oxígeno (anaeróbicas), en tres fases consecutivas de hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. De esta forma, se consigue una estabilización de la materia orgánica y una producción de biogás valorizable energéticamente.

Los digestores trabajarán en un proceso de mezcla completa, con control de la temperatura en el rango mesofílico o termofílico.

Trabajar en el rango mesofílico (35 °C) permite reducir los tiempos de retención hidráulica (TRH) del sistema hasta un tamaño en que puede implementarse un proyecto estándar, manteniendo las características técnicas buscadas para la generación de biogás. El TRH es el tiempo teórico en que permanece un volumen determinado de sustratos dentro del digestor; al mantener condiciones controladas de temperatura y mezcla se asegura un funcionamiento constante las 24 horas del día y una alta degradación de la carga orgánica. Este es el sistema que se eligió para la Empresa A.

Trabajar en el rango termofílico (45-55 °C), en cambio, requiere un TRH menor, lo que permite un tanque de menor tamaño, una ventaja dado que el costo del digestor es sustancial. Además, posibilita una mayor generación de biogás y una menor producción de fangos. Y, si bien demanda mayor cantidad de calor para entregar al sistema, se encuentra disponible ya que es un proyecto de generación de energía eléctrica y puede aprovechar los rendimientos térmicos de los motores y/o turbinas que de otro modo se perderían. Este fue el sistema elegido en el caso de la Empresa B y la Empresa C.

En la Empresa A, el sistema diseñado aprovecha el proceso de concentración de sólidos actual. El objetivo es trabajar con una cantidad de sólidos que permita el sistema anaeróbico en esta tecnología (menor al 14% en los sustratos de entrada). Los límites de sólidos totales dentro del digestor están relacionados con la operación de este, principalmente para mantenerlos en suspensión con los equipos de mezcla utilizados.

El sistema diseñado para la Empresa B y la Empresa C también aprovecha el proceso de concentración de sólidos actual, pero se considera que no es suficiente. El objetivo

es trabajar con la mayor cantidad de sólidos que permite un sistema anaeróbico de esta tecnología. Como lo que genera biogás es la descomposición de la materia orgánica degradable de los sustratos en condiciones anaeróbicas, se contempla una recirculación de sólidos de salida del digestor mediante equipos, para aumentar el tiempo de retención de sólidos (TRS): la fracción líquida es enviada a la planta de tratamiento de efluentes existente (puede ser utilizada como biofertilizante en campo propio) y la fracción con mayor contenido de sólidos es en parte recirculada a la entrada del sistema, y en parte utilizada como fertilizante o enmienda orgánica en campo propio.

En cuanto al almacenamiento del biogás, en el caso de la Empresa A, se acumula en un gasómetro a baja presión, y es impulsado también a baja presión mediante sopladores para poder ser aprovechado por los equipos de generación, o las calderas en el caso de que se use para reemplazar gas natural u otro combustible. En la Empresa B y la C, el biogás también se impulsa a baja presión mediante sopladores de forma continua. Los tres proyectos contemplan el tratamiento del biogás para disminuir el contenido de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y la humedad que posee, requisito fundamental para no dañar los equipos de generación de energía eléctrica o las calderas.

En la Empresa C, los residuos ya se encuentran con una concentración del 30% de sólidos. Es necesario diluirlos para que sean manejables dentro del digestor anaeróbico, lo que se realiza con el efluente de la corriente enviada al sistema de tratamiento, aprovechando la carga orgánica remanente que tiene. El efluente total considerado para la digestión es de $60 \text{ m}^3/\text{día}$, con 14% de sólidos totales.

Los productos que se utilizan para la limpieza de los frigoríficos son bactericidas y pueden tener algún impacto inhibitor del proceso de digestión anaeróbica, sobre todo los que contienen cloro y están en contacto con los efluentes. En caso de ser necesario, se debe considerar cambiarlos por otros que no afecten a las bacterias del biodigestor. La Empresa A utiliza cloro desinfectante. La Empresa B emplea espuma alcalina clorada en toda la planta, con cloro (100 gramos por litro) para desinfección y blanqueo, y ácido láctico (2%) en el rociado de medias reses. La Empresa C emplea cloro desinfectante y ácido peracético después de la limpieza y antes de la producción.

Cabe remarcar que las exigencias ambientales pueden ser una limitante al hecho de ingresar cosustratos que pueden ser residuos orgánicos no estabilizados de otros establecimientos, que podrían presentarse como un riesgo para la empresa. La ubicación de la planta de digestión anaeróbica y el acopio de los residuos pasa a ser un factor adicional para considerar y, dependiendo de los cosustratos, podría requerirse un proceso de higienización de los mismos o un control muy estricto de trazabilidad desde el punto donde se generan.

Respecto del digestato, se considera que los efluentes se seguirán utilizando de la manera actual y no se les asignó un valor agronómico adicional, ya que, como se indicó, no se contaba con su caracterización, ni con un estudio de capacidad de absorción del suelo, cultivos o flora sobre los que aplicarlos, napas, impacto en el medio y otros factores que escapen al alcance de este proyecto. Tampoco se consideró un precio de venta del digestato ya que, para lograr un producto capaz de ser aprobado por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) y así poder comercializarlo, se le deberían aplicar tratamientos adicionales que permitan encuadrarlo como enmienda orgánica.

No obstante, el aprovechamiento del digestato es recomendado por diferentes estudios, tanto locales como realizados en el exterior, algunos de los cuales se adjuntan en la Bibliografía.

Empresa A

Análisis del potencial de generación de biogás

Para el cálculo de generación de biogás se consideraron los siguientes valores promedio:

- Animales faenados: 2 200/semana.
- Efluente líquido: 333 m³/día.
- Residuos húmedos: 4 t/día.
- Materia seca: 14%.

Como la información para estimar el potencial de generación de biogás brindada por la Empresa A y la C no tenía caracterización de los potenciales sustratos, se completó con valores de estudios similares (la variación en la composición de los residuos y efluentes entre frigoríficos es baja, la mayor diferencia se da por la cantidad de agua con que se realiza la limpieza, diluyendo los sólidos), como muestra el Cuadro 2.

De esta manera, se pueden estimar las características del potencial de biogás:

- Biogás generado: 697,8 m³/día.
- Producción de metano (CH₄): 458,5 m³/día.
- Proporción de CH₄ en el biogás: 65,7%.
- Poder calorífico del biogás: 6 110 kcal/m³.
- Poder calorífico diario del biogás: 4 263 767 kcal.

Por cuestiones medioambientales no se realizó ninguna estimación de potencial de energía que incluyera cosustratos ajenos al establecimiento, ya que la falta de información y control de la empresa sobre su tratamiento de efluentes impide medir los potenciales cambios en los parámetros de vuelco.

Tecnología elegida y descripción de instalaciones del digester

Como se dijo anteriormente, se eligió un sistema de digestión anaeróbica en el rango mesofílico (35 °C), cuyas ventajas se describieron al comienzo de este capítulo.

Cuadro 2. Valores asumidos para estimar el potencial de generación de biogás en Empresas A y C

Sustrato	Sólidos totales (ST) (%)	Sólidos volátiles (SV) (%)	SV digeribles (%)	Producción de biogás (m ³ /t SV)	Contenido de metano (CH ₄) (%)
Estiércol líquido (vacuno)	30	79	40	350	60
Grasa	95	100	95	1 000	68
Sangre	18	96	95	685	70

Fuente: Elaborado por el autor.

Sistema de agitación, mezcla y calefacción

El sistema contiene un agitador mecánico inclinado dentro del digestor que permite una agitación gentil y asegura la mezcla completa del total del volumen y una desgasificación de los sustratos. La frecuencia de agitación puede ajustarse según necesidades y así disminuir costos operativos.

El sistema posee un gasómetro de membrana de volumen variable encima del digestor para almacenar el biogás a medida que se genera a baja presión, desde donde es impulsado por los sopladores para su uso.

Esta tecnología ofrece una fácil operación y mantenimiento del agitador, ya que no se requiere entrar al digestor; óptimas condiciones de mezcla; previene la sedimentación de sólidos; realiza una desgasificación constante de los sustratos; los equipos tienen larga vida útil; requiere una baja inversión en relación con los proyectos a medida.

Dimensiones del digestor

El dimensionamiento del digestor es uno de los puntos críticos del proyecto, ya que tiene un peso importante en su costo y condiciona gran parte de los equipos e instalaciones necesarias para el correcto funcionamiento del proceso.

En este caso se optó por un modelo de planta prefabricado. El tamaño del digestor está estrictamente relacionado con la tecnología seleccionada y, por lo tanto, con el TRH:

- TRH: 30 días.
- Volumen final: 360 m³.

Potencialidad de uso del biogás

Se presentan dos posibilidades de uso del biogás: en forma directa en caldera, como reemplazo de gas natural u otro combustible, y para generación de energía eléctrica mediante equipos electromecánicos.

Uso directo

El aprovechamiento del biogás en reemplazo de otros combustibles en caldera tiene una serie de ventajas en términos de rendimiento, simpleza en su uso y su acondicionamiento y costos del proyecto. Se aprovecha el 100% de su poder calorífico y el rendimiento del sistema está dado por la caldera en sí y no por el biogás. Este rendimiento no se analiza en este estudio, ya que se considera reemplazar parte del gas natural u otro combustible líquido por el biogás en un quemador dual, por lo tanto, el rendimiento del sistema se mantiene constante, con las instalaciones existentes.

Dado que los requerimientos de tratamiento de biogás para alimentar equipos de generación de energía eléctrica son muy exigentes, se los puede considerar acordes a la necesidad del uso directo. Esta simplificación en el estudio permite hacer una comparación rápida y asegurar que el estado de las calderas no se verá afectado por el cambio de combustible.

Si el biogás se utiliza únicamente como reemplazo de otros combustibles fósiles, las instalaciones complementarias también son mucho más simples, ya que no se requieren los generadores, ni los sistemas de aprovechamiento de su calor, ni las estructuras para inyección de energía eléctrica a la red, que tienen un peso muy importante en la inversión inicial y requieren de un alto grado de mantenimiento, lo que eleva también los costos operativos.

Si bien por estas ventajas el biogás de forma directa se presenta como una alternativa, no se consideró aquí como principal ya que la legislación promueve la generación de energías renovables desde el enfoque de generación de energía eléctrica.

Para el análisis se considera solamente el reemplazo del gas natural y no de otros combustibles líquidos, ya que no se tiene un detalle de los consumos del establecimiento. Se establece que el poder calorífico del metano es equivalente al del gas natural.

En este apartado únicamente se presentan los cálculos y valores genéricos suficientes para un análisis muy escueto de la alternativa planteada.

- Generación de biogás: 20 934 m³/mes.
- Producción de CH₄: 13 754 m³/mes.
- Consumo interno para calefacción del biodigestor: 1 547 m³ biogás/mes (promedio).
- Biogás disponible para reemplazo de combustibles: 19 387 m³/mes.
- Reemplazo de gas natural: 12 737,6 m³/mes – 152 851 m³/año.
- Costo gas natural: 3,07 ARS/m³.
- Ahorro anual: 469 254 ARS/año – 26 814,5 USD/año.

El costo estimado de proyecto únicamente para aprovechamiento de biogás como combustible es de:

- 264 837 USD.

Los costos operativos estimados del proyecto son:

- 17 482 USD anuales.

Generación de energía eléctrica

Para calcular la generación de energía eléctrica a partir de biogás el estudio se basó en el poder calorífico del biogás según hojas técnicas y especificaciones de equipos de primera línea. Se consideraron dos tecnologías para hacer el estudio lo más amplio posible: motores generadores de las empresas GE Jenbacher, Caterpillar –MWM– y Tedom; y microturbinas de la empresa Capstone. La comparación se realizó a partir de los requerimientos que detallan los equipos, considerando su rendimiento.

Debido a la cantidad de biogás generado en el proyecto de la Empresa A, y los costos más accesibles, se optó por los equipos de Tedom Group, empresa que además tiene representantes en el país que pueden realizar los servicios de mantenimiento. Para aprovechar el 100% del biogás, se propone un generador modelo CentoC80 con una potencia máxima de 83 kW. Este equipo no trabajaría de forma constante las 24 horas del día ya que la cantidad de biogás no alcanza para ello. A continuación, se resumen sus características:

- Necesidad de energía: 237 kWh.
- Generación eléctrica: 83 kWh.
- Generación de calor a partir de gases de combustión: 121 kWh.
- Horas de funcionamiento: 20,9 h/día.
- Equivalencia en biogás (mínimo necesario): 33,4 m³/h.

De este modo, se generan:

- 1 734,7 kW por día – 633,2 MW por año de energía eléctrica.
- 2 528,9 kW por día de energía térmica disponible.

El consumo interno del proyecto es de 133,3 kWh/día y se detalla en el siguiente apartado.

Consumo interno del proyecto y costos de operación

En esta sección se verán algunos puntos que pueden ser críticos en el análisis del proyecto ya que tienen que ver con los consumos internos de la planta, que requiere tanto energía térmica por la tecnología seleccionada, como energía eléctrica para los equipos electromecánicos instalados. Esto es fundamental para evaluar los proyectos de forma completa, ya que analizar únicamente lo que se genera da una visión sesgada de la situación real.

Balance térmico invierno/verano

El requerimiento de energía térmica del sistema está dado por las condiciones internas del digestor anaeróbico y las condiciones ambientales a las que está expuesto. Para este análisis se consideraron los siguientes tres aspectos: temperatura dentro del digestor, condiciones ambientales externas y aislación térmica del digestor.

Para llevar la temperatura de los sustratos dentro del digestor a los 35 °C del sistema se requiere una demanda energética importante. Se considera que el digestato al salir tiene una temperatura igual a la del sistema, por lo tanto, se pierde gran cantidad de energía térmica, mientras se debe elevar la temperatura del sustrato de entrada. Esta energía y la que se pierde con la salida del biogás, que también tiene la temperatura del sistema, tienen un peso relativo importante en el cálculo y fueron considerados en el presente estudio.

En cuanto a las condiciones ambientales externas, el balance térmico y las pérdidas por las condiciones ambientales se realizaron para dos casos puntuales: el mes de más frío en la provincia de Buenos Aires (julio) y el más cálido (enero), de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional. Esta simplificación permite hacer un análisis en los dos extremos térmicos, mientras que la situación durante los otros meses siempre está entre estos.

La aislación térmica y el sistema de calefacción del digestor se presentan como factores críticos para alcanzar las condiciones de climatización que se buscan. Para el análisis se consideraron las características de los materiales de construcción de los tanques y sus proporciones según lo informado por proveedores, tanto en espesores como conductividades térmicas. A continuación, se detallan los valores más importantes para el estudio térmico:

- Temperatura del digestor: 35 °C.
- Temperatura media en el mes más frío: 11,4 °C.
- Temperatura media en el mes más cálido: 25,1 °C.
- Temperatura de sustratos: 25 °C.

Los requerimientos de energía para ambos extremos se presentan en el Cuadro 3, así como el equivalente de energía necesaria para mantener el sistema con el potencial de energía térmica generada con biogás por combustión directa, y el porcentaje del total del biogás generado que esa cantidad representa. Estas últimas dos columnas son simplemente de referencia, y pueden tenerse en cuenta en el caso de utilizar el biogás en reemplazo de gas natural u otro combustible.

Para el presente proyecto, se utilizará el calor emitido por los generadores eléctricos para la calefacción del sistema, energía térmica que está disponible.

La generación de energía térmica aprovechable por los equipos considerados supera las necesidades de climatización del sistema, por lo que trabajar en el rango de temperatura

Cuadro 3. Pérdidas térmicas, Empresa A

Período	Pérdidas de energía (kW/d)	Equivalente en consumo de biogás (m ³ /d)	Porcentaje del biogás generado (%)
Mes más frío (julio)	414,6	58,3	8,4
Mes más cálido (enero)	318,3	44,8	6,4

Fuente: Elaborado por el autor.

seleccionado no es un problema siempre que se aproveche el calor de la generación eléctrica. El resto de la energía térmica generada no tiene un uso definido, ya que aprovecharlo en la planta de procesos implica inversiones adicionales e instalaciones que no pueden ser evaluadas por el presente estudio.

Consumo energético

Todo proyecto que contenga equipos electromecánicos tiene un cierto consumo energético, que aunque individualmente no sea muy alto puede tener un peso relativo importante si se considera la suma de todos con sus horas de funcionamiento. En este caso también se compara el consumo de la planta con el total de la energía eléctrica generada a partir del biogás aprovechado en los generadores eléctricos.

Los equipos de recepción y pretratamiento de residuos de entrada incluyen alimentadores a digestores, agitadores de digestores, bomba de calefacción/recirculación, bombas de impulsión a separación sólido/líquido, equipos para desulfuración, soplante, bomba de husillo y centrífugas. El consumo energético del proyecto se detalla a continuación:

- Potencia instalada total: 20,3 kW.
- Consumo eléctrico del proyecto: 133,3 kWh/d – 48 647 kWh/año.

Digestato

En el establecimiento no existen cultivos, ni productos que puedan ser reemplazados por el digestato, por lo tanto, carece de sentido un análisis de aplicación o valorización en campo propio. Todo el efluente del establecimiento tiene como destino final el vuelco a cuerpo de agua superficial, ya que no hay en la legislación de la provincia de Buenos Aires un mecanismo que permita su uso o disposición en suelo. Si en el futuro se busca aplicar el efluente en suelo, junto con los sólidos digeridos, se debe realizar un estudio profundo de capacidad de absorción del suelo, cultivos o flora sobre los que se aplicaría, tasa de aplicación, profundidad de napas e impacto ambiental y otros factores que escapen al alcance de este proyecto.

Inversión del proyecto

La inversión necesaria para llevar adelante el proyecto fue elaborada en dos partes: por un lado, el proyecto de generación de biogás y, por otro, el tratamiento y generación de energía eléctrica.

Generación de biogás

La planta de generación de biogás es un proyecto llave en mano, que incluye: obra civil (bases, tanque y otros), equipos electromecánicos, sensores, instalación eléctrica, cañerías, costo de importación y nacionalización de equipos, montaje, ingeniería y puesta en marcha, impuestos, y otros.

Si bien parte de los costos de operación de la planta puede ser absorbida por los recursos actuales del frigorífico, en la propuesta económica la empresa los consideró junto con los de mantenimiento en función del requerimiento de recursos del proyecto, considerado como independiente:

- Inversión en generación de biogás: 264 838 USD.

Acondicionamiento del biogás y generación de energía eléctrica

El acondicionamiento del biogás, la generación de energía eléctrica y el aprovechamiento de energía térmica fueron encargados a otra empresa, también como proyecto llave en mano:

- Inversión en acondicionamiento del biogás y generación eléctrica: 220 215 USD.

En el Cuadro 4 se presenta el costo de inversión total del proyecto.

Empresa B

Análisis del potencial de generación de biogás

Las estimaciones se realizaron para el Modelo A, con uso exclusivo de residuos propios, y el Modelo B, con uso de cosustratos.

Modelo A

Para realizar la estimación del potencial de generación de biogás, se consideraron las caracterizaciones de efluentes que se habían realizado en 2009, tomando como base la carga orgánica y la posibilidad de concentración de los sólidos.

- Caudal del efluente líquido: 1 430 m³/día.
- Carga orgánica del total del efluente (como DQO): 7 447,4 kg/día.
- Materia seca (luego de separación de sólidos): 14%.
- Degradación de carga orgánica (% medido en DQO): 75%.
- Generación de metano: 350 l/kg de DQO removido.
- Máximo potencial de generación de metano: 1 257 m³/día.

Cuadro 4. Costo de inversión, Empresa A

Capex Empresa A (USD)	
Capex planta de generación de biogás completa	264 838
Tratamiento de biogás y generación de EE	220 215
Inversión total proyecto	485 053
Capital propio inversores	485 053

Fuente: Elaborado por el autor.

En los cálculos se consideró el 100% de los efluentes como sustrato para generar biogás, incluyendo las grasas, que cuando se realizó la caracterización no eran aprovechadas como en la actualidad. Para este estudio se realizaron algunas modificaciones sobre esos valores, ya que se entiende que sólo se dispone de un 10% de las grasas como sustrato, mientras que el 90% se requiere para otros procesos de la planta que generan subproductos con un alto valor comercial para la empresa. De esta forma, el potencial de generación se reduce en gran medida.

Al quedar un efluente con mucha menos carga orgánica, se plantea un proyecto donde se concentran los sólidos para reducir el volumen del digestor, minimizar los costos de inversión en instalaciones fijas como el tanque, y sacrificar solamente un porcentaje de la generación. El detalle del cálculo para el Modelo A fue:

- Generación de metano: 879,7 m³/día.
- Producción diaria total de materia seca: 3 860,4 kg/día.
- Caudal a biodigestor: 27,6 m³/día.

Modelo B

Como alternativa al uso exclusivo de los residuos y efluentes propios, se plantea un proyecto que incluye cosustratos provenientes de otros establecimientos. Dado el bajo potencial de generación de biogás del frigorífico, para generar de forma constante los 500 kWh que establece la licitación del Programa RenovAr Ronda 2, el mayor porcentaje de los sustratos deberían conformarlo los cosustratos, aunque los del frigorífico permitirían hacer una base de gestión anaeróbica para incluir a aquellos y mantener estable el proceso.

En el Modelo B se considera la inclusión como cosustrato de glicerol (subproducto de la elaboración de biodiésel), grasas o residuos de alimenticias con alto potencial de generación de biogás. En la zona hay muchas industrias que podrían aportarlos: las más atractivas son las alimentarias, las cervecerías, las productoras de biodiésel y las lácteas, rubros que presentan algunas empresas importantes dentro de un radio de 15 km de distancia del establecimiento.

El porcentaje de cosustratos es bajo para asegurar que no haya una desestabilización del proceso. No se consideran cultivos energéticos como cosustratos ya que hacer un estudio de su costo de elaboración para realizar un análisis completo escapa al alcance de este proyecto.

La base de cálculos del Modelo B es la siguiente:

- Sustratos propios del establecimiento: 27,6 m³/día.
- Cosustratos (glicerol): 2 t/día.

En el Cuadro 5 se presenta el potencial de generación y las características del biogás de ambos modelos de proyecto para esta empresa.

Tecnología elegida y descripción de instalaciones del digestor

Como se señaló, para la Empresa B se eligió un proyecto de digestión anaeróbica en el rango termofílico (52-55 °C), cuyas ventajas se describieron al comienzo de este capítulo.

Sistema de agitación, mezcla y calefacción

El sistema de agitación se denomina DIGESTMIX. Tiene la particularidad de que es externo y recircula el contenido desde el fondo del digestor a la parte superior, manteniendo los

Cuadro 5. Potencial de generación y características del biogás, Empresa B, Modelos A y B

Detalle	Modelo A	Modelo B
Biogás generado con sustratos propios (m ³ /d)	1 466,2	1 466,2
Biogás generado con cosustratos (m ³ /d)	0	1 615
Producción de metano (CH ₄) (m ³ /día)	879,7	1 687,2
Proporción de metano en el biogás (%)	60	55
Poder calorífico del biogás (kcal/m ³)	5 580	5 115
Poder calorífico diario del biogás (kcal/día)	8 181 432	15 691 182

Fuente: Elaborado por el autor.

sólidos en suspensión constante. Adicionalmente, es el equipo utilizado para el calentamiento del sistema, ya que tiene un intercambiador de calor y permite mantener en todo momento las temperaturas de diseño.

Este sistema presenta las siguientes ventajas respecto de los de agitación convencional: el consumo energético es mucho menor; no existen elementos mecánicos en el interior del digestor; se elimina la formación de capas flotantes y espumas en el digestor; los intercambiadores de calor integrados en el sistema no requieren mantenimiento ni limpieza.

El sistema de recogida y acumulación de biogás en el digestor consiste en una cubierta textil de doble membrana. El espacio entre la superficie del líquido dentro del digestor y la cubierta actúa como gasómetro temporal, desde donde es impulsado a la batea de tratamiento y generación de energía eléctrica.

Dimensiones del digestor

El tamaño del digestor está estrictamente relacionado con la tecnología seleccionada y por lo tanto con el tiempo de retención hidráulico (TRH) de diseño.

En el Modelo B –con uso de cosustratos–, el aumento de tamaño del digestor frente al Modelo A –sin uso de cosustratos– es inferior al 10% de volumen; por lo tanto, para los estudios se diseñó y cotizó un tanque que permita trabajar con ambos escenarios más un margen para posibles cosustratos de menor rendimiento por unidad de volumen:

- TRH: 20 días.
- Volumen final: 810 m³.
- Capacidad de llenado: 90%.
- Altura: 6 m.
- Superficie de la base: 150 m².
- Diámetro: 13,82 m.

Potencialidad de uso del biogás

Se presentan dos posibilidades de uso del biogás: en forma directa en caldera, como reemplazo de gas natural u otro combustible, y para generación de energía eléctrica mediante equipos electromecánicos.

Uso directo

Las ventajas del aprovechamiento del biogás en reemplazo de otros combustibles en caldera fueron reseñadas para el caso de la Empresa A. Como se comentó, el uso directo solo se presenta como una alternativa de proyecto en este apartado, y no se consideró como la primera debido a que la legislación promueve la generación de energías renovables desde el enfoque de generación de energía eléctrica.

A continuación, se plantea el potencial generación de biogás y el reemplazo de combustibles líquidos del establecimiento.

- Gas natural utilizado: 847 m³/mes.
- Combustible líquido (equivalente a fueloil): 1 900 000 l/año.
- Costo del gas natural: 3,07 ARS/m³.
- Costo combustible líquido: 4,25 ARS/l.

Para el análisis se examina solamente el reemplazo de los combustibles líquidos, ya que de esa manera los requerimientos de tratamiento de biogás son incluso menores que en el caso del gas natural, ya que el combustible que se reemplaza ya contiene ciertas impurezas.

El poder calorífico inferior (PCI) del fueloil tomado para los cálculos es de 9 261 kcal/l.

Los costos de inversión para la realización de un proyecto de valoración de residuos propios del establecimiento y el análisis financiero se detallan más adelante. Para el análisis que sigue, se consideró el requerimiento energético de la planta de generación de biogás, que puede verse en el apartado "Consumo interno del proyecto y costos de operación". El Cuadro 6 y el Cuadro 7 presentan únicamente los cálculos y valores genéricos suficientes para un análisis muy escueto de la alternativa planteada, para los dos modelos analizados.

En el Modelo A, el costo estimado del proyecto únicamente para aprovechamiento de biogás como combustible es de 410 000 USD, y los costos operativos estimados de este proyecto ascienden a 54 088 USD anuales.

En el Modelo B, el costo del mismo proyecto de aprovechamiento de biogás solo como combustible es de 400 000 USD, y los costos operativos son de 61 926 USD al año.

Generación de energía eléctrica

Para el cálculo de generación de energía eléctrica a partir de biogás se consideraron las mismas tecnologías de motores generadores y microturbinas de primera línea señaladas en el caso de la Empresa A, realizando la comparación a partir de los requerimientos de poder calorífico que detallan los equipos.

Modelo A

Debido a la cantidad de biogás generado en el proyecto, los costos más accesibles y la representación en el país se optó por los equipos de Tedom Group. Para aprovechar el 100% del biogás, se propone un generador modelo Cento C160 con una potencia máxima de 166 kW. Este equipo no trabajará de forma constante las 24 horas del día ya que la cantidad de biogás no alcanza para ello; los cálculos se realizaron con un funcionamiento a máxima potencia de 21,5 horas al día.

Cuadro 6. Generación y consumos internos, Empresa B, Modelos A y B

Biogás	Modelo A	Modelo B
Generación de biogás por día (m ³ /día)	1 466,20	3 081,20
Producción diaria de CH ₄ (m ³ /día)	879,72	1 687,22
Generación de biogás por mes (m ³ /mes)	43 986	92 436,00
Producción mensual de CH ₄ (m ³ /mes)	26 391,7	50 616,72
Consumo interno diario promedio de calefacción (m ³ de biogás)	236	335,31
Consumo interno mensual promedio de calefacción (m ³ de biogás)	7 092	10 059,30
Biogás disponible para reemplazo de combustibles (m ³ /mes)	40 092	87 238,70
Poder calorífico del biogás (kcal/m ³)	5 580	5 093
Poder calorífico mensual del biogás (kcal/mes)	224 996 643	444 267 898

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 7. Potencialidad de reemplazo de combustibles, Empresa B, Modelos A y B

Reemplazo potencial	Modelo A	Modelo B
Reemplazo de fueloil mensual (l/mes)	24 295,07	47 971,91
Reemplazo de fueloil anual (l/año)	291 540,84	575 662,97
Ahorro anual (ARS/año)	1 239 048,57	2 446 567,63
Ahorro anual (USD/año)	70 802,78	139 803,86

Fuente: Elaborado por el autor.

Generador seleccionado para el Modelo A (Cento C160 – Tedom)

- Necesidad de energía: 439 kWh.
- Generación eléctrica: 166 kWh.
- Generación de calor a partir de gases de combustión: 217 kWh.
- Horas de funcionamiento: 21,2 h/día.
- Equivalencia en biogás (mínimo necesario): 67,65 m³/h.

Este equipo permite generar:

- 166 kWh de energía eléctrica, durante 21,5 horas del día.
- 3 569,00 kW por día o 1 302,7 MW por año.
- 4 665,5 kW de energía térmica disponible por día.

La energía generada anualmente por el proyecto equivale al 16,9% de la que utiliza el establecimiento, tomando como referencia su consumo del año 2016 (7 721 135 kWh, más el consumo interno propio del proyecto). El consumo interno del proyecto es de 321 kWh/día y se detalla en el apartado siguiente.

Se realizó el cálculo del consumo eléctrico de forma anual ya que no se contaba con el detalle mensual. Sólo es posible indicar que en los meses de verano (diciembre, enero y febrero) el consumo se eleva entre 15 y 20% con respecto al de los meses más fríos (abril, mayo, junio y julio).

Modelo B

En este modelo de estudio, al obtener una mayor cantidad de biogás, el potencial de generación de energía eléctrica varía y, por lo tanto, el análisis se realiza con un equipo diferente.

Generador seleccionado para el Modelo B (Cento L330 – Tedom):

- Necesidad de energía: 787,4 kWh.
- Generación eléctrica: 330 kWh.
- Generación de calor a partir de gases de combustión: 343 kWh.
- Horas de funcionamiento: 23,1 h/día.
- Equivalencia en biogás (mínimo necesario): 132,9 m³/h.

Este equipo permite generar:

- 330 kWh de energía eléctrica, durante 23,1 horas del día.
- 7 318,1 kW por día o 2 671,1 MW por año.
- 7 923,3 kWh de energía térmica disponible por día.

En este modelo, la energía generada anualmente es el 34,6% de la que consume el establecimiento.

Consumo interno del proyecto y costos de operación

A continuación, se plantean puntos que pueden ser críticos, relacionados con los consumos internos de la planta.

Balance térmico invierno/verano

Como se indicó en el caso de la Empresa A, el requerimiento de energía térmica del sistema está dado por la temperatura dentro del digestor, su aislación térmica y las condiciones ambientales externas.

Para la Empresa B, la temperatura dentro del digestor será de entre 52 y 55°C. Llevar los sustratos a ese rango implica una demanda energética importante, a la vez que se pierde gran cantidad de energía térmica con el digestato y el biogás, lo que tiene un peso relativo importante en el cálculo.

Los valores más importantes para el estudio térmico son:

- Temperatura del digestor: 52 °C.
- Temperatura media mes más frío: 9,5 °C.
- Temperatura media mes más cálido: 23,4 °C.
- Temperatura de sustratos: 25 °C.

Los requerimientos de energía para el mes más frío y el más cálido se presentan en el Cuadro 8. También se muestra el equivalente de energía que se necesita para mantener el

Cuadro 8. Pérdidas térmicas, Empresa B

Período	Pérdidas de energía (kW/d)	Equivalente en biogás (m ³ /d)
Mes más frío (julio)	1 670,2	257,4
Mes más cálido (enero)	1 398,1	215,4

Fuente: Elaborado por el autor.

sistema con el potencial de energía térmica generada con biogás por combustión directa. Esta última columna puede tenerse en cuenta en el caso de utilizar el biogás para reemplazar gas natural u otro combustible.

Para este proyecto, se utilizará el calor emitido por los generadores eléctricos para la calefacción del sistema.

Trabajar en el rango de temperatura seleccionado no es un problema siempre que se aproveche el calor de la generación eléctrica. El resto de la energía térmica generada por el proyecto no tiene un uso definido, ya que aprovecharlo en la planta de procesos implica inversiones adicionales e instalaciones que no pueden ser evaluadas por el presente estudio.

Consumo energético

El consumo energético de los equipos electromecánicos en conjunto, sumando las horas de funcionamiento, puede tener un peso relativo importante.

En este caso también se compara el consumo de la planta con el total de la energía eléctrica generada a partir del biogás aprovechado en los generadores eléctricos.

Los equipos de recepción y pretratamiento de residuos de entrada incluyen: alimentadores a digestores; maceradores alimentadores; agitadores de digestores; bomba de calefacción/recirculación; bombas de impulsión a separación sólido-líquido; equipos para desulfuración; soplante; separador tornillo; bomba de husillo; centrífugas.

- Potencia instalada total: 28,3 kW.
- Consumo eléctrico del proyecto: 321 kWh/día – 117 150,4 kWh/año.

Digestato

En el establecimiento no poseen cultivos ni requerimientos de agroquímicos que puedan ser reemplazados por el digestato, por lo tanto, un análisis de aplicación o valorización en campo propio carece de sentido. Si en el futuro se pretende aplicar el efluente en suelo, junto con los sólidos digeridos, se debe realizar un estudio profundo de capacidad de absorción del suelo, cultivos o flora sobre la que se utilizaría, tasa de aplicación, profundidad de napas e impacto en el medio y otros factores que escapan al alcance de este proyecto. En el estudio se considera que el digestato se dispone en suelo siguiendo las prácticas que actualmente realiza el frigorífico, sin incurrir esto en costos adicionales de operación.

Inversión del proyecto

La inversión necesaria para llevar adelante el proyecto fue elaborada en dos partes: el proyecto de generación de biogás y el tratamiento y generación de energía eléctrica.

Generación de biogás

La planta de generación de biogás es un proyecto llave en mano que incluye: obra civil (bases, tanque y otros); equipos electromecánicos; sensores; instalación eléctrica; cañerías; costo de importación y nacionalización de equipos; montaje; ingeniería y puesta en marcha; impuestos y otros.

Si bien parte de los costos de operación puede ser absorbida por los recursos actuales del frigorífico, al realizar la propuesta económica la empresa estableció que se los considerara como proyecto independiente, para poder evaluar sus requerimientos de recursos.

- Inversión para el proyecto llave en mano de generación de biogás: 391 980 USD.

Acondicionamiento del biogás y generación de energía eléctrica

El acondicionamiento del biogás, generación de energía eléctrica y aprovechamiento de energía térmica fueron realizados por otra empresa, también en un proyecto llave en mano. Los modelos de proyecto tienen costos distintos según los equipos considerados y las instalaciones necesarias para cada uno.

En el Cuadro 9 se muestra el costo de inversión de los dos modelos de proyecto de la empresa. Al final de este capítulo se presenta el detalle del análisis financiero de todos los proyectos.

Empresa C

Análisis del potencial de generación de biogás

Se consideraron los siguientes valores promedio:

- Animales faenados: 24 000/mes.
- Efluente líquido: 2 142 m³/día.
- Residuos húmedos: 10,83 t/día.
- Materia seca: 14%.

Como ya se señaló, no se realizó para esta empresa una evaluación energética del uso de cosustratos, ya que su sistema de tratamiento mediante lagunas para alcanzar la calidad de vuelco exigida por la legislación de la provincia de Buenos Aires podría verse alterado en caso de agregarlos.

Cuadro 9. Costo de inversión, Empresa B, Modelos A y B

Capex Empresa B	Modelo A (USD)	Modelo B (USD)
Capex planta de generación de biogás completa	391 980	391 980
Tratamiento de biogás y generación de EE	302 570	401 995
Inversión total proyecto	694 550	793 975
Capital propio inversores	694 550	793 975

Fuente: Elaborado por el autor.

Tecnología elegida y descripción de instalaciones del digestor

Como se indicó, para la Empresa C se eligió un proyecto de digestión anaeróbica en el rango termofílico (52-55 °C), cuyas ventajas se comentaron al comienzo del capítulo.

Sistema de agitación, mezcla y calefacción

El sistema de agitación es el denominado DIGESTMIX, que es externo y recircula el contenido desde el fondo del digestor a la parte superior, con lo que mantiene los sólidos en suspensión constante. Además se utiliza para mantener en todo momento las temperaturas de diseño ya que posee un intercambiador de calor. Sus ventajas respecto de los sistemas de agitación convencional son las comentadas en el caso de la Empresa B. También el sistema de recogida y acumulación de biogás en el digestor elegido es una cubierta textil de doble membrana, allí descrito.

Dimensiones del digestor

El dimensionamiento del digestor en este caso es el siguiente:

- TRH: 20 días.
- Volumen final: 1 332 m³.
- Capacidad de llenado: 90%.
- Altura: 6 m.
- Superficie de la base: 222 m².
- Diámetro: 16,81 m.

Potencialidad de uso del biogás

Se presentan dos posibilidades de uso del biogás, en forma directa en caldera, como reemplazo de gas natural u otro combustible, y la generación de energía eléctrica mediante equipos electromecánicos.

Uso directo

Las ventajas del aprovechamiento del biogás en reemplazo de otros combustibles en caldera fueron reseñadas en el caso de la Empresa A. Como se comentó, el uso directo solo se presenta como una alternativa de proyecto en este apartado, ya que la legislación promueve las energías renovables desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica.

A continuación, se presentan los cálculos y valores genéricos suficientes para un análisis muy escueto de la alternativa planteada:

- Generación de biogás: 44 471,60 m³/mes.
- Producción de CH₄: 28 221,41 m³/mes.
- Consumo interno de calefacción (promedio): 400,4 m³ biogás/día.
- Consumo interno de calefacción (promedio): 12 010,6 m³ biogás/mes.
- Biogás disponible para reemplazo de combustibles: 38 266,1 m³/mes.
- Poder calorífico del biogás: 5 902 kcal/m³.
- Poder calorífico mensual del biogás: 225 836 171 kcal/mes.

Así, la potencialidad de reemplazo de combustibles es:

- Reemplazo mensual de gas natural: 24 283,46 m³/mes.
- Reemplazo anual de gas natural: 291 401,51 m³/año
- Costo gas natural: 3,07 ARS/m³.
- Ahorro anual: 894 602,64 ARS/año.
- Ahorro anual: 51 120,15 USD/año.

El costo estimado de proyecto únicamente para aprovechamiento de biogás como combustible es de 447 000 USD.

Los costos operativos estimados del proyecto por año son de 54 700 USD.

Generación de energía eléctrica

Como en los casos anteriores, para realizar el cálculo de generación de energía eléctrica a partir de biogás el estudio se basó en el poder calorífico del biogás, según hojas técnicas y especificaciones de distintos equipos de empresas de primera línea, considerando dos tecnologías: los motores generadores y las microturbinas. Se optó por los equipos de Tedom Group debido a la cantidad de biogás generado por el proyecto y los costos más accesibles, y porque tiene representantes en el país para realizar el servicio de mantenimiento autorizado.

Para aprovechar el 100% del biogás, se propone un generador modelo Cento C160 con una potencia máxima de 166 kW. El equipo no trabajará de forma constante las 24 horas del día ya que la cantidad de biogás no alcanza para ello; los cálculos se realizaron con un funcionamiento a máxima potencia durante 23,1 horas al día.

- Necesidad de energía: 439 kWh.
- Generación eléctrica: 166 kWh.
- Generación de calor a partir de gases de combustión: 217 kWh.
- Horas de funcionamiento: 23,1 h/día.
- Equivalencia en biogás (mínimo necesario): 63,96 m³/h.

Este equipo permite generar:

- 166 kWh de energía eléctrica, durante 23,1 horas del día.
- 3 796,3 kW por día o 1 385,6 MWe por año.
- 5 012,7 kW de energía térmica disponible por día.

El consumo interno del proyecto es de 322,7 kWh/día y se detalla en el apartado siguiente.

Consumo interno del proyecto y costos de operación

Balance térmico invierno/verano

Como se señaló, el requerimiento de energía térmica del sistema está dado por las condiciones internas del digestor anaeróbico, las condiciones ambientales a las que está expuesto y su aislación.

En cuando a lo primero, la temperatura dentro del digestor será de entre 52°C y 55°C. El balance térmico y las pérdidas por las condiciones ambientales se analizaron para el mes de temperaturas promedio más bajas y más altas en la provincia de Buenos Aires, esto es, julio y enero, asumiendo que los otros meses la situación estará entre estos dos extremos.

A continuación, se detallan los valores más importantes para el estudio térmico.

- Temperatura del digestor: 52 °C.
- Temperatura media mes más frío: 11,4 °C.
- Temperatura media mes más cálido: 25,1 °C.
- Temperatura de sustratos: 25 °C.

En el Cuadro 10 se muestran los requerimientos de energía para el caso del mes más frío y del mes más cálido, así como el equivalente de energía necesaria para mantener el sistema con el potencial de energía térmica generada con biogás por combustión directa. También se presenta el porcentaje del total del biogás generado que esa cantidad representa. Estas últimas dos columnas son simplemente de referencia, y pueden tenerse en cuenta en el caso de utilizar el biogás en reemplazo de gas natural u otro combustible.

Para el presente proyecto, se utilizará el calor emitido por los generadores eléctricos para la calefacción del sistema, y se mostrará que esa cantidad de energía térmica está disponible.

La generación de energía térmica aprovechable por los equipos considerados para producir energía eléctrica supera las necesidades de climatización del sistema, por lo que trabajar en el rango de temperatura seleccionado no es un problema en tanto se aproveche ese calor. El resto de la energía térmica generada no tiene un uso definido; aprovecharla implicaría inversiones adicionales e instalaciones que no son evaluadas en este estudio.

Consumo energético

Tal como se indicó, el conjunto de equipos electromecánicos con todas sus horas de funcionamiento puede tener un peso importante en el consumo de energía. También aquí se compara el consumo de la planta con la energía eléctrica generada a partir del biogás.

Los equipos de recepción y pretratamiento de residuos de entrada son: alimentadores a digestores; maceradores alimentadores; agitadores de digestores; bomba de calefacción/recirculación; bombas de impulsión a separación sólido-líquido; equipos para desulfuración; soplante; separador tornillo; bomba de husillo; centrífugas. El consumo energético del proyecto es el siguiente:

- Potencia instalada total: 28,3 kW.
- Consumo eléctrico del proyecto: 322,7 kWh/día – 117 793 kWh/año.

Cuadro 10. Pérdidas térmicas, Empresa C

Período	Pérdidas de energía (kW/d)	Equivalente en consumo de biogás (m ³ /d)	Porcentaje del biogás generado (%)
Mes más frío (julio)	2 419,7	367,4	25,1
Mes más cálido (enero)	1 658,75	299,9	20,5

Fuente: Elaborado por el autor.

Digestato

En el establecimiento no existen cultivos o requerimientos de agroquímicos que puedan ser reemplazados por el digestato, por lo que carece de sentido analizar su aplicación o valorización en campo propio. Todo el efluente del establecimiento tiene como destino final el vuelco a cuerpo de agua superficial, ya que no hay dentro de la legislación de la provincia de Buenos Aires un mecanismo que permita su uso o disposición en el suelo. Si en el futuro se quiere aplicar el efluente en el suelo, junto con los sólidos digeridos, se debe realizar un estudio profundo de capacidad de absorción del suelo, cultivos o flora sobre los que aplicar, tasa de aplicación, profundidad de napas e impacto ambiental y otros factores que escapan al alcance de este proyecto.

Inversión del proyecto

La inversión necesaria para llevar adelante el proyecto se elaboró en dos partes, la generación de biogás y el tratamiento y generación de energía eléctrica.

Generación de biogás

La planta de generación de biogás es un proyecto llave en mano que incluye obra civil (bases, tanque y otros); equipos electromecánicos; sensores; instalación eléctrica; cañerías; costo de importación y nacionalización de equipos; montaje; ingeniería y puesta en marcha; impuestos y otros. Al realizar la propuesta económica la empresa estableció los costos de operación y mantenimiento de la planta en función de los requerimientos del proyecto, aunque parte de los primeros pueden ser absorbidos por los recursos actuales del frigorífico, a fin de evaluarlo de manera independiente.

- Proyecto llave en mano de generación de biogás: 446 644 USD.

Acondicionamiento del biogás y generación de energía eléctrica

El acondicionamiento del biogás, la generación de energía eléctrica y el aprovechamiento de energía térmica también fueron un proyecto llave en mano hecho por otra empresa:

- Proyecto llave en mano de acondicionamiento y generación de energía eléctrica: 304 284 USD.

La inversión total del proyecto se presenta en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Costo de inversión, Empresa C

Capex Empresa C (USD)	
Capex planta de generación de biogás completa	446 644
Tratamiento de biogás y generación de EE	304 284
Inversión total proyecto	750 928
Capital propio inversores	750 928

Fuente: Elaborado por el autor.

Análisis financiero de los proyectos

En este apartado se presenta el detalle del análisis financiero de los proyectos. Para poder realizarlo, se asumieron algunos valores que pueden variar en función del momento en el que se realice el estudio. Se considera que las empresas utilizan capital propio para afrontar la inversión de los proyectos, sin tomar deuda con terceros.

Valor de energía eléctrica generada

Como se trata de proyectos de generación de energía eléctrica muy por debajo de los 500 kWh que establece la licitación de RenovAr Ronda 2, no se puede tomar como referencia el precio que pagaría la distribuidora eléctrica por cada MWh entregado a partir de la generación de biogás que establece el pliego. En la evaluación económica de los proyectos, se plantea un precio de 113 USD/MWh para la energía generada, en función de lo que indica la Ley 27191.

En el caso de la Empresa B, se estima que el frigorífico tiene la potencialidad de generar una cantidad de energía eléctrica superior al 8% de su consumo, incluso considerando los consumos eléctricos, que en el caso del Modelo A puede abastecerse de un 16,9% de energía eléctrica, y en el del Modelo B, de un 34,6%.

En el Cuadro 12 se presenta un resumen del análisis financiero de los proyectos.

Análisis de sensibilidad

En este estudio se analizó también el impacto sobre los proyectos de variaciones en el precio de la energía eléctrica generada y de los cosustratos, las variables de mayor peso.

El Cuadro 13 presenta un análisis de sensibilidad al precio de la energía eléctrica generada para el caso de cada proyecto, y cómo esto impacta sobre su tasa interna de retorno (TIR) y su valor actual neto (VAN). En tanto, en el Cuadro 14 se analiza la sensibilidad a la variación del precio de los cosustratos.

Cuadro 12. Resumen comparativo del análisis financiero de las empresas A, B y C

Análisis financiero	Empresa A	Empresa B		Empresa C
		Modelo A	Modelo B	
Inversión total proyecto (USD)	485 053	694 550	793 975	750 928
Precio productos del proyecto				
Ingresos por bioabono (USD/año)	0	0	0	0
Precio electricidad entregada (USD/MWh)	113	113	113	113
Costos operativos y mantenimiento				
Mantenimiento digestores (USD/año)	2 648	3 920	3 920	4 466
Mantenimiento generadores (USD/año)	11 467	22 146	45 408	23 556
Costos de personal + Administración + Costo energético operación (USD/año)	14 834	50 169	50 169	50 236
Costos operativos por gestión de cosustratos (USD/año)	0	0	7 836	0
Bases de cálculo de generación de biogás para energía eléctrica				
Biogás generado por día (Nm ³)	697,8	1 466,2	3 081,2	1 482,4
Proporción de metano (%)	63,5	60,0	55,0	63,5
Metano generado por día (Nm ³ CH ₄)	458,5	879,7	1 687,2	940,7
Generación (MWh/h)	0,08	0,166	0,330	0,166
Entrega diaria de energía eléctrica (horas)	20,9	21,5	23,1	23,1
Reducción por mantenimiento de generadores (horas)	0,00	-	84,3	84,3
Reducción por falta de cosustratos	-	-	252,9	-
Horas facturadas por año reales	7 628,5	7 847,5	8 094,2	8 347,2
Facturación anual				
Valor de energía vendida a la red al año (USD)	68 961	147 203	301 834	156 576
Resultados análisis financiero				
Valor empresa (USD)	341 843	582 448	1 398 988	654 268
Deuda Neta (USD)	0	0	0	0
Valor patrimonio (Capital) (USD)	341 843	582 448	1 398 988	654 268
Inversión capital (USD)	485 053	694 550	793 975	750 928
Tasa interna de retorno del proyecto (TIR) (%)	4,88	7,41	19,37	7,95
Valor presente neto (VPN o VAN) (USD)	-143 209	- 112 101	605 014	-96 659
VAN calculado a tasa ponderada promedio de costo de capital (WACC) (%)	10	10	10	10

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 13. Análisis de sensibilidad con distintos precios de energía eléctrica

		Empresa A		Empresa B				Empresa C	
				Modelo A		Modelo B			
Factor de variación del precio de EE	Costo de la EE (USD/MWh)	TIR (%)	VAN (USD)	TIR (%)	VAN (USD)	TIR (%)	VAN (USD)	TIR (%)	VAN (USD)
0%	113,0	4,88	-143210	7,41	- 112102	19,37	605014	7,95	-96660
5%	118,7	5,98	-11147	8,57	- 63495	20,58	700297	9,06	-45368
10%	124,3	6,95	-88955	9,65	-15909	21,74	795581	10,12	5924
20%	135,6	8,6	-42346	11,66	79262	23,95	986149	12,09	108508
50%	169,5	12,79	93198	16,85	364775	29,86	1557852	17,21	416258
100%	226,0	18,45	317969	23,6	830221	38,27	2510690	23,88	917444

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 14. Análisis de sensibilidad con distintos precios de cosuistratos, Empresa B, Modelo B

Factor de variación del precio de EE	Costo de la EE (USD/MWh)	TIR (%)	VAN (USD)
0%	7 836,73	19,37	605 014
5%	8 228,57	19,34	602 693
10%	8 620,41	19,31	600 373
20%	9 404,08	19,25	595 733
50%	11 755,10	19,06	581 812
100%	15 673,47	18,75	558 610

Fuente: Elaborado por el autor

En el Anexo I se presentan análisis de sensibilidad adicionales.

CONCLUSIONES

Este trabajo evaluó la prefactibilidad de proyectos de generación de energía a partir de biogás en tres frigoríficos vacunos, dos ubicados en la provincia de Buenos Aires y uno en la de Córdoba. En esta última empresa se analizó, además del aprovechamiento de los residuos del establecimiento, un proyecto que utiliza también cosustratos (glicerol, grasas o residuos de empresas alimentarias con alto potencial de generación de biogás).

Cabe aclarar que, para la Empresa A y la Empresa C, que no contaban con una caracterización de sus residuos y efluentes, se hizo la estimación del potencial de biogás en función de datos de otros establecimientos equiparables. Para un estudio más preciso debe realizarse una caracterización completa de los residuos y efluentes, y evaluar todos los aspectos involucrados en el proyecto. En el caso de la Empresa B, la estimación del potencial de biogás se realizó a partir de una caracterización de efluentes existente, pero para lograr un mayor grado de certeza sería necesario realizar caracterizaciones más detalladas, evaluaciones de degradación anaeróbica y otros estudios adicionales. De todos modos, el documento aquí presentado permite un acercamiento a la complejidad de los proyectos de generación de energía de este tipo.

Para estimar la inversión de los proyectos de las tres empresas analizadas se consideraron plantas llave en mano, que abarcan desde la recepción y manejo de los residuos en el establecimiento, la digestión y generación de biogás, su tratamiento posterior y los generadores de energía eléctrica. Además, se examinaron los costos operativos de los proyectos durante el período de análisis, tanto respecto del mantenimiento de equipos y motores, como de su operación directa, y, en el caso de la Empresa B, también la gestión de los cosustratos.

Desde el punto de vista del modelo de negocio, el análisis de los proyectos se llevó a cabo para un plazo de 10 años, con distintos valores de energía cobrada por entrega a la red, a partir de los 113 USD/MWh que establece la Ley 27191. Se consideró una amortización acelerada a 10 años (Ley 25924, artículo N.º 5), que genera una disminución en el Impuesto a las Ganancias durante el período (la tasa de cálculo es del 35% sobre el resultado del ejercicio).

Para la Empresa A, el estudio indica que con los valores de inversión y operación estimados el proyecto es rentable con el valor de la tarifa de 113 USD/MWh, pero con una TIR muy baja y un VAN negativo con inversión de capital propio. La TIR se vuelve atractiva con una tarifa por encima de 170 USD/MWh, precio con el que también es positivo el VAN.

El proyecto del Modelo A de la Empresa B y el de la Empresa C son también rentables con la tarifa de 113 USD/MWh, con una TIR no tan baja pero un VAN también negativo con capital propio. La TIR de ambos se hace atractiva con una tarifa por encima de 135 USD/MWh, y el VAN también es positivo.

Distinto es el caso del Modelo B de la Empresa B, en el que, con muy pocos sustratos adicionales de buen rendimiento de generación de biogás, el proyecto es rentable con la tarifa de 113 USD/MWh, con una TIR cercana al 20% y un VAN también atractivo. No obstante, este proyecto de generación es más complejo respecto de la operación y la mayor cantidad de variables que lo afectan. Para las estimaciones, se consideró como único costo de los cosustratos su transporte desde el origen hasta la planta. Al momento de realizar este estudio, los generadores de cosustratos consultados disponían sus residuos a costo propio, es decir, pagaban por su transporte y disposición final. Esta situación podría cambiar en el tiempo y tener un impacto en el proyecto de no realizarse un acuerdo sólido entre privados, lo que se presenta como un punto crítico que escapa el alcance del análisis.

Si los proyectos presentados en ese documento se analizan con la toma de un porcentaje de deuda para la inversión (Anexo I), la situación cambia, ya que la TIR es mayor y el VAN es positivo incluso con la tarifa de 113 USD/MWh, con las tres tasas de interés analizadas.

En cuanto al digestato, no se le asignó un valor económico en los proyectos considerados ya que no cuenta con un mercado formal; pero, en caso de poder comercializarlo o darle un valor agronómico interno, el retorno de la inversión debido a este ingreso generaría valor agregado a los proyectos.

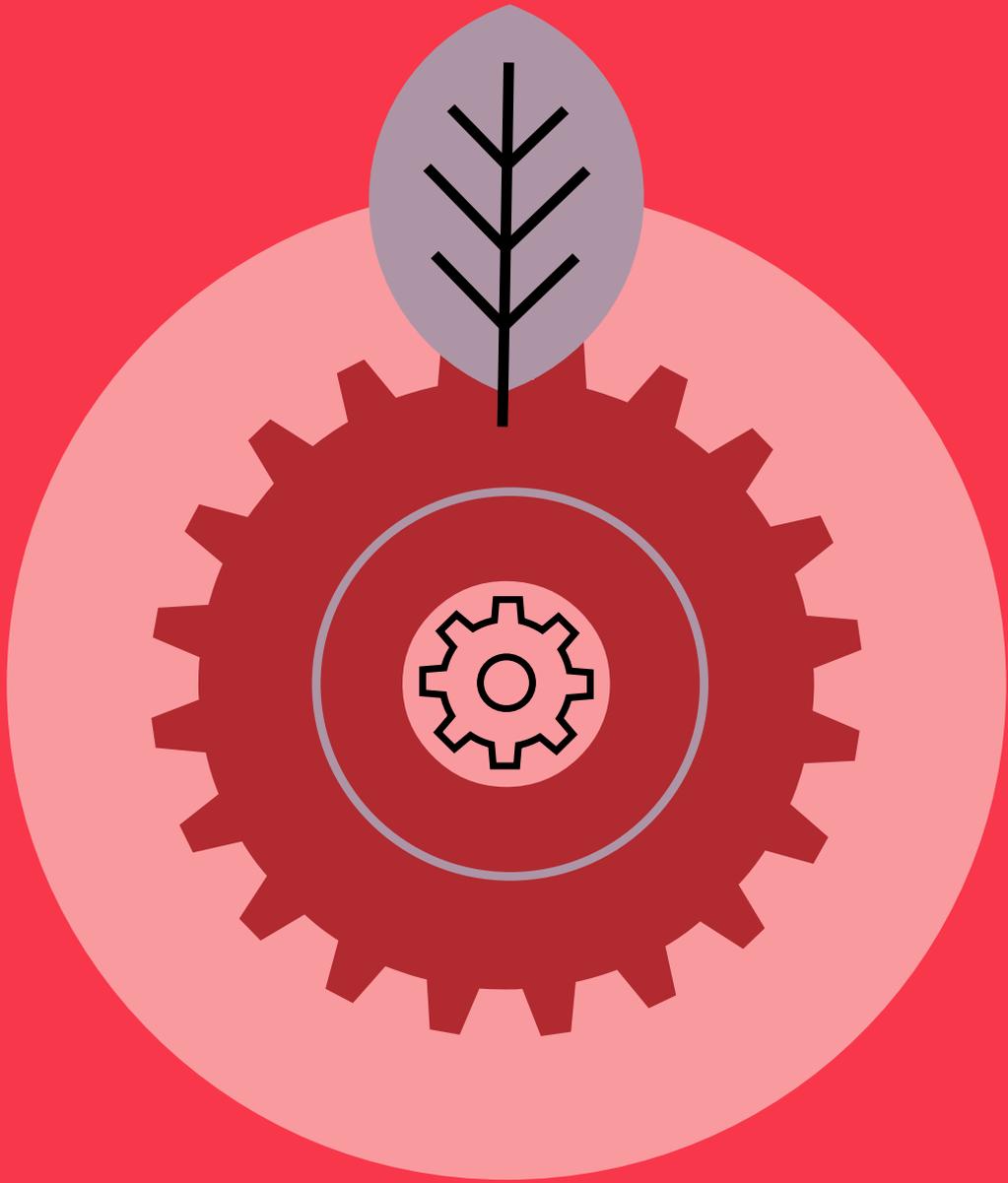
Desde el punto de vista ambiental, el valor más importante de estos proyectos se basa en el control de residuos orgánicos en general; para el caso de cosustratos, como grasas o glicerina, la mejora es directa ya que actualmente son dispuestos en forma deficiente y en muchos casos sin ningún tipo de control.

Otro aspecto ambiental medible es el referido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. Los GEI que se generan en procesos anaeróbicos abiertos se emiten directamente, en especial el metano (CH_4), pero si este se produce en un digester cerrado y luego es aprovechado o quemado, el efecto se reduce 21 veces. Actualmente no hay posibilidades concretas de gestionar Bonos de Carbono como los que se emitían bajo el Protocolo de Kyoto, pero este tipo de proyecto evitará emitir GEI, con un beneficio cierto a mediano y largo plazo.

Adicionalmente, estos proyectos servirán para mitigar olores que puedan afectar a la población y atraer vectores, una de las principales quejas de los vecinos de establecimientos de esta industria.

Más allá de los que surgen de la mejora ambiental, estos proyectos también generan beneficios sociales directos por la mano de obra nueva en la zona y la mejora en la generación de energía renovable localizada, que permite una mejor disponibilidad de la red.

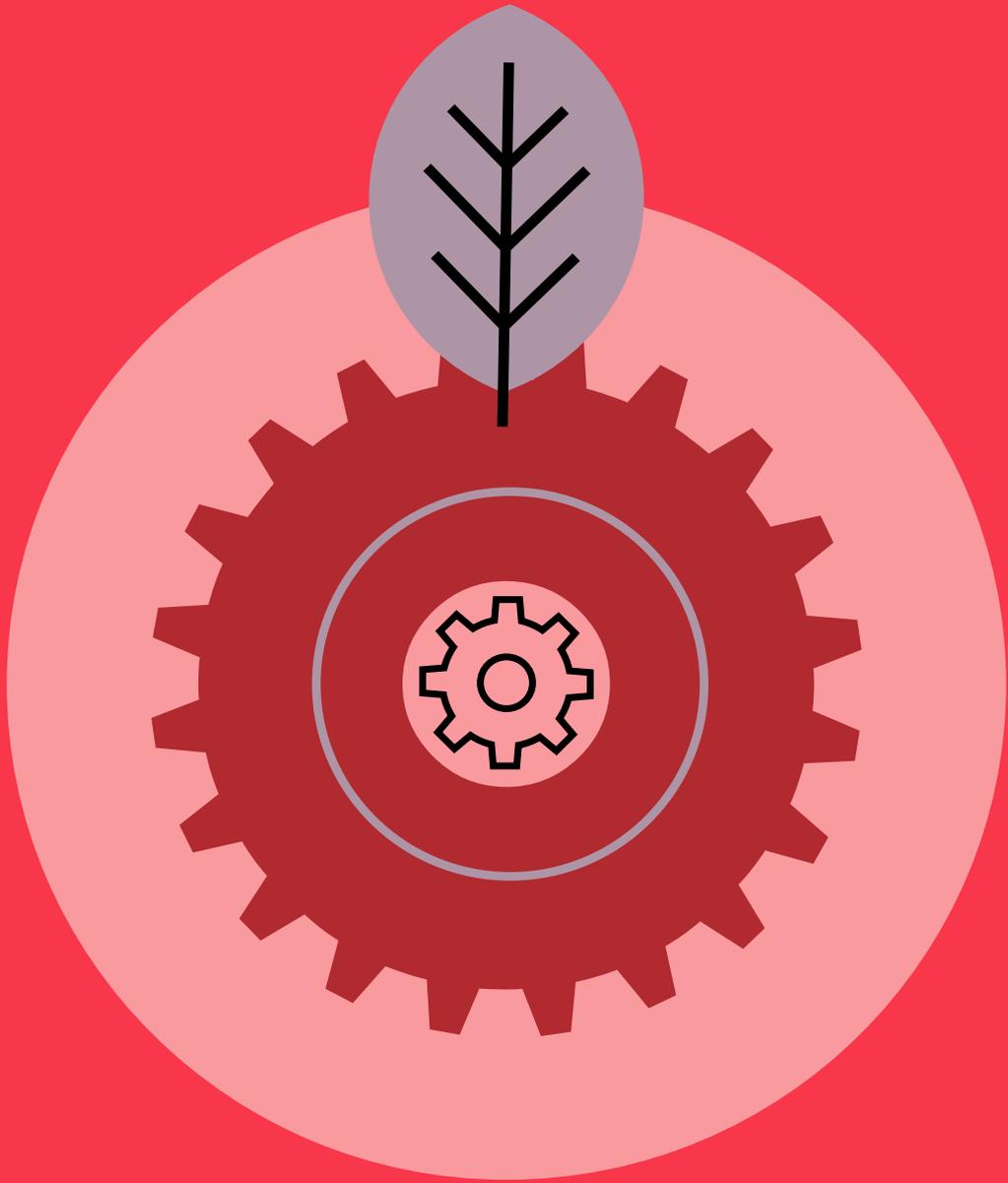
La mayor limitante para la realización de proyectos de este tipo es el costo de inversión inicial que se debe realizar para la implementarlos. Los altos costos de equipamiento y obra civil hacen que, incluso teniendo un buen retorno de inversión, resulten poco atractivos.



BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional de Energía (CNE) – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). 2006. *Potencial de Biogás: Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás.* Documento técnico.

Fachagentur Nachhaltende Rohstoffe e.V (FNR). 2010. *Guía sobre el biogás: desde la producción hasta el uso.* GIZ–BMZ (disponible en: <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>).



ANEXO I Análisis con financiamiento

Para las tres empresas se evaluó un financiamiento del 75% con distintas tasas interés: 3, 5 y 7%. En el Cuadro 15 se presentan los valores para cada caso, y en el Cuadro 16, un análisis de sensibilidad con las alternativas planteadas.

Cuadro 15. Análisis con financiamiento de los proyectos

Capex (USD)	Empresa A	Empresa B		Empresa C
		Modelo A	Modelo B	
Capex planta generación biogás completa	264 838	391 980	391 980	446 644
Tratamiento de biogás y generación de EE	220 215	302 570	373 424	304 284
Inversión total proyecto	485 053	694 550	765 404	750 928
Capital propio inversores	121 263	173 637	191 351	187 732

Fuente: Elaborado por el autor.

Cuadro 16. Análisis de sensibilidad con financiamiento de los proyectos

Tasa de interés (%)	Variación (%)	Precio USD/MW	TIR/VAN	Empresa A	Empresa B		Empresa C
					Modelo A	Modelo B	
7	0	113,0	TIR (%)	8,19	11,20	26,58	12,14
			VAN (USD)	89 216	324 605	2 020 536	415 618
	5	118,7	TIR (%)	9,36	12,73	27,73	13,25
			VAN (USD)	138 996	429 149	2 192 095	505 862
	10	124,3	TIR (%)	10,60	13,81	28,84	14,31
			VAN (USD)	193 965	512 897	2 363 653	596 107
5	0	113,0	TIR (%)	9,47	12,36	27,6	13,17
			VAN (USD)	198 420	511 893	2 559 708	618 909
	5	118,7	TIR (%)	10,61	13,78	28,75	14,30
			VAN (USD)	255 896	628 582	2 767 762	728 097
	10	124,3	TIR (%)	11,76	14,88	29,86	15,37
			VAN (USD)	316 297	729 917	2 975 816	837 285
3	0	113,0	TIR (%)	11,14	13,93	29,07	14,64
			VAN (USD)	359 833	792 518	3 371 359	926 664
	5	118,7	TIR (%)	12,26	15,27	30,22	15,78
			VAN (USD)	429 124	929 939	3 634 011	1 064 186
	10	124,3	TIR (%)	13,34	16,38	31,32	16,86
			VAN (USD)	498 993	1 057 581	3 896 663	1 201 709

Nota: La TIR y VAN del proyecto están calculadas a tasa ponderada promedio de costo capital (WACC).

Fuente: Elaborado por el autor.

ANEXO II Caracterización de efluentes

Personal de la Empresa B suministró una copia del programa de la lista de matanza para un área del establecimiento, en la que se muestra el detalle sobre procedencia, cantidad y peso vivo de los animales a faenar. Esto permitió establecer las características de operación del establecimiento el día de toma de muestras de efluentes. El plan original contemplaba la faena de 978 animales, pero se redujo a 930 en el período de 8 horas de operación (6:00 a 14:00 horas).

Resumen de datos de faena

- Horario: 6:00 - 14:00.
- Período: 8 horas.
- Cantidad de animales: 930.
- Peso vivo: 425 010 kg.
- Peso medio: 457 kg/animal.
- Proceso: 116,25 animales/hora.

Al disponer del detalle de la cantidad y el peso de los animales faenados, se realizó otra estimación de la cantidad de sólidos generada: de acuerdo con el peso de cada lote de animales, se asignó un valor proporcional de sólido producido, que se presenta en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Estudio de efluentes y sólidos de descarga, Empresa B

Sólidos de descarga Línea Verde		
Animales (N.º de lote)	Peso promedio (kg)	Sólidos (m ³)
33	503	1,14
15	620	0,67
14	636	0,64
28	565	1,12
28	556	1,09
33	552	1,28
29	519	1,04
31	536	1,16
31	533	1,15
31	526	1,13
33	470	1,05
31	525	1,13
37	438	1,07
28	558	1,10

Animales (N.º de lote)	Peso promedio (kg)	Sólidos (m ³)
31	431	0,88
6	544	0,23
3	573	0,12
31	477	1,00
35	327	0,68
48	287	0,77
45	306	0,79
48	305	0,84
35	458	1,07
10	337	0,20
5	330	0,10
19	327	0,37
23	576	0,94
25	535	0,93
32	404	0,83
39	427	1,09
30	410	0,80
4	573	0,16
17	440	0,50
9	488	0,30
10	440	0,29
22	488	0,73
1	573	0,04
930		28,45
1 000		30,59

Fuente: Elaborado por el autor con datos de la Empresa B.

La cantidad de sólidos verdes generada está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen sólido verde (m}^3\text{/100 animales)} = 0,0085714 * \text{Peso animal (kg)} - 0,85713$$

Considerando una densidad promedio de 670 kg/m³, la masa de sólidos verdes generada para 1 000 animales es de 20 495 kg.

En el Cuadro 18 se presentan los parámetros de diseño del estudio de efluentes.

Cuadro 18. Estudio de efluentes y parámetros de diseño, Empresa B

	1 Verde Homogeneizado	2 Rojo Homogeneizado	3 Verde Sólido (g%)
Amonio (mg/l)	213	53	–
DBO ₅ (mg/l)	7 657	5 130	–
DQO (mg/l)	7 800	7 980	–
Fósforo total (mg/l)	41,7	14,4	–
Sólidos totales (mg/l)	5 832	3 935	16,3
Sólidos totales fijos (mg/l)	1 538	1 450	1,8
Sust. extraíbles con éter (mg/l)	590	2 781	–
Conductividad (μS/cm)	> 1 500	–	–
Nitrógeno total (mg/l)	300	450	–

Línea Verde	1 Verde Homogeneizado	
	Por hora	Por día
Caudal (estimado) (m ³)	70	560
Sólidos totales (kg seco)	408,24	3 265,92
Sólidos totales (kg húmedo)	–	20 036,32
Sólidos totales (m ³)	–	33,39
Sólidos totales fijos (kg)	107,66	861,28
DBO ₅ (kg)	535,99	4 287,92
DQO (kg)	546	4 368
Fósforo total (kg)	2,919	23,352
Sust. extraíbles con éter (kg)	41,3	330,4
Nitrógeno total (kg)	21	168

Línea Roja	2 Rojo Homogeneizado	
	Por hora	Por día
Caudal (estimado) (m ³)	60	480
DBO ₅ (kg)	307,8	2 462,4
DQO (kg)	478,8	3 830,4
Fósforo total (kg)	0,864	6,912
Sólidos totales (kg)	236,1	1 888,8
Sólidos totales fijos (kg)	87	696
Sust. extraíbles con éter (kg)	166,86	1 334,88
Nitrógeno total (kg)	27	216
Lavado total (Verde + Rojo)		
Caudal (estimado) (m ³)	80	320
DQO (estimado) (mg/l)	5 300	-
DQO (kg)	424	1 696
Caudal total (m ³)	-	1 360
DQO total (kg)	-	9 894,4

Observaciones:

- El efluente de la línea verde adopta las propiedades de la corriente 1 Verde Homogeneizado.
- El efluente de la línea roja adopta las propiedades de la corriente 2 Rojo Homogeneizado.
- Los valores expresados en kg/día se refieren a día de operación con faena; para el diseño, estos valores se reducen por un factor 4/7, ya que se opera durante 4 días por semana.
- Para la línea verde y roja se adoptan 8 horas diarias y para el efluente producido por el lavado de planta posterior a la faena se consideran 4 horas.

Fuente: Elaborado por el autor sobre información del personal de la empresa.

Modelo de negocio de aprovechamiento energético de biogás en frigoríficos

COLECCIÓN
INFORMES
TÉCNICOS

N.º 6

Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

www.fao.org

ISBN 978-92-5-131994-9



9 789251 319949

CA7132ES/1/11.19