



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía

TRABAJO FIN DE GRADO

*para acceder al Título de
Ingeniería de los Recursos Energéticos*

**ESTUDIO ENERGÉTICO Y DE VIABILIDAD
ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOMETANO
EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE
CANTABRIA**

***ENERGY AND ECONOMIC VIABILITY STUDY OF A
BIOMETHANE PLANT IN THE AUTONOMOUS
COMMUNITY OF CANTABRIA***

Autor: Soraya Sánchez Rodrigo

Director: Juan Carcedo Haya

Convocatoria: 8 de Julio de 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS Y ALCANCE	3
3	ENTORNO DE ESTUDIO.....	5
3.1	Climatología	6
3.1.1	Termometría.....	6
3.1.2	Pluviometría.....	6
3.2	Situación de la ganadería en Cantabria.....	7
3.3	Problemática de los residuos ganaderos	7
3.3.1	Efectos de la aplicación de purines en exceso.....	8
3.3.2	Normativa de gestión de purines	9
3.3.3	Modelo de gestión de estiércoles en Cantabria	11
3.4	Situación del biogás y biometano en Cantabria.	13
3.5	Objetivos autonómicos	14
4	ESTADO DEL ARTE	16
4.1	Introducción a la digestión anaerobia	17
4.1.1	Digestión anaerobia.....	17
4.2	Factores determinantes en la producción de biogás	20
4.2.1	Aspectos claves de la materia prima.....	20
4.2.2	Parámetros operacionales.	27

4.2.3	Parámetros ambientales	30
4.3	Acondicionamiento del material de digestión	33
4.4	Tipos de digestores anaerobios	34
4.4.1	Régimen de alimentación	35
4.4.2	Intensidad de la mezcla	36
4.4.3	Manejo del sustrato	36
4.4.4	Manejo bioquímico.....	38
4.5	Productos de la digestión anaerobia.....	39
4.5.1	Biogás	39
4.5.2	Digestato	45
4.6	Biometano	46
4.6.1	Proceso de obtención	47
4.6.2	Usos	51
4.6.3	Regulación y normativa	53
5	APLICACIÓN AL CASO PRÁCTICO	55
5.1	introducción	56
5.2	Ubicación geográfica.	56
5.2.1	Macrolocalización	56
5.2.2	Microlocalización	57
5.3	Disponibilidad del residuo	60

5.3.1	Análisis del recurso en la CCAA	60
5.3.2	Análisis del recurso en la zona de estudio	66
5.4	Dimensionamiento de la planta de digestión anaerobia	68
5.4.1	Cantidad de residuo tratado diariamente.	68
5.4.2	Cantidad de biogás obtenido	69
5.4.3	Cantidad de digestato obtenido	69
5.4.4	Tanque de alimentación.....	70
5.4.5	Selección de la temperatura de trabajo.....	71
5.4.6	Tiempo de retención hidráulico (TRH)	72
5.4.7	Carga orgánica volumétrica (COV)	73
5.4.8	Volumen de digestor.....	73
5.4.9	Tanque de almacenamiento de digestato.	75
5.4.10	Tabla resumen del dimensionamiento de la planta	75
5.5	productos finales del proceso	76
5.5.1	Biometano	76
5.5.2	Digestato como fertilizante.....	79
5.6	Justificación energética y ambiental de la planta	79
5.6.1	Energía cubierta	79
5.6.2	Ahorro de emisiones CO ₂	80
5.7	estudio viabilidad económica.	81
5.7.1	Inversión:	82

5.7.2	Análisis de costes:	82
5.7.3	Análisis de ingresos:	85
5.7.4	Análisis de rentabilidad	87
6	CONCLUSIONES.....	92
7	BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1: Zonas climatológicas de Cantabria. (1)</i>	6
<i>Figura 3.2: Impacto medio ambiental de la actividad ganadera. (22)</i>	9
<i>Figura 4.1: Esquema de las reacciones producidas en la digestión anaerobia. (8)</i>	19
<i>Figura 4.2: Caracterización de la co-digestión de diferentes residuos orgánicos.</i>	25
<i>Figura 4.3: Aprovechamiento energético del biogás.</i>	43
<i>Figura 4.4: Proceso y tecnologías de enriquecimiento del biogás. (15)</i>	47
<i>Figura 4.5: Esquema de proceso de absorción química. (14)</i>	48
<i>Figura 4.6: Esquema de proceso PSA. (14)</i>	49
<i>Figura 4.7: Esquema de proceso de separación criogénica. (14)</i>	49
<i>Figura 4.8: Esquema de proceso de membranas. (14)</i>	50
<i>Figura 4.9: Esquema de proceso Pressurized Water Scrubbing. (14)</i>	51
<i>Figura 5.1: Situación de la Comunidad Autónoma de Cantabria.</i>	56
<i>Figura 5.2: Situación de la zona de estudio.</i>	57
<i>Figura 5.3: Censo de ganado en Cantabria. (2)</i>	57
<i>Figura 5.4: Flujos de entrada y salida en el upgrading.</i>	78
<i>Figura 5.5: Esquema resumen dimensionamiento y productos de la planta</i>	79
<i>Figura 6.1: Costes en función del caudal de biogás tratado (30)</i>	93

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1: Número de animales según edad y peso. (2)</i>	7
<i>Tabla 3.2: Potenciales energéticos del biogás y biometano en Cantabria, 2018 (5).</i>	14
<i>Tabla 4.1: Contenido en agua y sólidos totales de diferentes sustratos. (3)</i>	25
<i>Tabla 4.2: Tiempo de retención hidráulica para algunas materias primas (8).</i>	29
<i>Tabla 4.3: Rango de pH idóneo para cada grupo de bacterias. (9)</i>	31
<i>Tabla 4.4: Relación C/N para algunos sustratos. (9)</i>	32
<i>Tabla 4.5: Compuestos inhibidores en el proceso. (10)</i>	33
<i>Tabla 4.6: Porcentajes de composición del biogás. (11)</i>	40
<i>Tabla 4.7: Propiedades del metano. (12)</i>	41
<i>Tabla 4.8: Características generales del biogás. (6)</i>	42
<i>Tabla 4.9: Sustancias contaminantes en el biogás y sus efectos. (10)</i>	43
<i>Tabla 4.10: Comparativa entre la composición del biogás y del biometano. (15)</i>	47
<i>Tabla 4.11: Especificaciones para la inyección de todo tipo de gas en la red de gas natural. (17)</i>	52
<i>Tabla 4.12: Especificaciones de gases no convencionales para su inyección en la red gasista (17)</i>	52
<i>Tabla 5.1: Matriz de decisión del emplazamiento de la planta.</i>	59
<i>Tabla 5.2: Imagen satélite de la zona geográfica de las alternativas de estudio (18).</i>	60
<i>Tabla 5.3: Número de ganado bovino en Cantabria y peso medio vivo (2).</i>	61
<i>Tabla 5.4: Características físico-químicas del biogás. (16)</i>	62
<i>Tabla 5.5: Resumen de ahorro de emisiones de CO2 para las diferentes alternativas en la CC.AA</i>	66
<i>Tabla 5.6: Censo de ganado en los municipios de recogida de residuo. (2)</i>	66
<i>Tabla 5.7: Número de reses por municipio y edad. (2)</i>	67
<i>Tabla 5.8: Tabla resumen del dimensionamiento de la planta.</i>	76
<i>Tabla 5.9: Tipos de acondicionamiento según uso.</i>	77
<i>Tabla 5.10: Características de la tecnología de membranas. (16)</i>	77
<i>Tabla 5.11: Resumen de ahorro de emisiones de CO2 para las diferentes alternativas</i>	81
<i>Tabla 5.12: Costes anuales en la planta de producción de biogás.</i>	83

<i>Tabla 5.13: Costes asociados una vez producido el biogás.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 5.14: Costes en la generación del biometano.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5.15: Costes asociados a la gestión del residuo.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 5.16: Ingresos obtenidos en la planta.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5.17: Datos para el cálculo del VAN y TIR.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 5.18: Cálculo del VAN y TIR para la opción 1.</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 5.19: Cálculo del VAN y TIR para la opción 2.</i>	<i>91</i>

1 INTRODUCCIÓN

A día de hoy el ser humano debe de encontrar alternativas que reemplacen el uso de energías fósiles, bien con visión futura de cuidar y no contribuir a la contaminación del planeta, y además, con visión de que los combustibles fósiles son un recurso finito que acabará por agotarse. Por ello, se buscan nuevas alternativas que permitan cubrir la demanda y necesidades energéticas a partir del uso de energías limpias, eludiendo al uso de las fósiles. Una de las energías renovables que ha despertado mayor interés en los últimos tiempos es el Biogás y la obtención de biometano a partir de este. El Biogás se obtiene de la fermentación anaeróbica de los residuos orgánicos. Este proceso se lleva a cabo en las plantas de biogás en las cuales se realiza el tratamiento anaerobio de residuos provenientes de la agricultura, la agroindustria y la ganadería para posteriormente ser enriquecido mediante un sistema de enriquecimiento y valorización, obteniendo así el biometano como gas renovable de uso similar al gas natural.

Tradicionalmente la ganadería y la generación de los desechos ganaderos ha ido en sintonía con la agricultura y la superficie de campos de cultivo en los que se usaban estos desechos como fertilizante, manteniendo un equilibrio ecológico estable. En la actualidad, la intensificación de la ganadería y la industria láctea, y el declive de la agricultura, están originando problemas tanto de contaminación de suelos como de gestión de dichos residuos.

En Cantabria, a pesar de la disminución de la ganadería en los últimos años, sigue habiendo numerosas ganaderías y numerosas cabezas de ganado, que pueden dar lugar a una fuente de energía limpia si sus desechos se gestionan desde el punto de vista energético. Predomina el ganado bovino, seguida de otras especies como el ovino y el caprino.

2 OBJETIVOS Y ALCANCE

La finalidad de este estudio es la viabilidad tanto energética como económica de la ejecución de una planta de biometano mediante la valorización y el tratamiento de los residuos procedentes de las ganaderías en la Comunidad Autónoma de Cantabria, aprovechando su capacidad energética por un lado, y sus propiedades orgánicas y fertilizantes por otro. El trabajo se centra principalmente en la cuantificación de dicho residuo, su aprovechamiento mediante la digestión anaerobia y su posterior enriquecimiento para la obtención de biometano, un gas renovable totalmente limpio, que contribuye al desarrollo de una economía circular y favorece la transición energética contribuyendo a la descarbonización del sistema energético.

3 ENTORNO DE ESTUDIO

3.1 CLIMATOLOGÍA

La climatología en la región de Cantabria viene caracterizada por dos climas diferenciados, un clima atlántico templado y otro mediterráneo. La distinción entre estos dos climas se encuentra separada por la cordillera Cantábrica, que ofrece un efecto barrera y separa la zona atlántica al norte de la región y la mediterránea al sur. Esta última con temperaturas de mayor contraste térmico.

En general, la región presenta un clima atlántico templado, con una pluviosidad media y temperaturas suaves todo el año debido a la influencia de la corriente del Golfo, que aporta aguas cálidas al Mar Cantábrico.



Figura 3.1: Zonas climatológicas de Cantabria. (1)

3.1.1 Termometría

Como se ha mencionado anteriormente, las temperaturas en Cantabria son suaves, con valores de mínima que rara vez bajan de los 0°C y superan los 25°C. La temperatura media anual ronda los 14-15°C.

3.1.2 Pluviometría

En cuanto a la pluviometría, esta tiene gran complejidad, debido a los diferentes valles que cuentan con grandes contrastes y diferencias, tanto en la termometría como en la

pluviometría. El resumen general de la provincia es la abundancia de precipitaciones a lo largo del año con mayores valores en los meses de otoño e invierno. La precipitación media anual ronda los 1000-1400 mm **(1)**.

3.2 SITUACIÓN DE LA GANADERÍA EN CANTABRIA

La cabaña ganadera de origen bovino en Cantabria, está formada, en el año 2021, por un número de cabezas totales de 275.027, distribuidas en sus 102 municipios **(2)**. Este sector ganadero, es un sector predominante en la Comunidad Autónoma. Es por ello, que se procede al estudio de dicho recurso para su aprovechamiento energético.

La cantidad de excreta generada es de aproximadamente 0,086 kg por cada kg de peso vivo animal **(3)**. En la siguiente tabla se muestra el número de animales según edades, el porcentaje sobre el total y su peso vivo medio según edad.

Tabla 3.1: Número de animales según edad y peso. (2)

Edades	Número de animales	% de animales	Peso vivo (kg)
Menores de 12 meses	58.086	21,12 %	300-350
Mayores de 12 y menores de 24 meses	41.226	14,99 %	500
Mayores o igual a 2 años	175.715	63,89 %	700-750
TOTAL	275.027	100 %	

3.3 PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS GANADEROS

Tradicionalmente la ganadería y la generación de los desechos ganaderos ha ido en sintonía con la agricultura y la superficie de campos de cultivo en los que se usaban estos desechos como fertilizante. El estiércol tiene alto potencial como fertilizante orgánico debido a su contenido en nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica entre otros. En la actualidad, la intensificación de la ganadería y la industria láctea está originando problemas tanto de contaminación de suelos como de gestión de los residuos. La cantidad de desechos en proporción a la superficie de terrenos en los que depositarlos va en aumento, y esto unido a su mal uso y gestión, está favoreciendo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y amoníaco y la acumulación de nutrientes y sustancias, que en exceso producen la eutrofización y la

contaminación tanto de las aguas subterráneas como de las aguas superficiales, además de los malos olores, que causan gran rechazo social. Esta intensificación ha conllevado a la aparición de sustancias contaminantes en la propia alimentación animal y a un aumento del consumo de agua. Estos contaminantes se ven reflejados en sus propios desechos y estos desechos se vierten a la superficie. Es por ello, que la industria ganadera tiene la necesidad de gestionar sus residuos de manera eficiente, ya que uno de los principales problemas ambientales de la comunidad, es la contaminación de ríos y acuíferos por los purines ganaderos.

3.3.1 Efectos de la aplicación de purines en exceso.

La aplicación agronómica en exceso de purines, acarrea una serie de consecuencias que afectan tanto a la atmósfera como al suelo y el agua.

3.3.1.1 Efectos atmosféricos

Algunos efectos atmosféricos son:

- Emisión de gases como el óxido nitroso (N_2O) y el amoníaco (NH_3).
- Malos olores debidos a la evaporación de los compuestos amoniacales y a la putrefacción de la materia orgánica, que produce ácido sulfhídrico y otros compuestos aromáticos.

3.3.1.2 Efectos en el suelo

Los efectos del suelo son:

- Presencia residual de iones de metales pesados, como cobre o zinc que aunque se encuentren en bajas concentraciones, pueden acumularse e incorporarse a la cadena trófica a través de los microorganismos que habiten en el suelo.
- Riesgo de salinización de los sustratos.
- Posible contaminación por agentes patógenos presentes en el purín.

3.3.1.3 Efectos en el agua

Los efectos del agua son:

- Presencia de iones de nitrato (NO_3) en las aguas tanto superficiales como subterráneas debido a la condición de ion negativo y su alta solubilidad que favorece la lixiviación hacia las aguas subterráneas.
- Eutrofización de las aguas por el enriquecimiento de nutrientes. Esto produce un crecimiento en las algas y al morir sufren un proceso de putrefacción produciendo mal olor y un gran consumo de oxígeno.
- Presencia de metales pesados.
- Contaminación de las aguas por patógenos procedentes del purín.

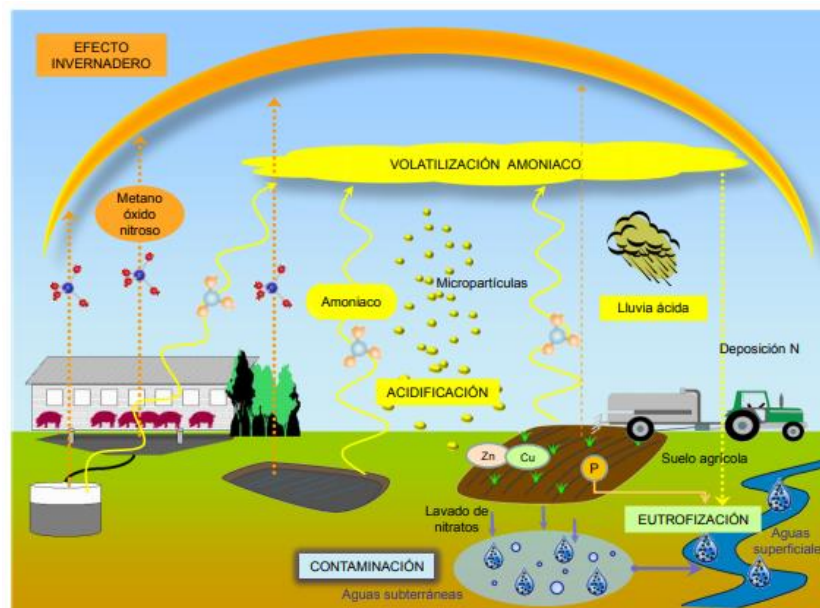


Figura 3.2: Impacto medio ambiental de la actividad ganadera. (22)

3.3.2 Normativa de gestión de purines

Los residuos ganaderos se engloban dentro de los residuos del sector primario y dichos residuos están acogidos a la siguiente normativa (4):

3.3.2.1 Normativa comunitaria europea

- Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril, relativa a los residuos.
- Resolución del Consejo de 24 de febrero de 1997 sobre estrategia de gestión de residuos.
- Directiva 91/676/CEE, del Consejo de 12 de diciembre 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.

- Acuerdos y compromisos internacionales, como el Protocolo de Kioto (sobre emisiones de gases de efecto invernadero) y el Protocolo de Gotemburgo (sobre emisiones a la atmósfera de carácter transfronterizo), de gran importancia en cuanto a las limitaciones en las emisiones de amoníaco.
- Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de diciembre de 2016, relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la directiva 2001/81/CE

3.3.2.2 Normativa estatal

- Ley 10/1998, de 21 de abril, básica de residuos.
- Orden MAM 304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y Lista Europea de Residuos.
- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.
- Real Decreto 708/2002, de 19 de julio, por el que se establecen medidas complementarias al Programa de Desarrollo Rural para las Medidas de Acompañamiento de la Política Agraria Común.
- Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes.
- El Real Decreto 980/2017, de 10 de noviembre que modifica, el Real Decreto 1078/2014, de 19 de diciembre, por el que se establecen las normas de condicionalidad.
- El Real Decreto 1378/2018, del 8 de noviembre, que modifica también el Real Decreto 1078/2014.
- Real Decreto 1416/2002, por el que se regula el proceso de evaluación para el registro, autorización y comercialización de biocidas y el Real Decreto 198/2000, de 11 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 280/1994, de 18 de febrero, por el que se establecen los límites máximos de residuos plaguicidas y su control en determinados productos de origen vegetal.
- Real Decreto 4/2001, de 12 de enero, por el que se establece un régimen de ayudas a la utilización de métodos de producción agraria compatibles con el medio ambiente.

-
- Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de montes.
 - Ley 6/1984, de 29 de octubre, sobre protección y fomento de las especies forestales autóctonas.
 - Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del patrimonio natural y de la biodiversidad.

3.3.2.3 Normativa autonómica

- Ley 10/1998, de 21 de abril, básica de residuos.
- Orden GAN/25/2006, de 16 de Marzo por el que se transpone a la normativa autonómica el Real Decreto 4/2001, de 12 de Enero.
- Orden GAN/68/2006, de 24 de julio, por la que se establecen las buenas condiciones agrarias y medioambientales exigibles por condicionalidad en el marco de las ayudas directas de la política agraria común.
- Resolución de 25 de enero de 2000, por la que se declara la inexistencia de zonas vulnerables según la Directiva 91/676/CEE de protección de las aguas contra la contaminación por nitratos procedentes de fuentes agrarias.
- Orden de 10 de febrero de 1994, de las Consejerías de ganadería, agricultura y pesca y sanidad, consumo y bienestar social, por la que se establecen normas para la inscripción en el registro oficial de establecimientos y servicios plaguicidas de la comunidad autónoma de Cantabria.
- Código de Buenas Prácticas Agrarias de Cantabria.

3.3.3 Modelo de gestión de estiércoles en Cantabria

En la CCAA de Cantabria existe un modelo de gestión de estiércoles que debe de ser resultado de la combinación de varios sistemas de gestión. El modelo plantea los siguientes sistemas **(4)**:

- Gestión en las explotaciones ganaderas.
- Gestión tradicional de los estiércoles.
- Implantación de plantas de tratamiento para los excedentes de estiércoles.

3.3.3.1 *Gestión en las explotaciones ganaderas*

Este tipo de gestión se basa en la minimización de la generación de estiércoles y en la adecuación de los sistemas de almacenamiento. Para ello se incidirá sobre los siguientes factores:

- Alimentación: la composición y cantidad del pienso suministrado influirá en el volumen de los estiércoles producidos. Utilizando forrajes de alta digestibilidad se reduce la cantidad de residuo generado en relación al ingerido por el animal.
- Sistema de limpieza: se trata de un factor muy importante debido a que el volumen de estiércoles es proporcional al sistema de limpieza empleado. Trabajar con aguas a altas presiones y bajo caudal supone una disminución de entre el 10% y el 20% del volumen total de estiércoles.
- Destino de las aguas pluviales: la desviación de agua de lluvia fuera de la fosa de almacenamiento de estiércol supone una reducción importante de su volumen en la fosa.
- Adecuación de sistemas de almacenamiento para lo cual se deberá:
 - Evitar la entrada de agua en las fosas de almacenamiento.
 - El volumen de la fosa de almacenamiento debe permitir contener los estiércoles producidos por el ganado durante el periodo en el que su uso como fertilizante sea desaconsejable.
 - Garantizar la estancia de al menos 3 meses del estiércol en reposo previos a su aplicación en el terreno para disminuir la carga contaminante.
 - Usar fosas estancas evitando los vertidos directos al medio natural.

3.3.3.2 *Gestión tradicional de los estiércoles*

Esta gestión se basa en la utilización de los estiércoles como fertilizante agrícola, debido a su alto contenido en nutrientes y a que presenta una serie de ventajas:

- Se aprovecha el potencial como fertilizante en los cultivos y praderas.
- Se reduce el coste económico en el uso de fertilizantes de síntesis.
- Se evita el coste de recogida, transporte y mantenimiento.

-
- Se apuesta por la agricultura sostenible y un equilibrio con el medio ambiente.

La utilización de estos residuos se deberá realizar en la superficie agraria útil (SAU) del propio ganadero y cuando esto no sea posible, sobre una SAU perteneciente a otro ganadero/agricultor de la zona o superficies forestales, etc.

Se deberá garantizar mediante planes específicos de gestión de estiércoles que la dosis de aplicación es correcta y no se excede.

En Cantabria, tras el estudio de explotaciones y superficie agraria útil se ha llegado a la conclusión de que este residuo ganadero podría tener superficie agraria útil suficiente para su uso como fertilizante sin exceder la cantidad por hectárea que dicta la ley. El problema es que muchas de las zonas de esta comunidad autónoma cuentan con superficies abruptas con más de un 20% de pendiente por lo que resulta costoso el uso de maquinaria para su distribución en superficie.

3.3.3.3 Implantación de plantas de tratamiento para los excedentes de estiércoles

El modelo de gestión contempla esta opción para el caso en que se diese algún sobrante local de estiércol o que no fuese posible su uso de forma segura o razonable. Se plantea que en cada caso, en función de la peculiaridad municipal o comarcal se realice un análisis preciso que determine como mínimo las siguientes características de la planta:

- Cantidad de excedentes y a tratar en la planta.
- Ubicación más adecuada dentro de la región para ahorrar costes de transporte.
- Forma de afrontar los costes de tratamiento y mantenimiento de la planta.
- Posibilidad de usar la materia orgánica resultante para procesos de compostaje.

3.4 SITUACIÓN DEL BIOGÁS Y BIOMETANO EN CANTABRIA.

En la actualidad, Cantabria cuenta con algunas plantas individuales de biogás pero ninguna centralizada. La suma de estas plantas individuales generan los siguientes potenciales por sectores en el año 2018 **(5)**:

Tabla 3.2: Potenciales energéticos del biogás y biometano en Cantabria, 2018 (5).

	Potencial Biogás (Nm ³ /h)	Potencial Biometano (Nm ³ /h)	Potencial energético anual (GWh)	Potencial energético anual (bcm*)
SECTOR EDAR**	1.645	938	81,8	0,0070
SECTOR RSU***	2.986	1.560	136,1	0,012
SECTOR GANADERO	4.065	2.317	202	0,017
SECTOR AGROALIMENTARIO	85,4	48,7	4,2	0,00036

*BCM: Metros cúbicos hora, medidos en condiciones normales.

**EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

***RSU: Residuos Sólidos Urbanos.

A pesar de que en la actualidad no se cuente con ninguna planta de tratamiento de desechos ganaderos que aproveche la energía en forma de biogás y revalorice estos desechos como fertilizante, el plan de sostenibilidad energética de Cantabria prevé en un futuro la instalación de varias plantas tanto de biomasa de origen forestal como de biogás para la gestión de lodos de depuradoras y residuos ganaderos con un aprovechamiento de unas 320.000 t/año de purines.

3.5 OBJETIVOS AUTONÓMICOS

Las consecuencias medio ambientales de la actividad humana están siendo motivo de preocupación social y de control, intentando enfocar esta actividad de la mejor forma posible para la disminución de los gases y productos contaminantes de la actividad diaria. La cantidad de emisiones de CO₂ en la comunidad es de 5.241 kt en el año 2020 (6).

El cambio climático debido a la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) es un fenómeno global que requiere de una respuesta multilateral basada en la colaboración de todos los países. Se busca con ello, estrategias para avanzar hacia una economía baja en carbono que mitigue los efectos del aumento de la temperatura global.

El gobierno de Cantabria uniéndose a los esfuerzos y compromisos de cambio tanto a nivel estatal, como europeo y mundial, cuenta con una estrategia, “Estrategia Cántabra de

Acción frente al Cambio Climático 2018-2030” **(6)**, en la que se incluyen medidas de reducción de emisiones directas y cuantificables en los diferentes sectores e incentivación hacia un cambio de modelo de vida en la que la disminución del carbono sea uno de los objetivos principales.

Algunas de las medidas a tener en cuenta y que tienen relación con el modelo de una planta de biogás son:

- Generación eléctrica a partir de energías renovables aumentando los kwh/año a partir de biomasa.
- Ayudas a la transformación y comercialización de productos de la pesca y de la acuicultura.
- Conectividad de sistemas agro-ganadero-consumidor.
- Potenciar el uso de fertilizantes orgánicos.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 INTRODUCCIÓN A LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

4.1.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico en ausencia de oxígeno en el que se produce la degradación de la biomasa según ciertos procesos bioquímicos conocidos como fermentaciones **(7)**. Como resultado de este proceso se obtiene la conversión de la materia prima orgánica en biogás y en un subproducto conocido como digestato o fertilizante.

Los procesos anaeróbicos son procesos microbianos bastante complejos. Las bacterias son las principales implicadas, aunque también pueden estar implicados grupos tróficos como protozoos y hongos anaerobios. La población microbiana contiene diversos tipos de bacterias, bacterias anaerobias obligadas (estrictamente en ausencia de oxígeno) y bacterias facultativas (con capacidad de funcionar en ambientes aerobios).

Esta reacción se produce dentro de unos depósitos llamados biodigestores.

4.1.1.1 Etapas del proceso anaerobio

La digestión anaeróbica surge de la actividad coordinada de varios grupos tróficos que aseguran la estabilidad en el proceso de degradación del sustrato. Los sustratos se componen de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos **(7)**. Cada grupo de microorganismo se caracteriza por tener diferentes velocidades de crecimiento y diferentes sensibilidades a cada compuesto. Por ello, se necesita de un desarrollo estable del proceso en función de la composición de la materia prima, que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores, o acumulaciones de grasos volátiles que produzcan una variación en el pH. Todo ello implica que la velocidad del conjunto del proceso este limitada por la velocidad de la etapa más lenta y esta etapa depende a su vez, de la composición del residuo. Cada etapa, según sus propiedades, tiene una estrategia para la aceleración de tiempos en la medida de lo posible.

Las etapas son las siguientes:

- Hidrólisis:

La hidrólisis es un proceso enzimático producido por microorganismos hidrolíticos. En esta etapa se produce la conversión de polímeros complejos en sus respectivos monómeros, convirtiendo los compuestos complejos en compuestos solubles y facilitando el acceso de los

microorganismos a través de la pared celular del compuesto. Este paso inicial consigue que los microorganismos posteriores, es decir, las bacterias acidogénicas o fermentativas, inicien el proceso de digestión anaerobia transformando las proteínas, los carbohidratos y los lípidos, en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga.

Esta etapa puede ser limitante en la velocidad global del proceso cuando se tratan residuos con un alto contenido de sólidos y además, depende de algunos factores como: temperatura del proceso, tiempo de retención, composición del sustrato, tamaño de partículas, etc, pudiéndose mejorar mediante algunos pretratamientos.

- Acidogénesis o fermentación:

En esta etapa se produce la fermentación de los polímeros más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos) obtenidos en la etapa de la hidrólisis. En el proceso, se produce por una parte la fermentación de los aminoácidos y azúcares dando lugar a ácido acético, y por otra, la oxidación anaeróbica de los ácidos grasos que dan lugar a ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Estos productos son tratados directamente por las bacterias metanogénicas, pero en ambos procesos, se forman compuestos intermedios como son el ácido propiónico, butírico, etc, que necesitan de la intervención de las bacterias acetogénicas para simplificarlos.

Estas bacterias adquieren gran importancia en el conjunto global del proceso debido a que, además de ser las encargadas de producir el alimento para los posteriores grupos de bacterias involucradas en el proceso, eliminan por completo la presencia de oxígeno.

- Acetogénesis:

Fase formada por microorganismos acetogénicos encargados de transformar aquellos productos que no tengan la capacidad de ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos posteriores (productos intermedios), en productos más sencillos como acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

En la finalización de esta etapa, la mayoría de bacterias ya han extraído todo el alimento de la biomasa desechando los propios productos de desecho de sus células. Estos desechos serán el sustrato del siguiente y último grupo de bacterias intervinientes en el proceso, las bacterias metanogénicas.

- Metanogénesis:

La metanogénesis es la etapa final que completa el proceso de digestión anaeróbica. La componen las bacterias metanogénicas que convierten los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias estrictamente anaerobias que no soportan la presencia de oxígeno.

Este grupo de microorganismos consta de dos tipos de bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas y las acetoclásticas. Las hidrogenófilas se encargan de consumir el hidrogeno generado en la reacción anterior y las acetoclásticas, los ácidos propanoico y acético, que producen como último resultado el metano y dióxido de carbono, el llamado biogás.

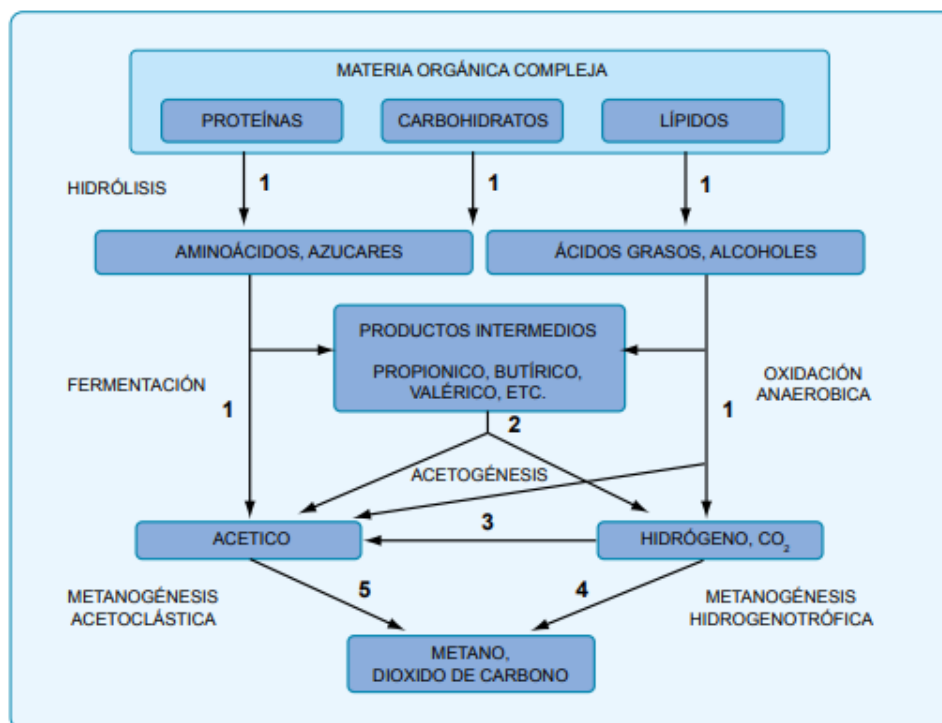


Figura 4.1: Esquema de las reacciones producidas en la digestión anaerobia. (8)

Los números del esquema indican la población bacteriana que interviene y es la responsable del proceso en cada etapa:

- 1- Bacterias fermentativas.
- 2- Bacterias acetogénicas.
- 3- Bacterias homoacetogénicas.
- 4- Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas.
- 5- Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

4.2 FACTORES DETERMINANTES EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Para que el proceso metanogénico se lleve a cabo en las mejores condiciones posibles, se deben de examinar la naturaleza y composición de la materia prima y definir los factores más importantes de los que depende dicho proceso. Por ello, se ha de tener un control continuo y exhaustivo de las condiciones ambientales en las que se desarrolla.

4.2.1 Aspectos claves de la materia prima

4.2.1.1 *Naturaleza y composición bioquímica*

Los tipos de biomasa adecuada para la producción de biogás son aquellos procedentes de la silvicultura, agricultura y ganadería, y de los residuos industriales y municipales. Se trata de residuos orgánicos que por lo general tienen un alto contenido en azúcar, almidón, proteínas, grasas, etc, y que tienen por tanto, facilidad de descomposición a través de la digestión anaerobia (6).

Dichos residuos se pueden agrupar en categorías de acuerdo a varios criterios, como puede ser de acuerdo con su rango taxonómico, es decir, de origen vegetal o animal, y de acuerdo a su sector de generación, sector agrícola, industrial o municipal **(3)**.

- Sector agrícola: estiércoles y fangos de animal, residuos y subproductos vegetales, cultivos de energía, etc.
- Sector industrial: subproductos y residuos de la agroindustria, industrias de alimentos, forraje y cervecería, aguas residuales y lodos procedentes de procesos industriales, subproductos orgánicos de la producción de biocarburantes y biorrefinerías, etc.
- Sector municipal: residuos domésticos, lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, etc.

Además de estos residuos, en los últimos tiempos también se ha ido introduciendo la biomasa acuática, convirtiéndose en un foco de investigación a desarrollar debido a su potencial para la producción de energía renovable y futura alternativa de cultivos energéticos.

4.2.1.1.1 *Materia prima de origen agrícola*

Los productos de origen agrícola representan la materia prima de mayor potencial de producción de biogás. Estas materias primas pueden ser de origen animal u origen vegetal.

- Origen animal

La cría de animales es una de las partes más importantes dentro del sector agrícola en la mayoría de los países representando el 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

Los estiércoles y fangos son excelentes sustratos para la digestión anaerobia, con una proporción de C/N (carbono-nitrógeno) de alrededor de 25:1 y ricos en diversos nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios **(9)**. Además, tienen una alta capacidad de estabilizar el proceso de digestión en el caso de una disminución significativa del pH y son muy accesibles y baratos.

Se caracterizan por tener diferentes contenidos en materia seca: estiércol (10-30% de materia seca) o suspensión líquida (10-15% de materia seca). Su composición varía según la especie origen y la calidad de la alimentación animal.

El estiércol sólido y las suspensiones líquidas tienen algunas limitaciones a la hora de producir biogás, debido a que las lamas animales tienen un bajo contenido de materia seca, que da un bajo rendimiento de metano por unidad de volumen de material de alimentación, rondando los 10-20 m³ de metano por metro cúbico de suspensión digerida. Además, ambos tipos contienen diversas cantidades de partículas de paja y fibras que son altas en lignocelulosas, fracciones que son recalcitrantes a la descomposición anaeróbica y que no se digieren fácilmente, por lo que no contribuyen a la producción de metano. A pesar de que los abonos tienen los potenciales más elevados como materia prima para el biogás, su producción relativamente baja de metano, no proporciona la sostenibilidad económica de la monodigestión de este material. Se necesita la co-digestión de co-sustratos con un alto rendimiento en metano.

- Origen vegetal

La categoría de los residuos vegetales incluye varios subproductos agrícolas vegetales y residuos de cosecha tales como plantas, cultivos estropeados, frutas y verduras, ensilaje de alimentación en mal estado, etc. Estos residuos son generalmente usados como co-sustratos con estiércoles animales y otros tipos de materias primas. La mayoría de ellos han de someterse a pretratamientos que van desde la simple reducción del tamaño de partícula a pretratamientos más complejos destinados a romper las moléculas ligno-celulosas para facilitar el acceso a los microorganismos anaeróbicos a estas estructuras. El tamaño de partícula más idóneo es de aproximadamente 1 cm, permitiendo el manejo adecuado y la mezcla con otros tipos de materia.

En la actualidad, se están desarrollando los llamados cultivos energéticos, variedades de cultivos como el maíz, cereales, remolacha, etc. Estos cultivos han demostrado que funcionan como excelente materia prima para la producción de energía pero sin embargo necesitan de investigación en la deslignificación, pretratamiento y tecnología antes de la digestión.

4.2.1.1.2 Materia prima de origen industrial

Las actividades industriales que procesan materias primas, producen diversos residuos con diferentes potenciales en la producción de metano, diferentes contenidos en materia seca, y, estructuras y composiciones de acuerdo con su origen. Su origen puede ser la industria de tratamiento de alimentos y bebidas, procesado de pescado, leche, almidón, productos bioquímicos y cosméticos, mataderos, etc. Todos ellos tienen en común que se trata de materia prima digerible y rica en lípidos, proteínas y azúcares.

Muchos de estos residuos son usados como refuerzos en la digestión de estiércol animal, con uso posterior como fertilizante. Su uso aumenta en gran medida la producción de metano debido a que el intervalo de producción es de unos 30-500 m³ de metano por metro cúbico de materia prima, además de proporcionar una mayor estabilidad del proceso debido a la menor sensibilidad a los inhibidores como el amoníaco y el sulfuro. Por todo ello, estos residuos tienen un efecto positivo en la sostenibilidad económica de una planta de biogás a través de los altos rendimientos de metano, la mejora de estabilidad del proceso y los ingresos adicionales llamados “tasas de salida” pagados por las industrias a las plantas de biogás por el tratamiento y gestión de sus residuos.

4.2.1.1.3 Materia prima de origen municipal.

Los residuos de origen municipal son aquellos generados por la sociedad en el desarrollo de la actividad humana diaria.

- *Fracciones orgánicas en los hogares.*

Dentro de esta categoría se engloba la fracción orgánica de los residuos generados en los hogares, como residuos alimenticios, de jardín y otros desechos orgánicos similares recogidos por separado.

Cada vez, son más las cantidades de residuos domésticos generados por la sociedad que, separados y gestionados de manera adecuada, pueden proporcionar un alto potencial en

la digestión anaeróbica y una reducción de materiales orgánicos destinados a vertederos e incineración, evitando así, impactos negativos de sostenibilidad.

Estos residuos pueden ser utilizados como co-sustratos para elevar el potencial a la digestión del estiércol animal. Su alta capacidad de biodegradabilidad, su alto rendimiento de metano y su contenido en nutrientes forman un buen equilibrio para su metabolización mediante microorganismos anaeróbicos. Para que mantengan estas propiedades se tiene la necesidad de que el reciclado sea adecuado y los desechos tengan una alta pureza, evitando la presencia de materiales extraños (inferior a un 0,1%), que produzcan un impacto negativo sobre el funcionamiento de la planta, la contaminación y la utilización del digestato como fertilizante. Se definen como materiales extraños el metal, vidrio, plástico, etc. Estos compuestos deberán eliminarse mediante pretratamientos.

- Lodos de depuradora

La digestión anaeróbica utilizada para tratar el lodo primario y secundario resultante del tratamiento de las aguas residuales municipales es una tecnología utilizada en todo el mundo para su valorización energética. El potencial en metano de este tipo de residuos es similar a los de origen animal. Es posible aumentar el rendimiento de metano mediante pretratamientos como por ejemplo la hidrólisis química, térmica, y enzimática, cuyo objetivo es la desintegración de la biomasa bacteriana y la liberación de sustancias orgánicas con el fin de dotar de mayor accesibilidad a la posterior degradación anaeróbica.

El factor limitante en el uso de los lodos de aguas residuales es su alto contenido de contaminantes y la presencia de estos en el digestato utilizado como fertilizante.

4.2.1.1.4 *Biomasa acuática*

En las últimas décadas, la investigación sobre este tipo de biomasa, se ha intensificado pasando de los modelos teóricos a proyectos de demostración con la ayuda de la industria energética interesada en la búsqueda de diferentes alternativas.

Dentro de este campo, se encuentran dos grupos de interés, las macroalgas y las microalgas. Las macroalgas, comúnmente conocidas como algas marinas, son ricas en azúcares naturales y otros hidratos de carbono con altos rendimientos en biomasa. Las microalgas son consideradas las más adecuadas para la producción de biocombustibles como el biodiesel y biogás. Estas microalgas tienen una alta eficiencia fotosintética y son muy ricas en lípidos. Una de sus limitaciones es su bajo contenido en materia seca. La eliminación de agua consume mucha energía, pero para la producción de biogás, un contenido de materia seca del 8% puede

ser suficiente. Hay resultados de investigación prometedores en el uso de este tipo de biomasa como materia prima, pero la búsqueda de solución de algunos problemas tecnológicos encontrados, hace que se encuentre en fase de investigación.

4.2.1.1.5 Co-digestión de residuos

La co-digestión consiste en el tratamiento anaerobio conjunto de residuos de diferente origen, complementándose los unos con los otros de forma que se consiga un equilibrio y se den las propiedades idóneas de digestión. Lo que se consigue por tanto es:

- Complementar las carencias de un tipo de sustrato con otros de distinta índole.
- Unificar las diferentes metodologías de digestión.
- Compartir instalaciones de tratamiento.
- Hacer frente a las variaciones de disponibilidad de cada residuo.
- Reducir costes de inversión y explotación.

Como se muestra en la siguiente figura (figura 4.2), hay residuos como los residuos ganaderos y lodos de depuración que tienen déficit en materia orgánica biodegradable y su relación carbono-nitrógeno no es la adecuada. Sin embargo, estos residuos son una buena base de co-digestión debido a su alto contenido en micro y macro nutrientes en agua y a su buena capacidad tampón (alcalinidad). Por otro lado, los residuos urbanos y de la industria alimentaria, no son ricos en micro y macro nutrientes pero complementan a los residuos mencionados anteriormente debido a su buena relación carbono-nitrógeno y a su elevada cantidad en materia orgánica biodegradable. Se deduce entonces, que la mezcla interesante se da con residuos de composiciones diferentes para complementarse entre sí, como puede ser la mezcla de residuos ganaderos con residuos de la industria alimentaria (10).

	Residuos ganaderos	Lodos depuración	Fracción orgánica residuos	Residuos industria alimentaria
Micro y macro nutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

Figura 4.2: Caracterización de la co-digestión de diferentes residuos orgánicos.

4.2.1.2 Sólidos totales (ST) o materia seca (MS)

La materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida denominada sólidos totales (ST) o materia seca (MS). El agua que contiene la mezcla es determinante a la hora de la producción de biogás al no contribuir a la producción de este, y por tanto, ocupar un volumen no aprovechado en el digestor. Por otra parte, resulta imprescindible para el proceso debido a que un alto contenido en sólidos limita la movilidad de las bacterias y por tanto su eficiencia y producción de biogás. Además, crea problemas de bombeo y agitación en la instalación. Debe alcanzarse un equilibrio entre la producción de biogás deseada y la humedad necesaria para la correcta digestión. El contenido de materia seca conviene que sea menor del 15 %. En la siguiente tabla se indican los contenidos de agua en algunos de los tipos de sustratos que podemos encontrar (3):

Tabla 4.1: Contenido en agua y sólidos totales de diferentes sustratos. (3)

	Contenido en agua (%)	ST (%)
Vinazas	90-94	6-10-15
Estiércol de cerdo	85-95	5-15
Gallinaza	65-85	15-35
Forraje de maíz	65-80	20-35
Estiércol de ganado	82-95	5-15
Frutas y verduras	82-95	5-18

4.2.1.3 Sólidos volátiles (SV), biodegradabilidad

Los sólidos volátiles son aquella materia orgánica que contiene la biomasa. Se determina mediante la incineración de la masa en un horno durante 6 horas a 550°C **(3)**. Estos sólidos tienen gran importancia debido a que este contenido es el que teóricamente será convertido a metano durante la digestión anaeróbica en el biodigestor. El porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales suele variar entre el 70-95%. Si los residuos contienen un porcentaje menor del 60% de sólidos volátiles no se suelen considerar buenos sustratos para la digestión anaerobia.

4.2.1.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno es un parámetro que indica el total de material oxidable en la muestra y, por tanto, el contenido de energía química máxima presente en ella. Se mide en miligramos por litro de suspensión (mg/L).

Este parámetro junto con el contenido en sólidos volátiles (SV) son las principales medidas de la materia orgánica en la digestión anaerobia.

En el proceso de digestión se dan numerosas transformaciones en las partículas del sustrato y los sólidos volátiles varían a lo largo del proceso. En cambio, con la demanda química de oxígeno esto no ocurre debido a que no se introduce oxígeno en el digestor y se mantiene en todo el proceso de la siguiente forma **(7)**:

$$DQO_{entra} = DQO_{digestato} + DQO_{gases} = DQO_{digestato} + DQO_{CH_4}$$

Sabiendo esta igualdad y que del CO₂ que sale del biogás la DQO es nula debido a que es una molécula oxidada, la DQO en el digerido se encontrará en su totalidad en el metano (CH₄).

Se sabe que en condiciones normales de presión y temperatura (presión de 1 atm y temperatura de 0°C), 0,35 m³ de metano necesitan 1 kg de oxígeno para oxidarlo, por lo que mediante dicha relación se puede predecir la cantidad de metano que producirá un determinado residuo.

4.2.2 Parámetros operacionales.

4.2.2.1 Temperatura del proceso.

La temperatura es uno de los principales parámetros de diseño del digestor debido a que afecta en la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados y es susceptible de alterar el proceso. A medida que la temperatura aumenta, el proceso biológico aumenta su velocidad y acelera el proceso de digestión.

Es por ello que en la digestión se necesita de un sistema adecuado de agitación y controlador de temperatura que asegure que no se produzcan variaciones de temperatura bruscas que interfieran de forma perjudicial en el proceso.

Existen tres rangos de temperatura en la digestión anaeróbica con diferentes propiedades particulares **(3)**:

- Rango psicrófilico: se alcanzan temperaturas por debajo de los 25°C siendo su rango óptimo entre 15 y 18°C. Es un régimen poco viable debido a que las velocidades de fermentación son lentas y se necesita un exceso de tamaño de reactor. Sin embargo, como ventaja, este rango es menos susceptible a un cambio de temperatura que dañe el proceso. El tiempo de fermentación ronda los 100 días.
- Rango mesófilico: abarca temperaturas de entre 25 y 45°C siendo su rango óptimo 25 - 35°C. Hasta hace un tiempo, ha sido el régimen más utilizado pero en la actualidad es sustituido o combinado con el régimen termófilico. El tiempo de fermentación es de entre 30 y 60 días.
- Rango termófilico: temperaturas entre 45 y 65°C y rango óptimo entre los 50 y 60°C. En la actualidad, se le da prioridad al rango termófilico debido a su mayor velocidad de fermentación y su eliminación de agentes patógenos al estar sometido a mayores temperaturas. Este rango tiene el inconveniente de que su estabilidad en la variación de temperatura es más susceptible que en temperaturas menores y además, presenta mayores problemas de inhibición del proceso por la presencia de amoníaco. Para un correcto funcionamiento del digestor no se deben exceder variaciones de temperatura del orden de 0,6 – 1,2°C/día.

En la solución de los inconvenientes planteados, una técnica a tener en cuenta, es la combinación de dos fases de digestión, una termofílica y otra mesofílica, de forma que se aprovechan las ventajas de velocidad del proceso termofílico y se reducen los problemas de inestabilidad mediante el proceso mesofílico.

La temperatura está interrelacionada con los tiempos de retención de la biomasa en el digestor.

4.2.2.2 Velocidad de carga volumétrica.

Termino que designa la cantidad de sustrato orgánico cargado diariamente en el digestor por unidad de volumen y tiempo, es decir, indica la cantidad de sólidos volátiles o de materia seca (medida en kg) que pueden introducirse en el digestor por m³ de volumen de trabajo y por unidad de tiempo. Este valor, tiene una relación inversa con el tiempo de retención, a medida que se aumenta la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención (TRH). Ambos parámetros son los principales a la hora de definir el volumen de digestor. Un factor a tener en cuenta es la dilución de la mezcla en agua ya que un mismo material de digestión podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua.

Se debe encontrar el punto óptimo de carga y estos valores no suelen ser superiores a 3,5-4 kg de sólidos volátiles por metro cubico y día **(3)**.

Este valor se calcula como el cociente entre el caudal de sólidos volatiles que entran al digestor y el volumen útil de digestión:

$$VCO = \frac{V \cdot [SV]_o}{V_R} ; \left[\frac{kg SV}{m^3 \cdot d} \right]$$

Donde:

V_R = volumen del reactor (m³)

V = Caudal de tratamiento (m³/d)

$[SV]_o$ = Concentración de materia orgánica (kg SV/m³)

4.2.2.3 Tiempo de retención hidráulica (TRH).

El tiempo de retención es el tiempo promedio que pasa el material de digestión en el digestor desde su carga hasta su descarga. Se trata de un parámetro variable según el régimen de digestión del digestor (ver capítulo 4.4), en el que se lleva a cabo el proceso, estando ligado íntimamente a dos factores, el tipo de sustrato y la temperatura del mismo.

En los digestores discontinuos o batch, el parámetro está claramente definido debido a que el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. El tiempo de retención es por tanto el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga.

En los digestores de régimen continuo y semicontinuo, el tiempo de retención se define como el cociente entre el volumen de digestor y el volumen de carga diaria, por lo que conociendo este parámetro se puede determinar la carga diaria como:

$$TRH = \frac{V_D}{V} ; [d]$$

Donde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico

V_D = Volumen del digestor (m^3)

V = Caudal de tratamiento (m^3/d)

De dicha carga diaria, dependerá la cantidad de biogás producido. En general, se trabaja con tiempos de retención de entre 20 y 55 días y cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cubico de digestor **(3)**.

El límite del tiempo de retención mínimo, vendrá determinado por la tasa de reproducción de las bacterias, que se pierden en la salida del biodigestor y han de ser compensadas por la multiplicación de bacterias en el interior del digestor.

La optimización del TRH y la temperatura dará la relación costo beneficio ya que según ello variaran los volúmenes, sistemas de control, calefacción, eficiencia y producción de biogás.

Algunos TRH según el tipo de materia prima pueden ser:

Tabla 4.2: Tiempo de retención hidráulica para algunas materias primas (8).

Materia prima	TRH
Estiércol vacuno líquido	20-35 días
Estiércol porcino líquido	15-25 días
Estiércol aviar líquido	20-40 días

4.2.2.4 Agitación.

La agitación del material de digestión es importante de cara a la distribución de los sustratos, los microorganismos y la temperatura. Además de esto, también ayuda a expulsar las burbujas de gas y evitar la formación de capas flotantes o sedimentación.

Debe realizarse a intervalos, durante un tiempo y frecuencia dependiente del tipo de planta. En un principio, la agitación debe realizarse en intervalos largos y frecuentes y con el

tiempo se puede reducir mientras se observa el rendimiento y la formación de la capa eventual. Se pueden usar modelos para simular el comportamiento del flujo en el interior del digestor y predecir el movimiento de partículas mediante la agitación.

Hay tres métodos principales de agitación **(6)**:

- Agitación mecánica: se trata de hélices o palas que por rotación producen la mezcla. Se distinguen por su forma, velocidad de rotación y diámetro. Las hélices pequeñas y rápidas funcionan para sustratos líquidos y las paletas más grandes y lentas, para sustratos con mayor contenido en materia seca. La desventaja de los agitadores mecánicos es su sensibilidad a la abrasión.
- Agitación hidráulica: funciona creando una fuerte corriente hidráulica que mezcla el material. El sustrato se retira del digestor y vuelve con presión a través de una boquilla. Se necesita una bomba de gran alcance, pero esa misma bomba puede ser utilizada para la alimentación del tanque de retención. La ventaja de este sistema es que las piezas de desgaste están fuera del digestor, siendo así, más accesibles. Esta agitación es una solución eficaz pero tiene el riesgo de que se produzca la obstrucción si se trata de sustratos demasiado densos o fibrosos.
- Agitación neumática: se basa en la inyección de biogás a presión en la parte inferior del digestor. Las burbujas de gas inducen el movimiento vertical en el tanque, lo que causa la mezcla del sustrato. Las boquillas de inyección de gas deben estar distribuidas de manera uniforme para evitar zonas estáticas en el reactor.

4.2.3 Parámetros ambientales

4.2.3.1 Valor de acidez, pH.

El proceso anaeróbico es muy sensible a los cambios en los niveles de pH, en especial, en la actuación de los microorganismos metanogénicos. En general, los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso requieren de unos niveles de actividad óptimos, en torno a la neutralidad. Para las bacterias hidrolíticas su óptimo oscila entre 7,2 y 7,5, para las acetogénicas entre 7,0 y 7,2 y para las metanogénicas entre 6,5 y 8, siendo el ideal para la mezcla de todas un pH neutro, entre 6,8 y 8 **(9)**.

Tabla 4.3: Rango de pH idóneo para cada grupo de bacterias. (9)

Grupo de bacterias	Rango de pH
Hidrolíticas	7,2-7,5
Acetogénicas	7,0-7,2
Metanogénicas	6,5-8

El valor de pH determina la producción de biogás y la composición final de este, por lo que ha de estar controlado en todo momento. No deberá disminuir de un valor de 6.0 ni exceder de 8.0. Si el valor de pH es inferior a 6.0 la producción de biogás es tan pobre que se pierden cualidades energéticas. Por ello, hay que tener especial vigilancia en el proceso metanogénico y que todos los controles sean adecuados y rigurosos. La pérdida de cualidades energéticas se debe a que los valores bajos en pH reducen la actividad metanogénica produciendo la acumulación de ácido acético y H_2 . Con el aumento del H_2 , se produce una acumulación de ácidos grasos volátiles (ácidos propiónicos y butíricos), que dañan las bacterias encargadas de la degradación.

4.2.3.2 Relación carbono/nitrógeno de la materia prima.

El carbono y el nitrógeno son elementos indispensables en la actividad microbiológica debido a que son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. Las bacterias utilizan el carbono como aportador de energía y el nitrógeno para la formación de nuevas células. En el proceso consumen 30 veces más carbono que nitrógeno por lo que la relación óptima carbono/nitrógeno que debe de tener el material para la digestión se considera que debe de rondar entre un 30:1 y un 20:1 **(3)**. Un exceso en carbono hace que la descomposición sea más lenta debido a que la falta de nitrógeno hace que la multiplicación y el desarrollo de las bacterias sea bajo. Por el contrario, una disminución de carbono puede desencadenar la inhibición del proceso debido a un exceso de contenido en amonio. Cuando se tiene material que no cumple con el porcentaje adecuado, este ha de mezclarse con diferentes residuos de forma que se equilibre esta relación.

La relación C/N para algunos subproductos y el rango de concentración en nutrientes para el correcto crecimiento bacteriano es el siguiente:

Tabla 4.4: Relación C/N para algunos sustratos. (9)

Sustrato	Relación C/N
Purines de cerdo	18-20
Purines de vaca	10-24
Gallinazas	15
Residuos de cocina	25
Residuos de fruta	35
Fangos de depuración	16
Piel de patatas	25

El contenido en carbono/nitrógeno de la mezcla de materia prima a digerir puede calcularse a partir del contenido de cada una de las materias primas utilizadas en ella mediante la siguiente fórmula (9):

$$K = \frac{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2 + \dots N_n \cdot Q_n}{N_1 \cdot Q_1 + N_2 \cdot Q_2 + \dots N_n \cdot Q_n}$$

Donde:

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en la materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en la materia prima.

Q = Peso fresco de la materia (kg o toneladas)

En la práctica, se aconseja que los valores estén dados en medidas volumétricas para determinar los parámetros densidad, masa y volumen a partir de:

$$d = \frac{m}{v}$$

Donde:

d= densidad (kg/m³)

m= masa (kg)

v= volumen (m³)

4.2.3.3 Inhibidores del proceso.

Algunas sustancias actúan como inhibidoras del proceso anaeróbico. Estas sustancias pueden estar contenidas en el propio material de descomposición o generarse durante el proceso anaerobio, disminuyendo el rendimiento o interrumpiendo e inestabilizando el crecimiento de los microorganismos del proceso fermentativo.

Las sustancias inhibidoras de mayor importancia son el amoníaco, presente en sustratos ricos en nitrógeno, componentes del azufre como formación de sulfuros, iones de metales ligeros y pesados, ácidos grasos, antibióticos y desinfectantes. Todos estos compuestos inhibidores deben de ser altamente controlados y mantenerse dentro de los rangos admisibles como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 4.5: Compuestos inhibidores en el proceso. (10)

Inhibidor	Concentración inhibitoria	Comentarios
Oxígeno	>0,1 mg/L	Inhibición de los microorganismos anaeróbicos
Amoníaco libre	>200 mg NH ₃ /L >1100 mg NH ₃ /L en sistemas más aclimatados	A mayor pH y temperatura se eleva su efecto inhibitorio. Gran adaptabilidad de las bacterias.
Ácidos grasos volátiles	>2000 mg HAc/L	Mayor efecto inhibitorio a menor valor del pH.
Sulfuro de hidrógeno	>50 mg H ₂ S/L	Mayor efecto inhibitorio a menor valor del pH.
Metales pesados	Cu>50 mg/L Zn>150 mg/L Cr> 100 mg/L	Sólo los metales disueltos tienen un efecto inhibitorio.

4.3 ACONDICIONAMIENTO DEL MATERIAL DE DIGESTIÓN

Previamente a la introducción del sustrato en el digestor existen una serie de pretratamientos que favorecen el rendimiento de la digestión anaerobia. Estos pretratamientos hacen que se produzca un aumento de producción y calidad del biogás facilitando la liberación

del carbono de la materia orgánica al aumentar la superficie específica de la materia y su solubilidad y degradación.

Los tipos de pretratamientos son los siguientes:

- Pretratamiento térmico: el pretratamiento térmico tiene dos funciones, facilitar la degradación de algunas macromoléculas y solubilizar la materia orgánica e higienizar la materia para reducir microorganismos indeseables. La aplicación de calor se puede realizar con diferentes tipos de tecnologías como pasteurizadores o corrientes de vapor y altas presiones.
- Pretratamiento mecánico: el objetivo principal es reducir el tamaño de partícula, de forma que aumente la superficie específica del material y rompa las paredes celulares facilitando el ataque de los microorganismos encargados de la degradación por etapas de los compuestos, y facilitando el paso de enlaces complejos a otros más simples.
- Pretratamiento químico: el tratamiento químico se lleva a cabo mediante la adición de sustancias ácido o base, dependiendo del pH de la materia a digerir.
- Pretratamiento biológico: se trata de tratamientos enzimáticos que aprovechan la actividad metabólica de algunas enzimas hidrolíticas para degradar parcialmente los sustratos. Uno de los tratamientos enzimáticos más usados es el ensilado que permite la conservación de sustratos vegetales a lo largo del año.
- Pretratamiento termoquímico: regula el pH y la temperatura deseada de la mezcla.
- Pretratamiento de ultrasonidos: la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en medios líquidos provocan reacciones físico-químicas capaces de modificar la estructura de los materiales de digestión y de favorecer así, el proceso de digestión.

4.4 TIPOS DE DIGESTORES ANAEROBIOS.

Hay una gran variedad de tipos de reactores diferentes, por lo que la clasificación puede hacerse de diferentes formas. Un análisis generalizado clasificándolos de acuerdo a diferentes criterios puede ser **(8) (9) (7)**:

- Según régimen de alimentación
- Según intensidad de la mezcla
- Según manejo del sustrato

-
- Según manejo bioquímico

4.4.1 Régimen de alimentación

Dentro del criterio del régimen de alimentación se encuentra el sistema discontinuo (batch) y el sistema semicontinuo o continuo.

4.4.1.1 Sistema batch o discontinuo

El sistema batch se caracteriza por una sola carga total del digestor que se mantiene hasta que el proceso de fermentación concluye y con ello, la producción de biogás. Es entonces, cuando se procede a su descarga. En este transcurso, la materia orgánica es la misma y no se renueva. Su estructura consiste en un tanque hermético con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante en el que se almacena el biogás.

Para acelerar su arranque requieren sobre un 20% de inóculo. Es usual usar una batería de digestores iniciados en tiempos distintos para que la producción de biogás en un cómputo total sea constante. Este sistema es muy usado en laboratorios para pruebas de comportamiento del material de alimentación y además, tiene interés en materiales con abundante lignocelulosa, que en sistemas continuos puede producir taponamiento en los conductos de alimentación y salida, pero la eficiencia del proceso es escasa debido a los tiempos muertos entre cargas y a la ausencia de sistemas de agitación.

La producción de biogás en este tipo de digestor puede rondar entre los 0,5 – 1 m³ de biogás/m³ de digestor.

4.4.1.2 Sistema semi-continuo o continuo.

Los digestores de tipo semi-discontinuo o continuo son cargados periódicamente y cuentan con un volumen de mezcla constante, es decir, la cantidad de materia introducida es equivalente a la de salida del efluente. Generalmente, manteniendo las condiciones de operación y gracias a la adición de nuevo material nutriente producen una cantidad diaria de biogás más o menos constante y permanente. El tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor viene dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de carga diaria. Es un tipo de digestor muy común y se adaptan muy bien para materiales blandos como puede ser el estiércol. Los modelos más conocidos son el tipo chino y el tipo hindú pero es el chino el más usado por su durabilidad, funcionalidad y seguridad.

4.4.2 Intensidad de la mezcla

Según la intensidad de la mezcla, los digestores pueden agruparse en digestor de mezcla completa y de mezcla parcial.

4.4.2.1 Mezcla completa

Los digestores de mezcla completa son los más comunes. Estos consisten en un sistema de agitación suave por medio mecánico o neumático que hacen que la mezcla sea homogénea evitando que los sólidos sedimenten y se depositen en el fondo del reactor y haciendo posible que el reactor se mantenga a la temperatura óptima uniformemente para la reproducción idónea de las bacterias. Se ha de tener especial cuidado en dicha agitación para no desequilibrar la acción bacteriana.

Dentro de este tipo de digestores los podemos encontrar con o sin recirculación. Los carentes de recirculación se componen únicamente del digestor, con su correspondiente sistema de agitación y los sistemas de extracción de biogás y efluentes. En la versión con recirculación, también denominado “Reactor de contacto anaerobio” que veremos más adelante, también interviene y se añade un desgasificador y un decantador en el efluente del digestor, con recirculación de las partículas decantadas de nuevo a la carga del digestor.

4.4.2.2 Mezcla parcial

Los digestores de mezcla parcial no son tan abundantes. Suelen ser pequeños digestores rurales en los que la agitación se realiza de forma periódica y con el fin de evitar la costra superficial que perjudica la acción bacteriana. En algunos casos esta agitación consiste en la circulación del sustrato dentro de una cámara provista de tabiques que hace que no se forme dicha costra.

4.4.3 Manejo del sustrato

El sustrato puede ser movilizado y entrar y salir del digestor, inmovilizado y mantenerlo dentro de este, o recircularlo con el fin de aumentar la estabilidad de los microorganismos y optimizar la actividad bacteriana.

En el grupo de los reactores con retención de biomasa se pueden distinguir los reactores con inmovilización de la biomasa sobre un soporte, como los de filtros anaerobios y

lechos fluidificados, y los reactores con retención mediante gravedad, como los de lecho de lodos.

4.4.3.1 *Reactor de filtros anaerobios*

Este tipo de reactores poseen en su interior un medio y soporte fijo, bien cerámico o plástico al que se adhieren las bacterias. Hay dos tipos de filtros, el llamado de lecho fijo, que se dispone de manera regular y orientado verticalmente con dirección de flujo descendente, y el filtro anaerobio propiamente dicho, que se dispone de forma irregular, con flujo ascendente y las bacterias quedan atrapadas en los intersticios de este.

4.4.3.2 *Reactor de lecho fluidificado*

Este sistema consta de unas partículas de material inerte que se encuentran en suspensión en el fluido y a las cuales se adhieren las bacterias. Cuando el fluido sale por el efluente, las partículas y las bacterias también lo hacen pero se recuperan y se vuelven a introducir en la cámara de digestión mediante un mecanismo de filtrado y recirculación.

4.4.3.3 *Reactor de lecho de lodos*

Los reactores de lecho de lodos se basan en la formación de granos de origen microbiológico en los cuales los organismos capaces de anclarse y unirse a ellos, sobreviven y proliferan. A estos granos se les denomina gránulo o flóculo y debido a su gran tamaño (de 0,5 a 2 mm de diámetro) resisten al lavado del sistema, permitiendo cargas hidráulicas elevadas. La granulación depende del crecimiento bacteriano, por lo que mejorándose esta condición, se optimizará el crecimiento considerablemente. Dentro de este tipo de reactores, los más usados actualmente son los tipo U.A.S.B. y los tipo E.G.S.B. (10).

- *Reactores tipo U.A.S.B.*

Las siglas U.A.S.B significan Upflow Anaerobic Sludge Blanket (manta de lodos anaerobios de flujo ascendente). En este tipo de reactores, la retención de fango activo, ya sea de forma granular o floculenta, hace posible el buen tratamiento incluso a altas tasas de cargas orgánicas. La turbulencia natural causada por el caudal del influente y la producción de biogás provoca el buen contacto entre el agua residual y fango biológico, pudiéndose aplicar mayores cargas orgánicas que en los procesos aerobios. Además, se requiere menor volumen de reacción y espacio y se produce gran cantidad de biogás y energía.

El funcionamiento se basa en un sistema trifásico de alta carga que opera como un sistema de crecimiento en suspensión que consiste en una columna abierta, a través de la cual

el líquido residual pasa a una baja velocidad ascensional. Este líquido residual forma junto a los gránulos o partículas, el manto de fangos, siendo ambos, parte fundamental del proceso. Los gases producidos, provocan la recirculación interna que ayuda en la formación y mantenimiento de las partículas biológicas, sobre las cuales algunas partículas de gas se adhieren. Mediante un separador gas-sólido-líquido en la parte superior del reactor, se separa la parte gaseosa del efluente líquido. Este efluente líquido, a su vez contiene sólidos residuales en suspensión, que se separan mediante un sedimentador y se reconducen a la superficie del manto de lodos a través de un sistema de deflectores.

Al igual que en otros tipos de tratamiento, en los UASB también son necesarias unas etapas previas de adecuación del afluente antes de ingresarlo al reactor, consiguiendo gracias a estas, convertir el 70-95% de la materia orgánica en biogás valorizable.

- *Reactores tipo E.G.S.B.*

Las siglas E.G.S.B significan Expanded Granular Sludge Bed Digestion (lecho de lodos granulares expandidos). Son una versión de reactores más evolucionada a los UASB, en los que al funcionamiento de estos se le suma la recuperación del efluente. Este efluente se vuelve a recircular optimizando así la producción de biogás. Además, el diseño más alargado y tubular de los reactores permite una mayor velocidad de flujo del afluente aumentando parcialmente el tamaño del lecho granular y optimizando el contacto entre los gránulos y el sustrato. Son adecuados para el tratamiento de aguas residuales de baja carga orgánica o residuos con partículas en suspensión cuya decantación no sería recomendable en el tanque de proceso.

4.4.4 Manejo bioquímico

El manejo bioquímico y biológico se puede realizar en una o dos etapas.

4.4.4.1 Una etapa

En esta categoría se engloban todos los digestores vistos anteriormente debido a que todas las etapas de digestión anaeróbica se realizan en una única cámara y todas las bacterias se someten a las mismas condiciones de desarrollo.

4.4.4.2 Dos etapas

Los reactores de dos etapas hasta el momento no han sobrepasado la etapa experimental pero tratan de dividir el proceso en dos cámaras de digestión, de forma que en la primera etapa se desarrolle la fase acidogénica y en la segunda la fase acética y metanogénica optimizando las condiciones de desarrollo de cada tipo de bacterias en cada etapa.

4.5 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los principales productos resultantes de la digestión anaerobia son el biogás, y un subproducto semi-líquido generado en el proceso de fermentación llamado digestato.

4.5.1 Biogás

El biogás es una mezcla de gases producidos a partir de la descomposición de la biomasa, mediante un proceso metabólico llevado a cabo por una gran cantidad de bacterias en ausencia de oxígeno.

La biomasa es el término general utilizado para describir toda la materia producida biológicamente y que por tanto, incluye todos los tipos de materiales y sustancias derivadas de organismos vivos.

Este gas puede ser clasificado de dos formas distintas, según la procedencia de las instalaciones generación-captación o según el tipo de sustrato orgánico del que proceda.

- Procedencia de la instalación generación-captación:
 - Biogás de vertedero: se considera el biogás producido en los vertederos de los residuos sólidos urbanos (RSU).
 - Biogás de depuradoras: aquel producido en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR).
 - Biogás de digestores: producido en instalaciones cuyo objetivo es la degradación del sustrato mediante la digestión anaerobia.
- Tipo de sustrato orgánico:
 - Procedente de la fracción sólida de los residuos sólidos urbanos (FORSU).
 - Procedente de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas mediante la digestión anaerobia de los fangos.

- Procedente de residuos agrícolas, ganaderos o de la industria (agroindustrial).

4.5.1.1 Composición y características.

- Composición del biogás

El biogás se compone fundamentalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), mezclado en menor proporción con otros compuestos.

Tabla 4.6: Porcentajes de composición del biogás. (11)

COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS	PORCENTAJE (%)
Metano CH_4	50 – 75
Dióxido de carbono CO_2	25 – 45
Nitrógeno N_2	1 – 5
Vapor de agua H_2O	1 – 2
Hidrógeno H_2	0 – 3
Oxígeno O_2	0.1 – 1
Sulfuro de hidrógeno H_2S	0.1 - 0.5
Monóxido de carbono CO	0 - 0.3

▪ Metano

El metano es un gas incoloro e inodoro. Se trata de un producto final de la putrefacción de organismos vivos como animales y plantas, es decir, de la descomposición de moléculas más complejas. Su densidad en estado líquido es menor que la del agua. Es prácticamente insoluble en este, pero soluble en líquidos orgánicos como la gasolina, éteres, etc. En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso debido a que su temperatura de ebullición es de -161.5°C . La reacción de combustión del metano es muy exotérmica liberando gran cantidad de energía en forma de calor que le confiere al biogás excelentes aplicaciones en la obtención de energía. Algunas propiedades generales del metano son:

Tabla 4.7: Propiedades del metano. (12)

Fórmula química	CH₄
Masa molecular	16.04 g/mol
Límite de explosión	5 – 15 % volumen de metano en el aire
Temperatura de ignición	595°C
Presión crítica	45.99 atm
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad normal	0.7175 kg/m ³
Olor	Inodoro

**condiciones normales 0°C y 1 atm*

▪ *Dióxido de carbono*

El dióxido de carbono es un gas incoloro, denso y, al contrario que el metano, poco reactivo. Es el segundo elemento más abundante del biogás. En condiciones normales de presión y temperatura se encuentra en estado gaseoso con una temperatura de ebullición de -57°C.

▪ *Otros compuestos*

En menor proporción el biogás contiene otros compuestos como nitrógeno (N₂), vapor de agua (H₂O vapor), hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y monóxido de carbono (CO).

- *Características del biogás*

. El porcentaje en metano y la relación metano/dióxido de carbono son los factores más importantes en la producción del biogás. Estos definirán la calidad de este. El metano tiene una elevada capacidad calorífica (5.750 kcal/m³), siendo precisamente el porcentaje de este el que posibilita que el biogás sea un hidrocarburo susceptible de aprovechamiento energético para diferentes destinos.

Esta composición dependerá del tipo de sustrato, el tiempo de reacción, los pretratamientos que se puedan realizar y los postratamientos de purificación del biogás como veremos más adelante.

Tabla 4.8: Características generales del biogás. (6)

Contenido energético	6 – 6.5 kwh·m ³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Poder calorífico	5000 – 6000 kcal/m ³
Temperatura de ignición	650 – 750 °C (con metano 50-75%)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido (si no está desulfurado)
Masa molar	16.043 kg/kmol

4.5.1.2 Uso energético del biogás

Existen varios usos y sistemas de aprovechamiento del biogás. (13)

- Sistemas de producción de calor por combustión directa.
 - Calderas.
- Sistemas de generación de energía térmica y eléctrica.
 - Motores de cogeneración/trigeneración.
 - Motores de combustión Turbinas.
- Uso directo previa depuración.
 - Producción de H₂/metanol.
 - Combustible de vehículos.
 - Inyección en red de gas natural.

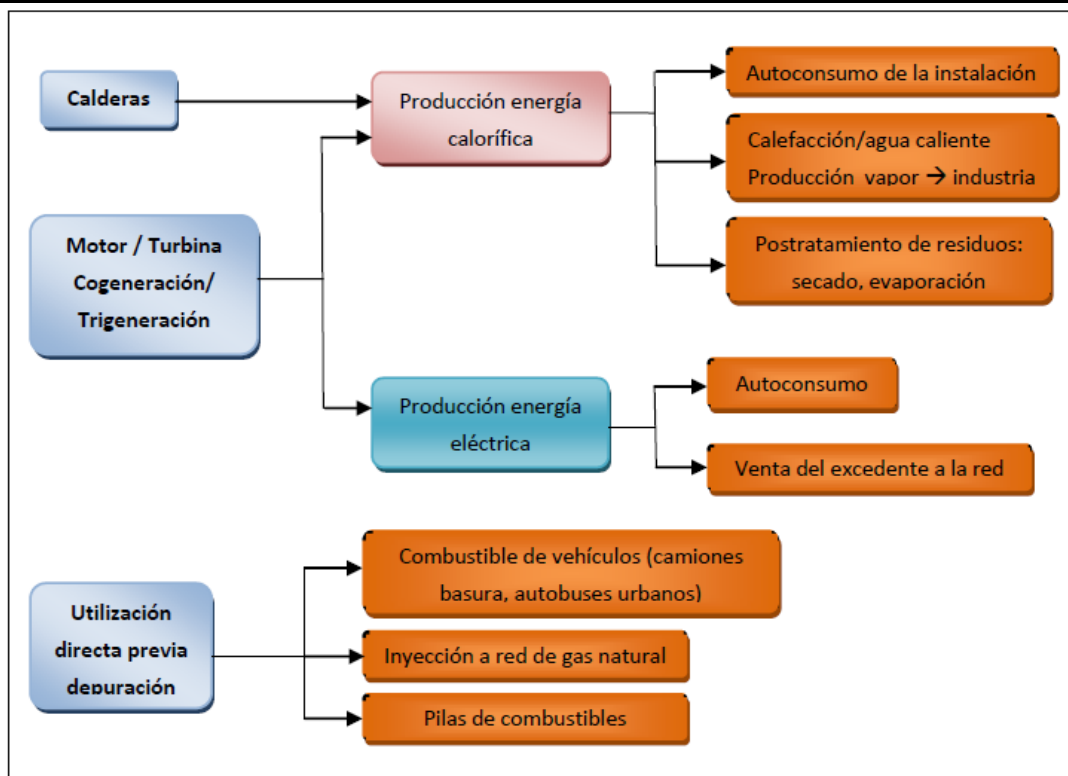


Figura 4.3: Aprovechamiento energético del biogás.

4.5.1.2.1 Acondicionamiento del biogás

Según la aplicación que se le vaya a dar al biogás, este ha de pasar por etapas de acondicionamiento que le proporcionen las características óptimas para su aprovechamiento. Para ello se deben depurar las impurezas contenidas en él, que dependerán del tipo de sustrato digerido. Estas impurezas suelen ser las siguientes:

Tabla 4.9: Sustancias contaminantes en el biogás y sus efectos. (10)

Impureza	Efecto
H ₂ S	- Corrosión - Toxicidad - Formación de ácido sulfúrico
Agua	- Formación de condensados - Formación de soluciones ácidas
CO ₂	- Reducción de poder calorífico
Partículas	- Decantación, obturación
NH ₃	- Formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión

- Sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno se forma durante la digestión, durante la reducción de compuestos que contienen azufre, como sulfatos, aminoácidos y péptidos. La presencia de este componente en el biogás puede conducir a la corrosión debido a la formación de ácido sulfúrico en combinación con agua. Además, la combustión del biogás da lugar a emisiones de ácido sulfúrico, lo cual es importante tener en cuenta debido a que es altamente tóxico y puede causar graves riesgos de salud. Las tecnologías utilizadas para la eliminación de este elemento se puede dividir en métodos biológicos, físicos o químicos.

- Aqua

El vapor de agua puede condensar junto al H_2S formando H_2SO_4 . Si esto ocurre, se produce desgaste y daños por corrosión en los equipos. Por ello, se debe eliminar el H_2O previamente al agua. El agua puede ser eliminado por cambios de parámetros que afectan a la solubilidad de este en el gas, como la presión y temperatura. Las tecnologías de eliminación pueden ser secado por condensación, por adsorción y por absorción.

- Dióxido de carbono

La eliminación del dióxido de carbono se lleva a cabo cuando su uso tiene algún fin concreto que requiere de una mayor calidad del gas. Al eliminar este elemento se produce un aumento del poder calorífico alcanzando índices de Wobbe adecuados para dicho uso. Usos que requieren de la eliminación de este compuesto pueden ser la transformación del biogás en biometano, inyección del biogás en la red de gas natural, producción de hidrogeno, etc.

Las tecnologías empleadas para la limpieza de este componente se explicarán con mayor detenimiento en el capítulo de enriquecimiento de biogás.

- Otros compuestos

Existen también, otros compuestos como los siloxanos, oxígeno, nitrógeno y compuestos orgánicos halogenados que aparecen dependiendo de la composición del sustrato tratado y en ocasiones han de ser eliminados. Se requiere su eliminación si las concentraciones son significativas debido a que interfieren en la vida útil y mantenimiento de los equipos.

4.5.2 Digestato

En la digestión anaerobia, una vez que se ha aprovechado la energía, sacando la mayor cantidad de biogás posible, obtenemos un material que todavía contiene todos los nutrientes del material digerido. Este material es denominado digestato y puede ser utilizado como fertilizante de alta calidad debido a su alto contenido en nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y otros materiales micronutrientes que ayudan en el crecimiento de las plantas. Además de esto, los compuestos de carbono estables que no han sido degradados sirven como formación de humus y ayudan en la estructura del suelo, incrementando su fertilidad, actividad microbiana, aireación, etc.

4.5.2.1 Usos del residuo biofermentado (digestato).

El digestato puede ser utilizado bien como acondicionador o como biofertilizante (15).

- Acondicionador

El uso como acondicionador tiene como objetivo la renovación y restitución del suelo mediante la materia orgánica que queda en el digestato y que es capaz de crear un humus estable aumentando la fertilidad, actividad microbiana, aireación, erosión y permeabilidad del suelo.

- Biofertilizante

Su uso como fertilizante se debe al alto contenido en nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y otros micronutrientes que ayudan en el crecimiento de las plantas.

El contenido de nutrientes en el digestato varía mucho dependiendo del tipo de sustrato que se digiera. Este biofertilizante puede ser de dos formas, forma líquida y forma sólida.

4.5.2.2 Tratamiento del digestato

- Separación

El objetivo de la separación es separar la fase sólida de la fase líquida del digestato.

La fracción sólida está formada por un contenido de materia seca de entre el 20 y el 40%. Esta fracción es más rentable en términos de transportabilidad y está indicada como buen fertilizante fosforado.

En cuanto a la fracción líquida, esta está compuesta por un contenido de materia seca de entre 1 y 8% por lo que posee una gran fluidez entorpeciendo su transportabilidad. Esta

fracción es un fertilizante nitrogenado de acción rápida por lo que es más usado para la aplicación directa en plantas.

- Secado

El secado se lleva a cabo para la evaporación del agua y así producir el digestato seco. El aire caliente que procede de la generación de biogás se conduce a través de o sobre el digestato y este produce su secado. Mediante el tiempo de secado y la temperatura del aire se controla el contenido deseado de materia seca, que puede superar en algunos casos el 90% de contenido en materia seca. En ocasiones, en el transporte del digestato seco, es conveniente compactarlo para evitar emisiones de polvo y reducir los costos de transporte.

- Peletización

La peletización se basa en la formación de pellets del digestato seco para mejorar su densidad, manipulación y apariencia. Una vez que se ha conseguido mediante el secado, un porcentaje de materia seca de entre 85 y 90% se hace pasar el digestato por moldes aplicando alta presión. La alta presión, crea temperaturas elevadas de forma que el pellet de digestato se derrite exteriormente y crea una película y brillo vítreo.

Además de las opciones como acondicionador o biofertilizante, también hay ciertos procesos como el ultrafiltrado que permiten el aprovechamiento de la solución acuosa como solución nutriente en el proceso de digestión, volviéndose a introducir en el digestor.

El agua resultante en estos procesos y depurada y libre de agentes contaminantes puede reutilizarse como agua en el proceso de la planta o simplemente desecharse.

4.6 BIOMETANO

El biometano, es un gas renovable combustible con una elevada concentración en metano que se obtiene a partir del enriquecimiento del biogás, del gas de síntesis producido durante la gasificación de la biomasa o mediante el proceso de Power-to-Gas, a través de la reacción del hidrógeno y CO_2 . El biogás tiene un porcentaje en metano por debajo del 70%, lo que se consigue con el enriquecimiento (upgrading) de este gas, es la eliminación del CO_2 para aumentar el porcentaje en metano y dotarlo de unas características similares al gas natural.

Tabla 4.10: Comparativa entre la composición del biogás y del biometano. (15)

Biogás DA		Biogás refinado (Biometano)	
CH ₄ (%)	40-70	CH ₄ (%)	95-99
CO ₂ (%)	30-60	CO ₂ (%)	1-5

4.6.1 Proceso de obtención

Una vez que el biogás obtenido en la digestión anaerobia ha pasado la etapa de limpieza en la que se eliminan algunas impurezas como el agua, el H₂S, amonio, oxígeno, nitrógeno, siloxanos y algunas partículas sólidas, se procede al enriquecimiento de dicho gas. En la siguiente figura, se esquematiza el proceso y se muestran las tecnologías más empleadas de enriquecimiento.

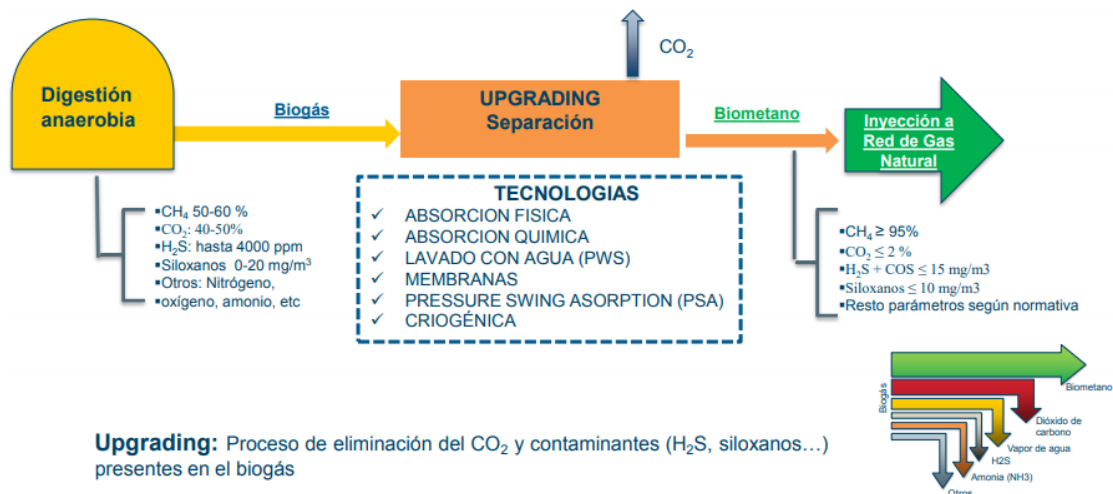


Figura 4.4: Proceso y tecnologías de enriquecimiento del biogás. (15)

4.6.1.1.1 Tecnologías de enriquecimiento de biogás.

Las técnicas más extendidas son las siguientes (13):

- Absorción química (aminas, sales alcalinas)
- PSA (Pressure Swing Adsorption)
- Separación criogénica
- Separación con membranas
- PWS (Pressurized Water Scrubbing)

4.6.1.1.2 Absorción química.

Se basa en la capacidad de absorción de algunos compuestos químicos. Estos compuestos como pueden ser aminas o soluciones acuosas de sales alcalinas, absorben el CO_2 , H_2S y los compuestos orgánicos volátiles presentes en el gas. El gas pasa por un depurador compuesto de aminas que se encarga de absorber las impurezas a eliminar. Posteriormente se procede al secado, donde el metano pasa a estar a -37°C y se le elimina el agua contenido. Por otro lado la amina libera el CO_2 tras consumir calor y esta se enfría para repetir el proceso.

La absorción química presenta una gran eficiencia en el porcentaje de metano conseguido y escasas pérdidas de metano en el off-gas. Tiene bajo consumo eléctrico pero alto consumo térmico y el problema es la no eliminación del O_2 .

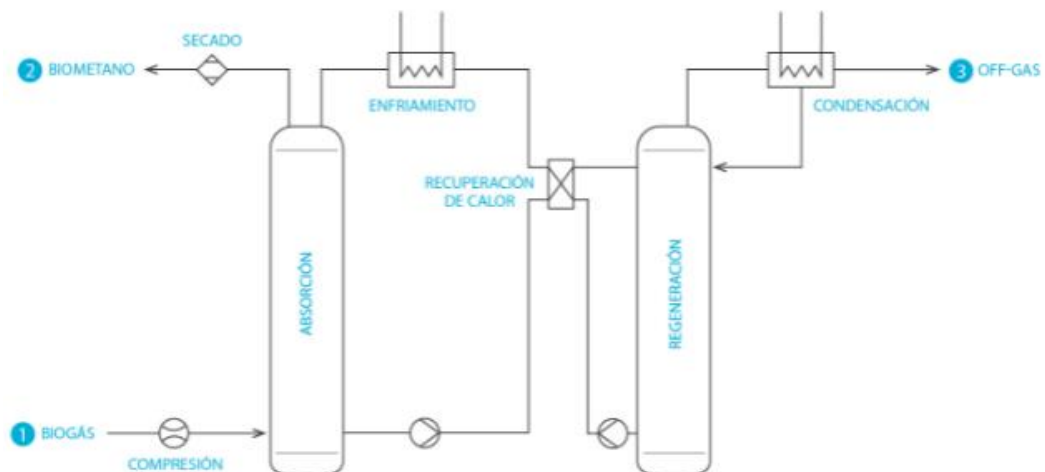


Figura 4.5: Esquema de proceso de absorción química. (14)

4.6.1.1.3 PSA (Pressure Swing Adsorption)

Mediante este sistema, el CO_2 , O_2 , H_2S y N_2 se separan del metano tras su paso por un material adsorbente. Generalmente, dicho material, suele ser carbón activado u otro tamiz molecular como pueden ser las zeolitas.

Esta tecnología se compone generalmente de varias columnas trabajando en paralelo y el proceso consta de cuatro etapas:

- 1ª) Adsorción a alta presión.
- 2ª) Desorción a través de reducción de presión con flujo paralelo y flujo a contra corriente.

3ª) Desorción a través de purga con biogás sin tratar o con gas acondicionado.

4ª) Presurización de la columna con biogás sin tratar o con gas acondicionado.

En la primera fase, el biogás entra por el fondo de la columna para que el CO_2 sea adsorbido. Los absorbentes alternan los ciclos de adsorción, regeneración y aumento de presión. Previo a la saturación total del adsorbente, se detiene la fase de adsorción de la columna operativa, para dar paso a la siguiente ya regenerada, lográndose así una operación continua.

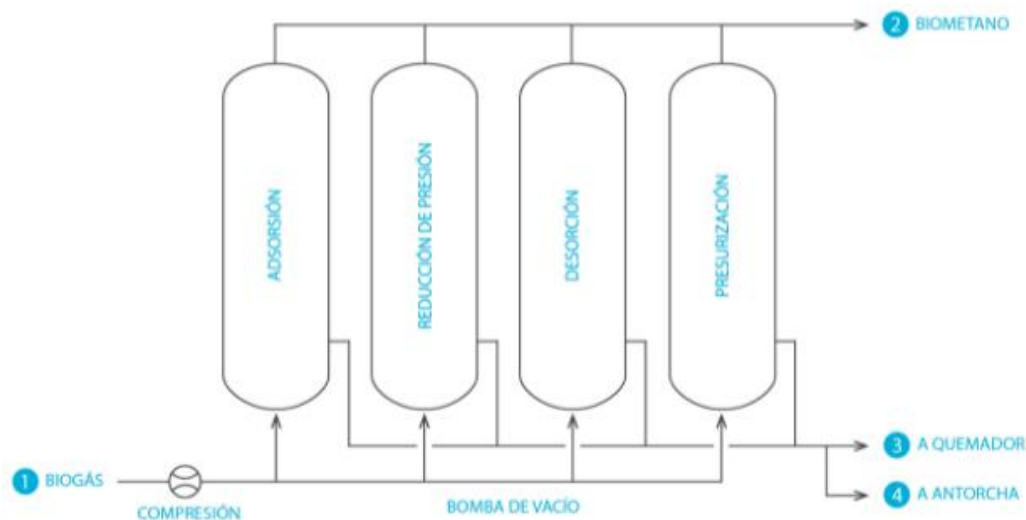


Figura 4.6: Esquema de proceso PSA. (14)

4.6.1.1.4 Separación criogénica

Tecnología basada en los puntos de ebullición del metano y el dióxido de carbono. Mediante criogenización, como la temperatura de ebullición del metano es de -160°C y la del CO_2 de -78°C , se recupera el CO_2 en estado líquido. Este sistema tiene especial interés en la generación de bioGNL. Es un proceso poco usado debido a su alto consumo eléctrico.

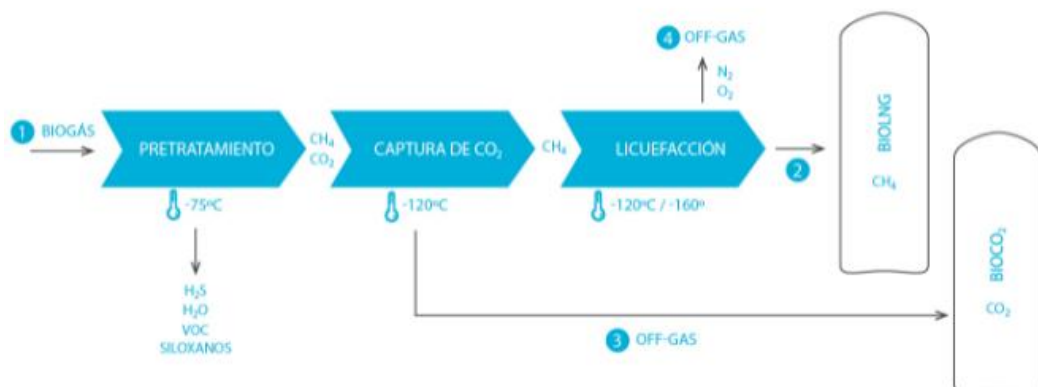


Figura 4.7: Esquema de proceso de separación criogénica. (14)

4.6.1.1.5 Separación con membranas

El biogás es comprimido y tras su paso por membranas selectivas se consigue un alto grado de pureza. A mayor número de etapas, más optimizado será el proceso. Hay dos tipos de sistemas de membranas, membranas Gas-Gas y membranas Gas-Líquido. Las tipo Gas-Gas se componen de unas fibras huecas que pueden estar compuestas de diferentes polímeros y que tienen una permeabilidad de 20 a 60 veces más alta para el CO_2 que para el CH_4 . Opera a altas presiones y su eficacia dependerá del tipo de material de la membrana. Las membranas tipo Gas-Líquido, están formadas por membranas igualmente, la diferencia es que por un lado pasa el gas y por otro un líquido iónico disolvente que es capaz de absorber el CO_2 que pasa a través de dicha membrana.

El coste de las membranas Gas-Gas es superior al coste de las membranas Gas-Líquido, debido a que las primeras necesitan altas presiones para trabajar y las segundas lo pueden hacer a presión atmosférica, con el consiguiente ahorro en coste energético.

Se trata de una tecnología robusta y ampliamente probada y desarrollada. Es un sistema intensivo en consumo eléctrico debido a la compresión del gas pero no consume energía térmica. Es rentable en bajos caudales, debido a que a mayor caudal se necesitan más membranas y mayor consumo.

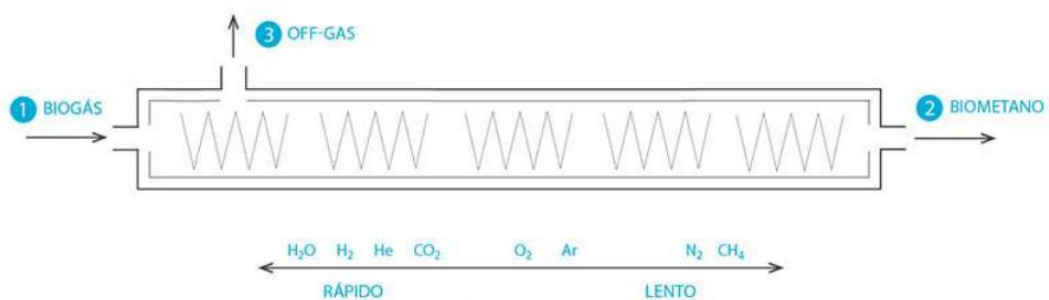


Figura 4.8: Esquema de proceso de membranas. (14)

4.6.1.1.6 PWS (Pressurized Water Scrubbing)

Esta tecnología trabaja mediante diferencia de solubilidades. El metano y el CO_2 son separados mediante la diferencia de solubilidad de estos compuestos. El biogás pasa por agua presurizada, quedando el CO_2 y el H_2S disueltos en ella. Posteriormente, el agua es sometido con aire a presión para liberar los componentes absorbidos. Además, es necesario un sistema de

secado posterior para el biometano, debido a su saturación. Uno de los problemas de este sistema es que no es un ciclo cerrado por lo que el gasto de agua es muy elevado.

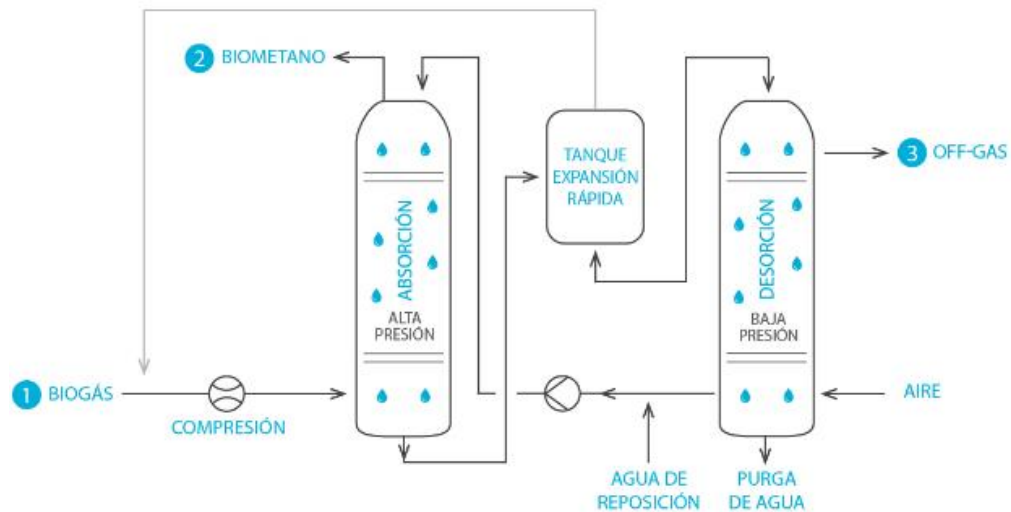


Figura 4.9: Esquema de proceso Pressurized Water Scrubbing. (14)

4.6.2 Usos

Los usos del biometano son similares a los del gas natural debido a sus similitudes en composición química y poder energético. Los usos más comunes son la inyección en la red de gas natural y el uso vehicular.

4.6.2.1 Inyección de biometano en la red de gas natural

El biometano cubre las necesidades de los usuarios de la red de gas natural de la misma forma que el propio gas natural, en las mismas condiciones y similar potencia energética. Para ello, el biogás deberá estar correctamente depurado y cumplir unos estándares de calidad regulados y normativizados.

La planta deberá contar con equipos de análisis y control de manera constante para asegurar que el gas introducido en el sistema gasista cumple con la composición, PCS y densidad adecuada.

Los usuarios encargados de la introducción de cualquier tipo de gas en la red gasista, serán los responsables de su calidad y deberán justificar, mediante certificación emitida por los organismos competentes que el gas cumple con especificaciones para su inyección en la red de gas natural UNE-EN 16723-1:

Tabla 4.11: Especificaciones para la inyección de todo tipo de gas en la red de gas natural. (17)

Propiedad (*)	Unidad	Mínimo	Máximo
Índice de Wobbe	kWh/m ³	13.403	16.058
PCS	kWh/m ³	10.26	13.26
d	m ³ /m ³	0.555	0.700
S Total	mg/m ³	-	50
H ₂ S + COS (como S)	mg/m ³	-	15
RSH (como S)	mg/m ³	-	17
O ₂	mol%	-	[0.01]
CO ₂	mol%	-	2.5
H ₂ O (Punto de rocío)	°C at 70 bar (a)	-	+2
HC (Punto de rocío)	°C at 1-70 bar (a)	-	+5
Polvo / Partículas	-	Técnicamente Puro	

Además de las características anteriores, cuando el gas proceda de fuentes no convencionales como el biogás, la biomasa, etc. se deberán cumplir también, los requisitos de la siguiente tabla:

Tabla 4.12: Especificaciones de gases no convencionales para su inyección en la red gasista (17)

Propiedad (*)	Unidad	Mínimo	Máximo
Metano (CH ₄)	mol %	95	-
CO	mol %	-	2
H ₂	mol %	-	5
Compuestos Halogenados:			
Flúor	mg/m ³	-	10 1
Cloro			
Amoníaco	mg/m ³	-	3
Mercurio	µg/m ³	-	1
Siloxanos	mg/m ³	-	10
Benceno, tolueno, Xileno (BTX)	mg/m ³	-	500
Microorganismos	-	Técnicamente puro	
Polvo / Partículas	-	Técnicamente puro	

*Tablas expresadas en las siguientes condiciones de referencia: [0°C; V (0°C: 1,01325 bar)]

4.6.2.2 Uso vehicular

El biometano empleado para la propulsión de vehículos puede tener dos formas:

- Gas Natural Comprimido (bioGNC)

Se trata de un gas comprimido a altas presiones. Una vez que el biogás es enriquecido se comprime a unos 250 bar y se transporta hasta las estaciones de servicio.

- Gas Natural Licuado (bioGNL)

El gas natural licuado es un gas en estado líquido. Una vez que el biogás es enriquecido y convertido en biometano, este pasa por un proceso de licuefacción y criogenización que alcanza los -160°C . Por ello, debe de ser almacenado y transportado en recipientes con un adecuado aislamiento que garanticen su estado líquido. Su ventaja es que ocupa un menor volumen, además de no ser tóxico ni corrosivo.

4.6.3 Regulación y normativa

La normativa por la que se rige biometano es la siguiente **(16)** :

4.6.3.1 Legislación europea

- *DIRECTIVA 2009/73/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de julio de 2009 sobre normas comunes para el mercado interior del gas natural y por la que se deroga la Directiva 2003/55/CE*

Normas de organización y funcionamiento del sector del gas natural incluido el biogás y al gas obtenido a partir de la biomasa en tanto en cuanto se inyecten a la red de gas natural.

- *DIRECTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*

Objetivo de renovables y obligaciones de implantación de mecanismos de certificación del origen, entre ellos, del gas renovable.

4.6.3.2 Legislación española

- *Ley 34/1998, de 7 de octubre, del sector de hidrocarburos.*

Ordenación del suministro de gases combustibles por canalización.

- *Real Decreto 949/2001, de 3 de agosto, por el que se regula el acceso de terceros a las instalaciones gasistas y se establece un sistema económico integrado del sector de gas natural.*

Acceso de terceros a las instalaciones y régimen económico (estructura tarifas, peajes y cánones)

- *Real Decreto 1434/2002, de 27 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de gas natural.*

Régimen jurídico aplicable a las actividades y a las relaciones entre los distintos sujetos que las desarrollan. Conexiones a la red.

Régimen de autorización correspondiente a todas las instalaciones vinculadas a las actividades de gas, competencia de la Administración General del Estado.

- *Real Decreto 984/2015, de 30 de octubre, por el que se regula el mercado organizado de gas y el acceso de terceros a las instalaciones del sistema de gas natural.*

Define el servicio acceso al punto virtual de balance tanto desde la red de distribución como la de transporte, posibilitando la inyección de gas renovable en la red gasista.

- *Real Decreto 335/2018, de 25 de mayo, por el que se modifican diversos reales decretos que regulan el sector del gas natural.*

Fija la estructura del peaje de entrada al Punto Virtual de Balance tanto desde la red de transporte como de distribución.

- *Orden TEC/1367/2018, de 20 de diciembre, por la que se establecen los peajes y cánones asociados al acceso de terceros a las instalaciones gasistas y la retribución de las actividades reguladas para el año 2019.*

Determina el valor del peaje de entrada al Punto Virtual de Balance tanto desde la red de transporte como de distribución.

- *Normas de Gestión Técnica del Sistema y protocolos de detalle ORDEN ITC/3126/2005, de 5 de octubre, por la que se aprueban las normas de gestión técnica del sistema gasista.*
- *Resolución de 8 de octubre de 2018, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifican las normas de gestión técnica del sistema NGTS-06, NGTS-07 y los protocolos de detalle PD-01 y PD-02. Fija los parámetros de calidad para la inyección de gas a la red de gas natural.*

5 APLICACIÓN AL CASO PRÁCTICO

5.1 INTRODUCCIÓN

En la aplicación al caso práctico se procede a dimensionar la planta de digestión. La materia prima escogida para la digestión será de origen agrícola y concretamente purín vacuno. A continuación, se analizará el recurso, su disponibilidad, la cantidad de energía susceptible de aprovechamiento, el dimensionamiento de la planta en base a la cantidad de residuo a tratar y su viabilidad económica.

5.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

5.2.1 Macrolocalización



Figura 5.1: Situación de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Actualmente, en España, existen unas 50 plantas de biogás distribuidas en las diferentes comunidades autónomas. La comunidad autónoma de Cantabria cuenta con estudios de proyecto realizados, pero a día de hoy, no se ha llevado a cabo ninguna planta centralizada. Por ello, debido a la poca competencia en esta tecnología, su carácter importador y su elevado número de cabezas de ganado, se decide el estudio en esta CC.AA situada al norte de la península.

5.2.2 Microlocalización

Dentro de la Comunidad Autónoma, la zona de estudio escogida será la zona occidental debido a su carácter rural, con abundancia de ganado y su poca competencia en el sector de la generación eléctrica.



Figura 5.2: Situación de la zona de estudio.

En la siguiente imagen se muestra la distribución del número de reses en los diferentes municipios de dicha comunidad. En el año 2021 se cuenta con un total de 275.027 cabezas de ganado bovino distribuidas en sus 102 municipios.

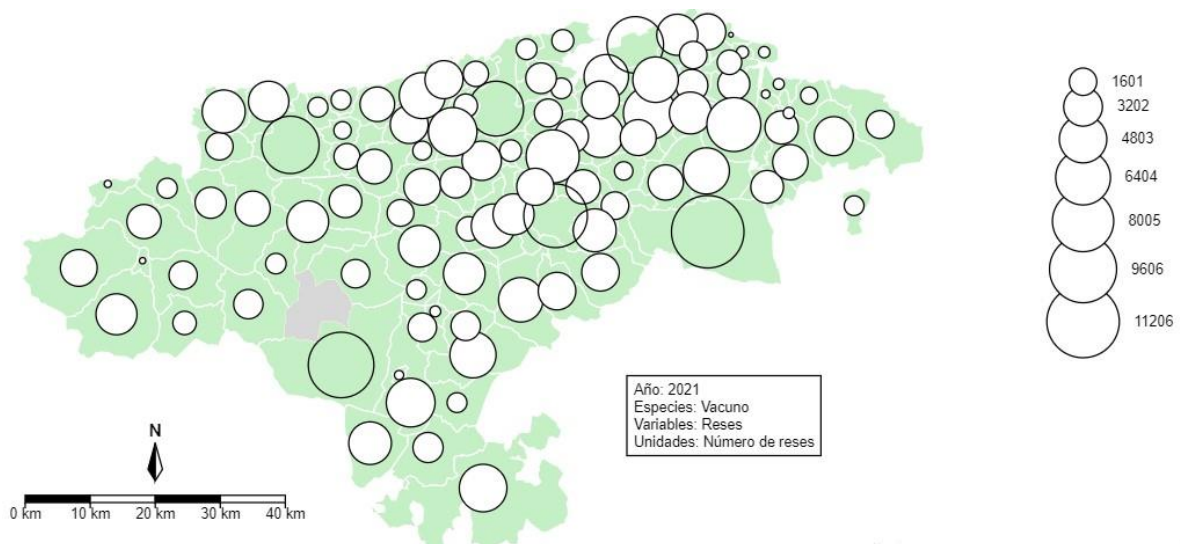


Figura 5.3: Censo de ganado en Cantabria. (2)

En la zona estudio, las comarcas a estudiar serán la comarca de Saja-Nansa y la comarca del Besaya. Se tendrán en cuenta tres posibles emplazamientos y se realizará una matriz de decisión con los factores más importantes a grandes rasgos a tener en cuenta:

- Seguridad y cercanía de puntos de aprovisionamiento de la materia prima
- Cercanía a vías de comunicación
- Cercanía a infraestructuras (conexión eléctrica, hidrología...)
- Impacto ambiental
- Competitividad

5.2.2.1 Cantidad y cercanía de puntos de aprovisionamiento de la materia prima

Se estudia la cantidad de desechos disponibles en la zona y su cercanía a la posible ubicación de la planta que es uno de los factores más importantes de cara a la rentabilidad de la planta.

5.2.2.2 Cercanía a vías de comunicación

La cercanía a vías de comunicación es importante de cara a la facilidad de acceso de los vehículos de recogida de residuos y transporte desde el lugar de origen hasta la planta de digestión.

5.2.2.3 Cercanía a infraestructuras

La cercanía a redes de distribución como red eléctrica, gas e hídrica son importantes tanto de cara al abastecimiento de la planta, como a la inyección de la electricidad y del gas generado en ella a la red.

5.2.2.4 Cercanía a industria

Se valora la posible alimentación de electricidad a procesos industriales cercanos.

5.2.2.5 Impacto ambiental

Se estudia en cada alternativa a grandes rasgos, el impacto que generaría el movimiento de tierras, la posible contaminación de acuíferos cercanos, pérdida de biodiversidad, el impacto visual, etc.

5.2.2.6 Competitividad

Se observa si hay empresas cercanas con características similares y producción de energía eléctrica que puedan suponer una amenaza y competencia a dicha planta.

5.2.2.7 Valoración del emplazamiento mediante matriz de decisión

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se procede a la elaboración de la matriz de decisión del emplazamiento, utilizando una puntuación de 1 a 5, siendo 1 la valoración más desfavorable y 5 la más favorable.

La alternativa 1 (A1) se encuentra situada en el municipio de San Pedro, carretera general N-634. Parcela aproximada de 100.000-130.000 m², con un desnivel en 600 metros de 40 metros (16).

La alternativa 2 (A2) se encuentra situada en el municipio de Cabezón de la Sal, cercana a la autovía A-8. Parcela aproximada de 70.000-100.000 m², con un desnivel en 500 metros de 30 metros (16).

La alternativa 3 (A3) se encuentra situada en el Parque Empresarial Saja-Besaya (Reocín). Parcela aproximada de 20.000-30.000 m², con un desnivel en 100 metros de 2 metros (16).

Tabla 5.1: Matriz de decisión del emplazamiento de la planta.

Alternativa	A1	A2	A3
Criterio			
Cantidad y cercanía a materia prima	4	5	3
Cercanía vías de comunicación	5	5	4
Cercanía a infraestructuras	3	4	5
Cercanía a industria	3	4	5
Impacto ambiental	3	4	5
Competitividad	5	5	3
PUNTUACION TOTAL	27	32	29

Tabla 5.2: Imagen satélite de la zona geográfica de las alternativas de estudio (18).

<u>Alternativa 1</u>	<u>Alternativa 2</u>	<u>Alternativa 3</u>
		

El resultado obtenido en la matriz de decisión es que la alternativa que más peso tiene es la 2. Por lo tanto, el emplazamiento exacto de la planta será en el municipio de Cabezón de la Sal, colindante con el municipio de Valdáliga, uno de los de mayor número de cabezas. Esta alternativa, aparte de contar con un número elevado de reses en la zona, tiene otro punto a favor y es la distancia de recogida del residuo.

Esto hace que sea un punto estratégico para la localización de la planta centralizada, dotándola de una mayor rentabilidad al ser menor el radio kilométrico de recogida. Además, tiene una buena comunicación tanto con carreteras, como con la vía férrea, buena conexión con redes de distribución y baja competitividad por inexistencia de instalaciones de este tipo.

5.3 DISPONIBILIDAD DEL RESIDUO

5.3.1 Análisis del recurso en la CCAA

Como bien se expone en el capítulo 3.2, en Cantabria se cuenta con aproximadamente 275.027 cabezas de ganado vacuno. A continuación, se calcula la cantidad aproximada de la materia prima en toda la comunidad, como análisis de la abundancia del recurso y su posibilidad de aprovechamiento energético.

5.3.1.1 Número de animales según edades.

En la siguiente tabla se expone el número de animales según edades, el porcentaje sobre el total de este y el peso vivo medio del animal según su edad.

Tabla 5.3: Número de ganado bovino en Cantabria y peso medio vivo (2).

Edades	Número de animales	% de animales	Peso vivo (kg aprox.)
Menores de 12 meses	58.086	21,12 %	325
Mayores de 12 y menores de 24 meses	41.226	14,99 %	500
Mayores o igual a 2 años	175.715	63,89 %	725
TOTAL	275.027	100 %	

5.3.1.2 Cantidad de residuo generado según peso del animal.

A partir de los datos de la tabla anterior, se calcula la cantidad de estiércol total producida diariamente por el total de ganado bovino en función de su edad y su peso medio.

Sabiendo que la producción aproximada de residuo es de 0,086 kg de estiércol por kg de peso vivo del animal al día (3), se obtiene lo siguiente:

- Animales menores de 12 meses:

$$58.086 \text{ animales} \cdot 325 \frac{\text{kg}}{\text{animal}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 1.623.503,7 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- Animales mayores de 12 y menores de 24 meses:

$$41.226 \text{ animales} \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{animal}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 1.772.718 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- Animales mayores o igual a 2 años:

$$175.715 \text{ animales} \cdot 725 \frac{\text{kg}}{\text{animal}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 10.955.830,25 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- El total del residuo generado al día es:

$$1.623.503,7 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} + 1.772.718 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} + 10.955.830,25 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \\ = 14.352.051,95 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

Se genera al día aproximadamente unas 14.352 toneladas de residuo ganadero, 5.238.499 toneladas anuales.

5.3.1.3 Características físico-químicas y producción de biogás en Cantabria.

Como se detalla en el punto 4.2.1, la producción en metano de la materia de digestión depende de su composición y características físico-químicas. Para un mismo tipo de residuo, depende de la localización, estas características pueden variar. En la siguiente tabla se especifican cuáles son estas para la Comunidad Autónoma de estudio.

Tabla 5.4: Características físico-químicas del biogás. (16)

Materia seca (MS %)	10 %
Sólidos volátiles (SV/MS %)*	80 %
Biodegradabilidad**	56,3 %
Producción CH ₄ / SV	203 Nm ³ /t SV
% CH ₄	60,9 %
N (kg N/t)	3,8
N-NH ₄ (kg N/t)	1,5
Ratio C/N	11

* Porcentaje de materia orgánica en la materia seca.

**Porcentaje de materia orgánica que es degradada en la producción de biogás comparada con la materia orgánica principal.

Con estos datos, se pueden calcular por tanto los siguientes datos del proceso:

- Producción específica de biogás por tonelada de sólido volátil:

$$203 \frac{m^3 CH_4}{t SV} \cdot \frac{1 m^3 biogás}{0,609 m^3 CH_4} = 333,34 \frac{m^3 biogás}{t SV}$$

- Producción de metano por tonelada de residuo:

$$0,1 \frac{t ST}{t residuo} \cdot 0,8 \frac{t SV}{t ST} \cdot 203 \frac{m^3 CH_4}{t SV} = 16,24 \frac{m^3 CH_4}{t residuo}$$

- Producción de biogás por tonelada de residuo:

$$16,24 \frac{m^3 CH_4}{t residuo} \cdot \frac{1 m^3 biogás}{0,609 m^3 CH_4} = 26,67 \frac{m^3 biogás}{t residuo}$$

La cantidad de biogás susceptible de obtención en el recurso sería:

$$26,67 \frac{m^3 \text{ biogás}}{t \text{ residuo}} \cdot 14.352 \frac{t \text{ residuo}}{\text{día}} = 382.767,84 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

$$382.767,84 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} = 139.710.261,6 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{año}}$$

5.3.1.4 Potencial energético susceptible de aprovechamiento a nivel autonómico.

Sabiendo que el porcentaje de metano en el biogás es del 60,9 % aproximadamente **(16)**, la cantidad de biometano que se podría obtener del biogás generado con el recurso del purín de vacuno en toda la comunidad autónoma sería la siguiente:

$$139.710.261,6 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{año}} \cdot \frac{60,9}{100} = 85.083.549,31 \frac{m^3 CH_4}{\text{año}}$$

Una vez conocidos los metros cúbicos cubiertos por el recurso, con el Poder Calorífico Superior (en adelante PCS) del metano, se calcularía la energía que se podría extraer con ello:

Sabiendo que el PCS biometano: 11,06 kWh/m³CH₄ **(16)**

$$85.083.549,31 \frac{m^3 CH_4}{\text{año}} \cdot \frac{11,06 \text{ kWh}}{m^3 CH_4} = 941.024.055,4 \frac{kWh}{\text{año}}$$

El potencial energético anual sería de unos 941 GWh.

Para la planta objeto de estudio se prevé destinar la energía obtenida para su inyección en la red de gas natural para alimentación de viviendas, así como para abastecimiento como combustible vehicular para abastecer una flota de autobuses urbana.

En base a la cantidad de energía calculada anteriormente, se podría cubrir el siguiente número de viviendas y autobuses:

- Viviendas:

La media de consumo de una vivienda en España ronda aproximadamente los 9.922 kWh. **(17)**

$$941 \frac{GWh}{año} \cdot \frac{1 vivienda}{9,922 \cdot 10^{-3} GWh} = 94.839,75 viviendas$$

Se podrían abastecer al año un total de en torno a 94.839 viviendas.

- Autobuses:

Según datos prácticos de un autobús experimental en Pamplona, el consumo de un autobús de biometano a los 100 kilómetros es de 57 metros cúbicos de este gas **(21)**.

Conociendo que la velocidad media de un autobús urbano ronda los 12 km/h **(22)** y suponiendo una actividad diaria de 12 horas, la distancia media diaria recorrida por un autobús sería de:

$$12 \frac{km}{h} \cdot 12 \frac{h}{día} = 144 \frac{km}{día}$$

Por tanto, un autobús que realiza un trayecto de 144 km diarios, consumiría unos 82,08 m³ de biometano.

$$144 \frac{km}{día} \cdot \frac{57 m^3 de biometano}{100 km} = 82,08 \frac{m^3 de biometano}{día/autobús}$$

Pudiendo obtener de este recurso energético en Cantabria, 233.105,61 m³ de biometano diarios, se podría alimentar a

$$233.105,61 \frac{m^3 biometano}{día} : 82,08 \frac{m^3 de biometano}{día/autobús} = 2.839,98 \simeq 2.839 autobuses$$

5.3.1.5 Ahorro de emisiones CO₂ equivalentes

El ahorro de emisiones al utilizar este recurso será el que se hubiese generado en el caso de no aprovechar el residuo y cubrir esa energía con fuentes no renovables como el gas natural. Para calcular dicho ahorro, por un lado, se calculará el ahorro de emisión al evitar que el purín desprenda a la atmosfera sus contaminantes. Este será el mismo independientemente del uso que se le adjudique al biometano obtenido. Por otro lado, para la opción de inyección en la red para viviendas, el ahorro será la cantidad de CO₂ producida si no se sustituyese el gas natural por el biometano y para la opción de combustible vehicular, la cantidad de CO₂ generada por el número de autobuses que se podrían abastecer con el biometano.

A partir de la energía primaria obtenida y sabiendo que el factor de ahorro de emisiones del residuo es de 278 g CO₂ el kWh (16), se podrían ahorrar 5.371,61 toneladas de emisiones anuales:

$$941.024.055,4 \frac{kWh}{año} \cdot 278 \frac{g CO_2}{kWh} \cdot \frac{1 t CO_2}{1.000.000 g CO_2} = 261.604,69 \frac{t CO_2}{año}$$

- Viviendas:

Conociendo que la emisión de CO₂ del gas natural es de 0,182 kg CO₂ por kWh_{PCS} (24), el ahorro en emisiones para los mismos metros cúbicos generados de biometano sería:

$$85.083.549,31 \frac{m^3 CH_4}{año} \cdot 11,98 \frac{kWh}{m^3} = 1.019.300.921 \frac{kWh}{año}$$

$$0,182 \frac{kg CO_2}{kWh} \cdot 1.019.300.921 \frac{kWh}{año} \cdot \frac{1 t CO_2}{1000 kg CO_2} = 185.512,77 \frac{t CO_2}{año}$$

- Autobuses urbanos:

Los autobuses urbanos tienen un factor de emisión de CO₂ aproximadamente de 49,4 gramos por pasajero y kilómetro (25). Suponiendo una ocupación de 54 plazas por autobús y 144 km diarios, los 61 autobuses que se podrían abastecer con la producción de biometano, mediante combustible convencional emitiría aproximadamente:

$$49,4 \frac{g CO_2}{pasaj./km} \cdot 54 \frac{pasaj.}{autobús} \cdot 144 \frac{km}{día} = 384.134,4 \frac{g CO_2}{día/autobús} = 0,384 \frac{t CO_2}{día/autobús}$$

Al año y por el total de autobuses abastecidos:

$$0,384 \frac{t CO_2}{día/autobús} \cdot 365 \frac{días}{año} \cdot 2.839 autobuses = 397.914,24 \frac{t CO_2}{año}$$

En la siguiente tabla se muestra el total de toneladas ahorradas para cada alternativa, siendo la cantidad de emisiones generadas a partir de la energía primaria obtenida la misma para ambos casos:

Tabla 5.5: Resumen de ahorro de emisiones de CO₂ para las diferentes alternativas en la CC.AA

AHORRO DE EMISIONES DE CO ₂ (t/año)	
Por inyección en red de gas natural para viviendas	447.117,46
Por uso como combustible vehicular	659.518,93

Como se expone en el capítulo 3.5 , en el año 2020 se cuenta con un total de emisiones de CO₂ de 5.241.000 toneladas en la CC.AA. **(24)**. Si se aprovechara el residuo disponible y se le diese salida como recurso energético, se podrían disminuir estas emisiones en un 8,53 % en el caso de inyección a la red y en un 12,58 % en el caso de uso vehicular.

5.3.2 Análisis del recurso en la zona de estudio

5.3.2.1 Número de animales según edades

En el emplazamiento elegido se estudia la seguridad de aprovisionamiento de materia prima y se justifica de la siguiente forma:

Teniendo en cuenta los municipios limítrofes al municipio donde se implantará la central y donde mayor número de animales hay, como se puede ver en la siguiente tabla, se cuenta con un total aproximado de 485 explotaciones y 13.312 reses (Año 2021) **(2)**:

Tabla 5.6: Censo de ganado en los municipios de recogida de residuo. (2)

Municipios	VACUNO		
	Explotaciones	Reses	Reses por explotación
39012- Cabezón de la sal	82	1.429	17,43
39041- Mazcuerras	113	2.568	22,73
39066- Riente	68	2.282	33,56
39091- Valdáliga	222	7.033	31,68
Total	485	13.312	

Para el cálculo de la cantidad de residuo, debido a que a nivel de municipio se carece de la clasificación de los animales por edades, se realiza a partir de los datos a nivel de CC.AA.

una extrapolación del porcentaje de la cantidad de animales por edades en dichos municipios según el porcentaje existente a nivel autonómico. Multiplicando el número total de reses de cada municipio a tener en cuenta, por el porcentaje de animales calculado con anterioridad, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 5.7: Número de reses por municipio y edad. (2)

		Municipios				
Edades	%	Cabezón de la Sal	Mazcuerras	Ruente	Valdáliga	TOTAL
Animales < 12 meses	21,12	302	542	482	1.485	2.811
Animales > 12 y < 24	14,99	214	385	342	1.054	1.995
Animales >= 2 años	63,89	913	1.641	1.458	4.494	8.506
TOTAL	100	1.429	2.568	2.282	7.033	13.312

5.3.2.2 Cantidad de residuo generado según peso del animal

Teniendo en cuenta los municipios anteriores, los más cercanos a la ubicación de la planta, se podría la siguiente cantidad de residuo:

- Animales menores de 12 meses:

$$2.811 \text{ animales} \cdot 325 \frac{\text{kg}}{\text{animal}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 78.567,45 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- Animales mayores de 12 y menores de 24 meses:

$$1.995 \text{ animales} \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{animal}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 85.785 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- Animales mayores o igual a 2 años:

$$8.506 \text{ animales} \cdot 725 \frac{\text{kg}}{\text{animal}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 530.349,1 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- El total del residuo generado al día es:

$$78.567,45 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} + 85.785 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} + 530.349,1 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \\ = 694.701,55 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

Se asegura el aprovisionamiento de residuo con creces, ya que en la planta estudio se prevé digerir unas 313 toneladas diarias.

5.4 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

5.4.1 Cantidad de residuo tratado diariamente.

Para que la dimensión de la planta no se exceda y además, poder asegurar la materia prima, se tratará el residuo de unas 6.000 cabezas de vacuno de las 13.312 existentes en la zona de estudio. Para ello sacamos la cantidad generada a partir del residuo de estas 6.000 cabezas. Se calcula el número de animales por edades con los porcentajes de la tabla 5.6:

- Animales menores de 12 meses:

$$6.000 \text{ cabezas} \cdot \frac{21,12}{100} = 1267,2 \approx 1267 \text{ cabezas}$$

- Animales mayores de 12 y menores de 24 meses:

$$6.000 \text{ cabezas} \cdot \frac{14,99}{100} = 899,4 \approx 899 \text{ cabezas}$$

- Animales mayores o igual a 2 años:

$$6.000 \text{ cabezas} \cdot \frac{63,89}{100} = 3.833,4 \approx 3.834 \text{ cabezas}$$

Con el número de animales por edades, el peso medio según edad y la cantidad media de excreta generada por kg de animal se obtiene la siguiente cantidad de residuo:

- Animales menores de 12 meses:

$$1267 \text{ cabezas} \cdot 325 \frac{\text{kg}}{\text{cabeza}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 35.412,65 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

- Animales mayores de 12 y menores de 24 meses:

$$899 \text{ cabezas} \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{cabeza}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 38.657 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

-
- Animales mayores o igual a 2 años:

$$3.834 \text{ cabezas} \cdot 725 \frac{\text{kg}}{\text{cabeza}} \cdot 0,086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg animal día}} = 239.049,90 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

El total del residuo generado al día es de aproximadamente 313 toneladas, que será la cantidad de alimentación diaria:

$$\begin{aligned} 35.412,65 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} + 38.657 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} + 239.049,90 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \\ = 313.119,55 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} = 313,12 \frac{\text{t}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Anualmente, para un funcionamiento de la planta del 95%, 8.328 horas anuales (347 días), se alimentarán 108.652,48 toneladas de materia fresca.

$$313.119,55 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}} \cdot 347 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 108.652.483,90 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{año}} = 108.652,48 \frac{\text{t}}{\text{año}}$$

5.4.2 Cantidad de biogás obtenido

De la cantidad de residuo alimentado al digestor, se obtiene la siguiente cantidad diaria de biogás:

$$V_{\text{biogás generado}} = 313,12 \frac{\text{t residuo}}{\text{día}} \cdot 26,67 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{t residuo}} = 8.350,91 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

El caudal en m³/h de biogás generado será:

$$Q = 8.350,91 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 347,95 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}$$

5.4.3 Cantidad de digestato obtenido

Para calcular la cantidad de digestato producido se realiza un balance de masa del proceso. La carga diaria de materia fresca en el digestor es de 313,12 toneladas. De esta carga, parte de ese residuo será convertido en biogás y otra parte en digestato. Sabiendo la cantidad de biogás generado y su densidad, se calcula la cantidad en masa de biogás y la diferencia con el total de la cantidad de residuo será la cantidad de digestato generada.

Como se calcula en el punto 5.4.2, se producen unos 8.350,91 m³ de biogás diariamente. Conociendo que la densidad del biogás es de 1,2 kg/m³ **(6)** se calcula la cantidad en masa de biogás generado:

$$8.350,91 \frac{m^3 \text{ biogas}}{\text{día}} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} = 10.021,09 \frac{kg \text{ biogás}}{\text{día}}$$

La masa del digestato se calcula como la diferencia entre la masa introducida menos la transformada en biogás:

$$313.119,55 \frac{kg \text{ residuo}}{\text{día}} - 10.021,09 \frac{kg \text{ biogás}}{\text{día}} = 303.098,46 \frac{kg \text{ digestato}}{\text{día}}$$

5.4.4 Tanque de alimentación.

El residuo de tratamiento de la planta debe de ser almacenado en un primer tanque de almacenamiento, el tanque de alimentación. La carga se realizará diariamente pero para asegurar un margen de maniobra se dimensionará para almacenamiento de dos días.

La densidad del residuo es de 0,8 t/m³ **(3)**, por lo que la carga diaria pasada a metros cúbicos es la siguiente:

$$313,12 \frac{t}{\text{día}} \cdot \frac{1 m^3}{0,8 t} = 391,40 \frac{m^3}{\text{día}}$$

La dimensión mínima del tanque de alimentación deberá ser de 391,40 m³/día.

Dimensionándolo para dos días de almacenamiento el volumen tendrá que ser de:

$$391,40 \frac{m^3}{\text{día}} \cdot 2 \text{ días} = 782,80 \frac{m^3}{\text{día}}$$

A este valor deberá sumársele un 20% de almacenamiento de seguridad **(3)**:

$$782,80 m^3 \cdot 1,2 = 939,36 \simeq 940 m^3$$

El volumen final total del tanque de alimentación será de 940 m³.

El tanque dispondrá de un sistema de agitación para evitar la formación de costra superficial y dotar de una buena homogenización de la materia antes de ser alimentada en el biodigestor.

5.4.5 Selección de la temperatura de trabajo.

Para el cálculo de la temperatura de trabajo es necesario tener en cuenta las temperaturas ambientales de la zona de estudio. Para ello se saca la media de la temperatura media anual en cuatro años diferentes **(22)**:

$$T^a_{media \text{ año } 2017} = 14,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T^a_{media \text{ año } 2018} = 14,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T^a_{media \text{ año } 2019} = 14,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T^a_{media \text{ año } 2020} = 15,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La media de estas temperaturas anuales es de 15°C.

Para calcular la diferencia de temperatura que habrá que aplicar en el biodigestor para alcanzar la temperatura de trabajo requerida tendrá que tenerse en cuenta la temperatura mínima media anual. Los meses tenidos en cuenta para el cálculo de la temperatura mínima será de Diciembre a Marzo, es decir, los meses de invierno.

$$T^a_{media \text{ mínima año } 2017} = 8,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T^a_{media \text{ mínima año } 2018} = 7,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T^a_{media \text{ mínima año } 2019} = 8,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T^a_{media \text{ mínima año } 2020} = 9,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La media de estas temperaturas mínimas anuales es de 8,3°C.

Estas temperaturas estarían dentro del rango psicrófilico pero la degradación sería muy lenta. Se necesitará aumentar la temperatura al rango mesófilico. La temperatura óptima dentro de este rango está comprendida entre los 25-45°C.

La digestión óptima se obtiene a unos 35°C por lo que es la temperatura de operación seleccionada **(3)**.

5.4.5.1.1 Energía térmica requerida en el digestor

La energía térmica requerida por el sistema de calefacción para elevar la temperatura en el digestor a 35°C se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q = \dot{m} \cdot Cp (\Delta T) = \dot{m} \cdot Cp (T_{requerida} - T_{estiércol})$$

Donde:

$\dot{m}$ = Flujo másico másico del sustrato

C_p = capacidad calorífica del sustrato

ΔT = diferencia de temperaturas

- Flujo másico (kg/s)

$$313.119,55 \frac{Kg}{día} \cdot \frac{1 día}{24 h} \cdot \frac{1 h}{3600 s} = 3,6241 \frac{Kg}{s}$$

- Capacidad calorífica del sustrato: $4186,8 \frac{J}{Kg K}$
- Temperatura estiércol: $8,3^{\circ}C$ (mínima anual)
- Temperatura requerida de digestión: $35^{\circ}C$

$$Q = 3,6241 \frac{Kg}{s} \cdot 4186,8 \frac{J}{Kg K} \cdot (308 - 281,3 K) = 405.129,30 W = 405,13 kW$$

5.4.6 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Si partiésemos del volumen del digestor el tiempo de retención hidráulico se calcularía con la siguiente fórmula:

$$Volumen de carga diaria \left(\frac{m^3}{día} \right) = \frac{Volumen del digestor (m^3)}{Tiempo de retención (días)}$$

Como el volumen de digestor lo calcularemos en base a los parámetros de diseño, se sabe también que el tiempo de retención hidráulico esta interrelacionado con la temperatura del proceso. La interrelación sigue la siguiente ecuación:

$$TRH = -51,227 \cdot \ln(T^a) + 206,72$$

Sustituyendo los $35^{\circ}C$ elegidos para el proceso se obtiene que el tiempo de retención hidráulica es de aproximadamente unos 25 días.

$$.TRH = -51,227 \cdot \ln(35) + 206,72 = 24,59 \approx 25 días$$

5.4.7 Carga orgánica volumétrica (COV)

La COV depende fundamentalmente de la temperatura del proceso y el tiempo de retención hidráulico calculados previamente. La fórmula de cálculo de la carga orgánica volumétrica es la siguiente:

$$COV = \frac{V \cdot [SV]_o}{V_R}$$

Donde:

$$V = \text{caudal de tratamiento} \left(\frac{m^3}{día} \right)$$

$$V_R = \text{volumen del reactor} (m^3)$$

$$[SV]_o = \text{Concentración de materia orgánica} \left(\frac{kg \text{ SV}}{m^3} \right)$$

Se sabe que el TRH es igual a:

$$TRH = \frac{V_R}{V}$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación de la COV nos queda que:

$$COV = \frac{[SV]_o}{TRH} = \frac{\% SV \cdot \rho_{residuo}}{TRH} = \frac{0,1 \cdot 0,8 \cdot 800 \frac{kg}{m^3}}{25 \text{ días}} = 2,56 \frac{kg \text{ SV}}{m^3 \text{ día}}$$

*El porcentaje de SV es en base al porcentaje de MS.

El valor de la COV está dentro de los valores óptimos de carga para que el proceso no se inhiba ni haya materia no degradada en la descarga del digestor a través del efluente.

5.4.8 Volumen de digestor.

El propio digestor llevará incluido el tanque de almacenamiento de biogás, por lo que se sumará al volumen del digestor, el volumen de la cúpula donde se irá almacenando y extrayendo el biogás producido.

5.4.8.1 Volumen tanque de digestión.

El volumen del digestor se calcula como la carga diaria por los días de retención.

$$V_{util \text{ digestor}} = \text{Carga diaria} \left(\frac{m^3}{día} \right) \cdot TRH = 391,40 \frac{m^3}{día} \cdot 25 \text{ días} = 9.785 m^3$$

Como el tamaño de digestor para la cantidad de materia prima tratada se excede, se dividirá en cuatro digestores de volumen:

$$9.785 \text{ m}^3 : 4 \text{ digestores} = 2.446,25 \frac{\text{m}^3}{\text{digestor}}$$

A este volumen se le debe de aplicar un volumen de seguridad del 20%:

$$V_{def.} = V_{\text{útil digestor}} + V_{\text{seguridad}} = V_{\text{útil digestor}} \cdot 1,2$$

$$V_{def.} = 2.446,25 \cdot 1,2 = 2.935,50 \text{ m}^3 \simeq 2.936 \text{ m}^3$$

Cada digestor tendrá un volumen total de 2.936 m³.

5.4.8.2 Volumen del tanque de almacenamiento de biogás.

Contando con que la producción de biogás no es instantánea, y que será tratado de manera constante, es decir, el biogás se ira almacenando pero al mismo tiempo se ira extrayendo, el tanque de almacenamiento de biogás debe de ser dimensionado de forma que sea capaz de almacenar, al menos, el 25% de la cantidad producida diariamente (**3**). La cantidad diaria de biogás calculada en el apartado 5.4.2 se dividirá en 4 digestores. Se le aplicará el 25 % para calcular los metros cúbicos de tanque de almacenamiento a cada uno de ellos:

$$V_{\text{tanque almacenamiento biogás}} = 8.350,91 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \cdot 0,25 = 2.087,73 \text{ m}^3 \simeq 2088 \text{ m}^3$$

$$2088 \text{ m}^3 : 4 \text{ digestores} = 522 \text{ m}^3$$

Cada digestor contará con una cúpula de almacenamiento de biogás de 522 m³.

5.4.8.2.1 Dimensiones totales del digestor

Partiremos de que la unidad de digestión contará con una altura de 6 metros:

- Cilindro.

$$V_{\text{digestor}} = \pi \cdot R^2 \cdot H$$

$$2.936 = \pi \cdot R^2 \cdot 6$$

$$R = 12,48 \text{ m}$$

$$\varnothing = 12,48 \cdot 2 = 24,96 \simeq 25 \text{ m}$$

$$H = 6 \text{ m}$$

La cúpula, tendrá un radio igual al del cilindro del tanque de digestión, por lo que se calculará partiendo de este dato.

- Cúpula.

$$V_{alm.biogás} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h$$

$$522 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 12,48^2 \cdot h$$

$$h = 1,595 \simeq 1,60 \text{ m}$$

5.4.9 Tanque de almacenamiento de digestato.

Partiendo del dato de digestato obtenido, calculado en el apartado 5.4.3, y conociendo la densidad del residuo, cuyo valor es 0,8 t/m³ **(3)**, se obtiene el volumen del tanque de almacenamiento de digestato:

$$303.10 \frac{\text{t digestato}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{0,8 \text{ t}} = 378,88 \text{ m}^3 \simeq 379 \text{ m}^3$$

El almacenamiento se realizará para una media de 10 días, siendo el total del tanque de almacenamiento de 3.790 m³.

5.4.10 Tabla resumen del dimensionamiento de la planta

A continuación, en la siguiente tabla se muestran los datos calculados en los apartados anteriores, a modo de síntesis. El dimensionamiento de la planta tendrá las siguientes características:

Tabla 5.8: Tabla resumen del dimensionamiento de la planta.

Cantidad de residuo de alimentación diario	$313,12 \frac{t \text{ estiércol}}{\text{día}}$
Cantidad de biogás producido diariamente	$8.350,91 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$
Dimensión tanque de alimentación	$940 m^3$
Temperatura de trabajo	$35 ^\circ C$
Energía térmica requerida en el digestor	$405,13 kW$
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	25 días
Carga orgánica volumétrica (COV)	$2,56 \frac{kg SV}{m^3 día}$
Volumen de digestor:	
-Tanque de digestión	$4 x 2.936 m^3$
-Tanque de almacenamiento de biogás	$4 x 522 m^3$
-TOTAL POR DIGESTOR	$3.458 m^3$
Volumen tanque de almacenamiento de digestato	$379 m^3 x 10 días = 3.790 m^3$

5.5 PRODUCTOS FINALES DEL PROCESO

5.5.1 Biometano

5.5.1.1 Acondicionamiento de biogás.

El proceso de acondicionamiento de biogás depende del uso final que se le vaya a dar. La siguiente tabla muestra que tipo de acondicionamiento será necesario en función de su uso:

Tabla 5.9: Tipos de acondicionamiento según uso.

	H ₂ S	CO ₂	Agua	Siloxanos	Compuestos halogenados
Caldera de vapor	✓	✗	✗	✓✓	✗
Motores de cogeneración	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
Microturbinas	✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
Producción de H ₂ /Metanol	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
Combustible para vehículos	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Inyección en la red de gas natural	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
✗ Eliminación no necesaria ✓ Eliminación recomendable ✓✓ Eliminación necesaria					

Se requiere el acondicionamiento total del biogás debido a que el uso que se le dará será como gas de inyección en la red gasista y uso vehicular.

5.5.1.2 Enriquecimiento de biogás

Una vez obtenido y acondicionado el biogás, pasa a ser tratado para su conversión en biometano. La tecnología elegida para la obtención de este, es la tecnología de membranas con las siguientes características:

Tabla 5.10: Características de la tecnología de membranas. (16)

Pureza biometano (%)	> 97
Disponibilidad (%)	95-96
Pérdidas de metano CH ₄ (%)	<0,5-1
Consumo energético (kWh/m ³ biogás)	0,20-0,40
Necesidad de pretratamiento	Reducción de H ₂ S, COVs y siloxanos
Flujo de CO ₂	De gran pureza
Eficiencia del sistema	>99

- Bajas pérdidas de metano en el off gas, <1%

5.5.1.3 Cantidad de biometano obtenido

Como se ha calculado previamente en el capítulo 5.4.2, la generación de biogás a la hora es de 347,95 m³. Sabiendo que el biogás generado tiene un porcentaje del 60,9 % en metano, la cantidad de este en el caudal de entrada del sistema de upgrading será de:

$$347,95 \frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{h} \cdot \frac{60,9}{100} = 211,90 \frac{\text{m}^3 \text{biometano}}{h}$$

Además, conociendo que la eficiencia del sistema es del 99%, el gas obtenido en el sistema de enriquecimiento tendrá una cantidad de biometano de:

$$211,90 \frac{\text{m}^3 \text{biometano}}{h} \cdot \frac{99}{100} = 209,78 \frac{\text{m}^3 \text{biometano}}{h}$$

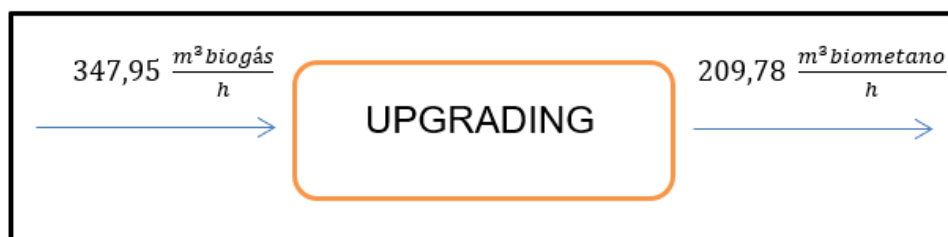


Figura 5.4: Flujos de entrada y salida en el upgrading.

La cantidad anual de biometano sería:

$$209,78 \frac{\text{m}^3 \text{biometano}}{h} \cdot \frac{24 h}{1 \text{ día}} \cdot \frac{347 \text{ días operativos}}{\text{año}} = 1.747.047,84 \frac{\text{m}^3 \text{biometano}}{\text{año}}$$

5.5.1.4 Cantidad de energía obtenida

La cantidad de energía obtenida a partir del biometano se puede calcular mediante la cantidad de metros cúbicos obtenidos anualmente (calculados en el apartado anterior) y el Poder Calorífico Superior (PCS) de dicho metano.

Sabiendo que el PCS del metano son 11,06 kWh/m³CH₄:

$$1.747.047,84 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} \cdot 11,06 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{CH}_4} = 19.322.349,11 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} = 19.322,35 \frac{\text{MWh}}{\text{año}}$$

5.5.2 Digestato como fertilizante

El digestato, es secado y peletizado para su uso como fertilizante. La cantidad generada es de aproximadamente 303,10 toneladas diarias. Este digestato sin tratamiento, tiene una cantidad de materia seca del 10%, por lo que una vez secado y peletizado, se obtendrá la siguiente cantidad anual, contando con un porcentaje de horas de funcionamiento de la planta del 95% (347 días):

$$303.098 \frac{\text{kg digestato}}{\text{día}} \cdot \frac{10}{100} = 30.309,85 \frac{\text{kg fertilizante}}{\text{día}}$$

$$30.309,85 \frac{\text{kg fertilizante}}{\text{día}} \cdot \frac{347 \text{ días}}{\text{año}} = 10.517.517,95 \frac{\text{kg fertilizante}}{\text{año}} = 10.517,52 \frac{\text{t}}{\text{año}}$$

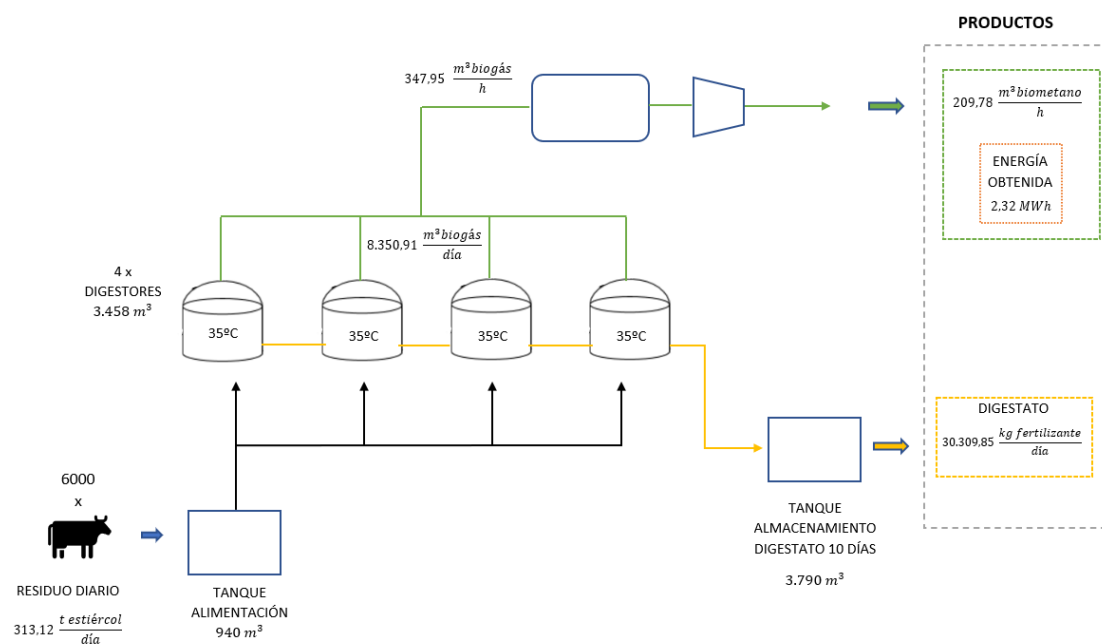


Figura 5.5: Esquema resumen dimensionamiento y productos de la planta

5.6 JUSTIFICACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL DE LA PLANTA

5.6.1 Energía cubierta

Los posibles usos del biometano adoptados en el caso de estudio para el aprovechamiento energético, serán inyectar el biometano obtenido en la red gasista o su uso como combustible en vehículos de gas.

Al igual que en el punto 5.3.1.4 en el que se calcula la cantidad de viviendas y vehículos que se podrían abastecer con la energía obtenida del recurso total autonómico, se calcula la cantidad de viviendas y vehículos equivalentes que se podrían abastecer con la planta estudio:

- Viviendas:

Sabiendo que la media de consumo de una vivienda en España ronda aproximadamente los 9.922 kWh (20). Con este dato y los kWh generados en la planta, sería posible alimentar el siguiente número de viviendas:

$$19,32 \frac{GWh}{año} \cdot \frac{1 vivienda}{9,922 \cdot 10^{-3} GWh} = 1.947,18 \approx 1947 viviendas$$

- Autobuses urbanos:

Partiendo de los kilómetros medios calculados en el apartado 5.3.1.4 y con la cantidad de biometano consumido por día y autobús para esa distancia, la planta podría cubrir la demanda de combustible de una flota de 61 autobuses.

$$5.034,72 \frac{m^3 biometano}{día} : 82,08 \frac{m^3 de biometano}{día/autobús} = 61,34 \approx 61 autobuses$$

5.6.2 Ahorro de emisiones CO₂

Se calcula el ahorro de emisiones igual que en el capítulo 5.3.1.5, pero referente al dimensionamiento y energía obtenida en la planta.

A partir de la energía primaria obtenida y sabiendo que el factor de ahorro de emisiones del residuo es de 278 g CO₂ el kWh (16), se podrían ahorrar 5.371,61 toneladas de emisiones anuales:

$$19.322.349,11 \frac{kWh}{año} \cdot 278 \frac{g CO_2}{kWh} \cdot \frac{1 t CO_2}{1.000.000 g CO_2} = 5.371,61 \frac{t CO_2}{año}$$

- Viviendas:

Conociendo que la emisión de CO₂ del gas natural es de 0,182 kg CO₂ por kWh_{PCS} (24), el ahorro en emisiones para los mismos metros cúbicos generados de biometano sería:

$$1.747.047,84 \frac{m^3 CH_4}{año} \cdot 11,98 \frac{kWh}{m^3} = 20929633,12 \frac{kWh}{año}$$

$$0,182 \frac{kg CO_2}{kWh} \cdot 20929633,12 \frac{kWh}{año} = 3809193,23 \frac{kg CO_2}{año} = 3.809,19 \frac{t CO_2}{año}$$

- Autobuses urbanos:

Los autobuses urbanos tienen un factor de emisión de CO₂ aproximadamente de 49,4 gramos por pasajero y kilómetro **(25)**. Suponiendo una ocupación de 54 plazas por autobús y 144 km diarios, los 61 autobuses que se podrían abastecer con la producción de biometano, si estos operaran con combustible convencional emitirían aproximadamente un total de 8.549,76 toneladas anuales:

$$49,4 \frac{g CO_2}{pasaj/km} \cdot 54 \frac{pasaj}{autobús} \cdot 144 \frac{km}{día} = 384.134,4 \frac{g CO_2}{día/autobús} = 0,384 \frac{t CO_2}{día/autobús}$$

$$0,384 \frac{t CO_2}{día/autobús} \cdot 365 \frac{días}{año} \cdot 61 autobuses = 8.549,76 \frac{t CO_2}{año}$$

En resumen, la cantidad de toneladas generadas para cada alternativa serían las de la siguiente tabla:

Tabla 5.11: Resumen de ahorro de emisiones de CO₂ para las diferentes alternativas

AHORRO DE EMISIÓNES DE CO ₂ (t/año)	
Por inyección en red de gas natural para viviendas	9.180,80
Por uso como combustible vehicular	13.921,37

Con la gestión y aprovechamiento del residuo de la planta, el ahorro de emisiones de CO₂ sería en el caso de inyección a la red de gas natural de 9.180,80 toneladas CO₂ al año y en el caso del uso como combustible vehicular 13.921,37. Estos datos supondrían una reducción del 0,175 % en el caso de inyección y del 0,266 % para el caso de uso vehicular.

5.7 ESTUDIO VIABILIDAD ECONÓMICA.

El estudio económico, se realiza con referencia en base a cálculos realizados mediante la aplicación Smallbiogas (16) (aplicación web cofinanciada por la Unión Europea) y mediante datos obtenidos del parque de biometanización de Valdemingómez de Madrid **(19)**.

5.7.1 Inversión:

Los valores de inversión incluyen por un lado todo el equipamiento de la planta de digestión en la que se produce el biogás y por otro, el sistema de valorización de este para su conversión en biometano. Estos valores son sacados del programa Smallbiogás, el cual los calcula a partir de funciones. La función utilizada es de tipo potencial en ambos casos:

$$y = a \cdot x^b$$

Donde la función toma como x:

En la “Planta de biogás”, las toneladas de materia fresca procesada anualmente.

En el “Sistema de valorización de biogás”, el caudal de biometano que produce el purificador.

El coste de la inversión de la planta de digestión para un total de 108.652,48 toneladas de materia fresca procesadas anualmente será de 2.620.628,57 €.

El coste del sistema de valorización para un caudal de biometano producido de 209,78 metros cúbicos de metano a la hora es de 739.210,07 €.

El total de la inversión asciende a 3.359.838,64 € (16).

Para cerciorarnos de que el costo de inversión dado por el programa tiene sentido, se realiza la comparación con el coste de inversión de una planta de tamaño similar. Esta planta situada en Tarragona, produce 375 m³/h de biometano y su inversión es de aproximadamente 5.000.000 de euros (25).

5.7.2 Análisis de costes:

El análisis de costes tomará como referencia, los datos prácticos de la planta de biometanización del Parque Tecnológico de Valdemingómez. Se calcularán por una parte los costes asociados a la producción de biogás y posteriormente, los asociados a la generación y gestión del biometano.

- Coste de producción de biogás:

Los costes de producción de biogás se dividirán en costes fijos y costes variables y además, se le sumarán unos costes asociados en relación al tratamiento posterior de ese biogás

en referencia a su acondicionamiento y disminución del H₂S y a la producción del digestato y su rechazo.

Los gastos se calcularán en base a un porcentaje sobre el coste total de producción. Sabiendo que el coste total de producción de biogás ronda los 0,29 €/Nm³ **(19)**, por lo tanto:

$$8.350,91 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \cdot \frac{347 \text{ días operativos}}{\text{año}} = 2.897.765,77 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{año}}$$

Tabla 5.12: Costes anuales en la planta de producción de biogás.

COSTE TOTAL DE PRODUCCIÓN 40€/MWh – 0,29 €/m ³		840.352,07
Costes fijos (35%)		294.123,23
	Coste de personal 70%	205.886,26
	Otros costes 30 %	88.236,97
Costes variables (65%)		546.228,85
	Costes de mantenimiento de equipos 35%	191.180,10
	Costes energía eléctrica 30%	163.868,66
	Costes de gestión de rechazos 35%	191.180,10

Tabla 5.13: Costes asociados una vez producido el biogás.

Costes asociados		
	Acondicionamiento biogás 0,018 €/m ³	52.159,78
	Producción de digestato 0,03 €/m ³	86.932,97
	Producción de rechazo 0.012 €/m ³	34.773,19
TOTAL:		173.865,94

Los datos porcentuales indicados en las tablas anteriores han sido obtenidos del informe práctico de la planta de Valdemingómez **(19)**.

El coste total de la producción anual de biogás será de 1.014.218,01 de euros.

$$840.352,07 + 173.865,94 = 1.014.218,01 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- Coste de generación y gestión del biometano:

Los costes de generación y gestión del biometano, se dividirán en costes fijos y costes variables. El coste neto aproximado de generación de 1 MWh de biometano es de aproximadamente 11€ (19), por lo tanto, el coste de generación teniendo en cuenta los MWh de la planta estudio será el siguiente:

$$19.322,35 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 11 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 212.545,85 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 5.14: Costes en la generación del biometano.

COSTE TOTAL DE GENERACIÓN DE BIOMETANO 11 €/MWh		212.545,85
Costes fijos (30%)		63.763,76
	Coste de personal 60%	38.258,25
	Mantenimiento de equipo 20%	42.509,17
Costes variables (70%)	Energía eléctrica 20%	42.509,17
		148.782,10
	Costes energía 42%	62.488,48
	Mantenimiento equipos 25%	37.195,53
	Suministros y consumibles 23%	34.219,88
	Gestión de rechazos y residuos 10%	14.878,21

Los datos porcentuales indicados en la tabla anterior han sido obtenidos del informe práctico de la planta de Valdemingómez (19).

En conclusión, el coste total de la producción de biogás y su posterior transformación en biometano es de:

$$1.014.218,01 + 212.545,85 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 1.226.763,86 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

5.7.3 Análisis de ingresos:

La mayor parte de los ingresos obtenidos procederán por una parte, de la venta del digestato obtenido con la producción de biogás, y por otra, de la venta del biometano. Por la venta de biometano se estudiarán dos posibles usos y vías de ingreso. Se analizarán dos opciones de uso final, la venta para su inyección en la red gasista y la venta como uso vehicular. Además, se obtendrá un ingreso por la gestión de tonelada de residuo recogida. Se analizará cuál de las dos opciones dará una mayor rentabilidad.

- Venta de digestato:

Según un documento del instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), entidad pública, adscrita al ministerio de Industria, Turismo y Comercio, el fertilizante en pellets puede ser vendido a unos 40 € la tonelada aproximadamente. Suponiendo entonces, su venta a este precio se obtiene por el digestato:

$$3.506,07 \frac{t}{año} \cdot 40 \frac{€}{t} = 140.242,80 \frac{€}{año}$$

- Venta del biometano:

▪ OPCIÓN 1: INYECCION EN LA RED DE GAS NATURAL

Sabiendo que el precio de venta del biometano para inyección en la red de gas natural es de 0,341 €/m³ (20), los ingresos anuales serían:

$$1.747.047,84 \frac{m^3 \text{ biometano}}{año} \cdot 0.341 \frac{€}{m^3} = 595.743,31 \frac{€}{año}$$

▪ OPCIÓN 2: COMBUSTIBLE USO VEHICULAR

Sabiendo que el precio de venta del biometano como combustible vehicular, es de 0,577 €/m³ (20), los ingresos anuales si la planta se dedicase a este uso, sería:

$$1.747.047,84 \frac{m^3 \text{ biometano}}{año} \cdot 0.577 \frac{€}{m^3} = 1.008.046,60 \frac{€}{año}$$

- Ingreso por recogida y gestión del residuo

Para fijar el precio de la tonelada de residuo recogida, se estudia el coste que supondría al dueño de la explotación ganadera deshacerse de una tonelada de residuo para poder establecer un precio competitivo. Para ello, se parte de los siguientes datos orientativos contrastados (31):

Tabla 5.15: Costes asociados a la gestión del residuo.

Toneladas por viaje de tractor	15 t/viaje
Precio del gasoil para tractores	1,64 €/litro
Consumo de tractores	15 l/100 km
Distancia media del recorrido para regar (ida y vuelta)	20 km/viaje
Media de horas empleadas para regar	5 h/viaje
Precio de mano de obra	12 €/h
Amortización del tractor	0,5 €/viaje

- Consumo de gasoil por viaje:

$$20 \frac{\text{km}}{\text{viaje}} \cdot 15 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} = 3 \frac{\text{l}}{\text{viaje}}$$

- Coste de la gasolina por viaje:

$$3 \frac{\text{l}}{\text{viaje}} \cdot 1,64 \frac{\text{€}}{\text{l}} = 4,92 \frac{\text{€}}{\text{viaje}}$$

- Coste de mano de obra en un viaje:

$$\frac{5 \text{ h}}{\text{viaje}} \cdot 12 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 60 \frac{\text{€}}{\text{viaje}}$$

El coste total de la gestión de una tonelada de residuo para el dueño de la explotación ganadera será de unos 4,36 euros aproximadamente.

$$4,92 + 60 + 0,5 = 65,92 \frac{\text{€}}{\text{viaje}}$$

$$65,92 \frac{\text{€}}{\text{viaje}} \cdot \frac{1 \text{ viaje}}{15 \text{ t}} = 4,36 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

Se establecerá entonces, una tarifa por recogida de residuo de 2,5 euros la tonelada y los ingresos serán de:

$$108.652,48 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{€}}{\text{t}} = 271.631 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Tabla 5.16: Ingresos obtenidos en la planta.

Venta de digestato	420.700,80
Venta de biometano	
OPCION 1: Inyección en la red	595.743,31
OPCION 1: Uso vehicular (BMC)	1.008.046,60
Gestión del residuo	271.631,20
<u>TOTAL INGRESOS OPCIÓN 1</u>	1.288.075,31
<u>TOTAL INGRESOS OPCIÓN 2</u>	1.700.378,60

5.7.4 Análisis de rentabilidad

Para el análisis de rentabilidad del proyecto se analizarán los parámetros de flujo de caja, Pay-Back, VAN (Valor Actual Neto) y el TIR (Tasa Interna de Retorno).

Se supondrán los ingresos constantes y se estudiará para un periodo de 15 años que corresponderán con la vida útil del proyecto.

5.7.4.1 Flujo de caja

El flujo de caja hace referencia a las entradas y salidas de dinero que se dan en la empresa. Es importante conocer este indicador para saber la solvencia y el dinero neto líquido que genera la empresa. El proyecto anualmente generaría los siguientes flujos de caja para las alternativas estudiadas.

- Opción 1: Inyección en la red

$$\text{Flujo de caja} = \text{Ingresos} - \text{Gastos} = 1.288.075,31 - 1.226.763,86 = 61.311,45 \text{ €}$$

- Opción 2: Uso vehicular (BMC)

$$\text{Flujo de caja} = \text{Ingresos} - \text{Gastos} = 1.700.378,60 - 1.226.763,86 = 473.614,74 \text{ €}$$

Los flujos de caja de las dos opciones son positivos por lo que a continuación, se estudiarán el resto de índices económicos para analizar su rentabilidad.

5.7.4.2 Pay-Back

El Pay-Back o periodo de retorno, representa los años necesarios para la recuperación de la inversión. Es un indicador importante de cara a que la inversión deberá recuperarse lo antes posible y no superar los años de vida útil del proyecto. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Pay} - \text{Back} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ingresos} - \text{Gastos}}$$

- Opción 1: Inyección en la red

$$\text{Pay} - \text{Back} = \frac{3.359.838,64}{1.288.075,31 - 1.226.763,86} = 54,79$$

En el caso de destinar el biometano a su inyección a la red gasista, el tiempo de recuperación de inversión serían de casi 55 años, por lo que, al estimar una vida útil de la planta de unos 15 años, no saldría rentable. Habría que reinvertir en ella antes de haber recuperado la primera inversión.

- Opción 2: Uso vehicular (BMC)

$$\text{Pay} - \text{Back} = \frac{3.359.838,64}{1.700.378,60 - 1.226.763,86} = 7,09$$

Al contrario que la opción de inyectar el biometano a la red gasista, la opción de usarlo como biometano comprimido para uso vehicular si parece dar rentabilidad al proyecto ya que supondría su recuperación antes de la finalización del periodo de vida útil.

5.7.4.3 Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto es el valor de los flujos de caja esperados a lo largo de la vida útil del proyecto y actualizados al momento de inicio de este. Para este tipo de proyecto se supondrán 15 años de vida útil (n) y un coeficiente de descuento (t) de 5,90 % (16). Para que un proyecto sea rentable, el VAN deberá de ser positivo.

La fórmula a utilizar para calcular el van será:

$$VAN = -Inversión + \sum_{t=1}^n \frac{FlujosCaja}{(1+t)^n}$$

5.7.4.4 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa de descuento para la cual el VAN sería igual a cero. Este indicador está directamente vinculado con el VAN y juntos son los más útiles para valorar la aceptación o no de un proyecto de inversión. La tasa interna de retorno deberá ser superior al coeficiente de descuento para la aceptación del proyecto.

Como se aprecia en las siguientes tablas, la primera opción da un VAN negativo, por lo que se desecha esa opción. La segunda opción tiene un VAN positivo de 1.270.230,63 € y un TIR del 11%, superior al coeficiente de descuento que es de 5,90%.

Tabla 5.17: Datos para el cálculo del VAN y TIR.

Coeficiente de descuento (t)	5,90 %
Vida útil del proyecto (n)	15

Tabla 5.18: Cálculo del VAN y TIR para la opción 1.

AÑO	INVERSIÓN	COSTE ANUAL	INGRESO ANUAL	FLUJO CAJA
0	3.359.838,64	0,00	0,00	-3.359.838,64
1	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
2	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
3	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
4	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
5	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
6	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
7	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
8	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
9	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
10	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
11	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
12	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
13	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
14	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
15	-	1.226.763,86	1.288.075,31	61.311,45
VAN:				-2.760.456,41 €
TIR:				-13%

Tabla 5.19: Cálculo del VAN y TIR para la opción 2.

AÑO	INVERSIÓN	COSTE ANUAL	INGRESO ANUAL	FLUJO CAJA
0	3359838,64	0,00	0,00	-3359838,64
1	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
2	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
3	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
4	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
5	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
6	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
7	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
8	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
9	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
10	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
11	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
12	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
13	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
14	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
15	-	1226763,86	1.700.378,60	473614,74
VAN:				1.270.230,63 €
TIR:				11%

6 CONCLUSIONES.

El coste de producción de biometano para inyección en la red y para uso vehicular es similar. La diferencia en su rentabilidad para producciones cuyo origen es la monodigestión de un único sustrato y producciones bajas, por debajo de los 500 m³/h, radica en que el precio de venta a la red gasista es bastante menor que el precio de venta del biometano comprimido para el uso vehicular. Como se menciona anteriormente, el precio de venta del biometano a la red gasista es de aproximadamente 0,341 €/m³ y el precio del biometano comprimido para uso vehicular de 0,577 €/m³. Este margen de diferencia es el que deriva en que una opción sea rentable y la otra no.

Una de las posibles soluciones para poder dotar de rentabilidad la inyección en la red gasista y una mayor rentabilidad para el uso vehicular, sería la co-digestión de diferentes residuos alcanzando unas condiciones óptimas de producción de biogás y aumentando así su factor de producción por metro cúbico de residuo. Esto aumentaría la cantidad de recurso obtenido por menor cantidad de residuo y disminuiría los costes de inversión y operativos de la planta, obteniendo así un mayor margen de beneficio. En el siguiente gráfico, se puede apreciar que el margen de beneficio aumentaría a mayor caudal de biogás tratado.

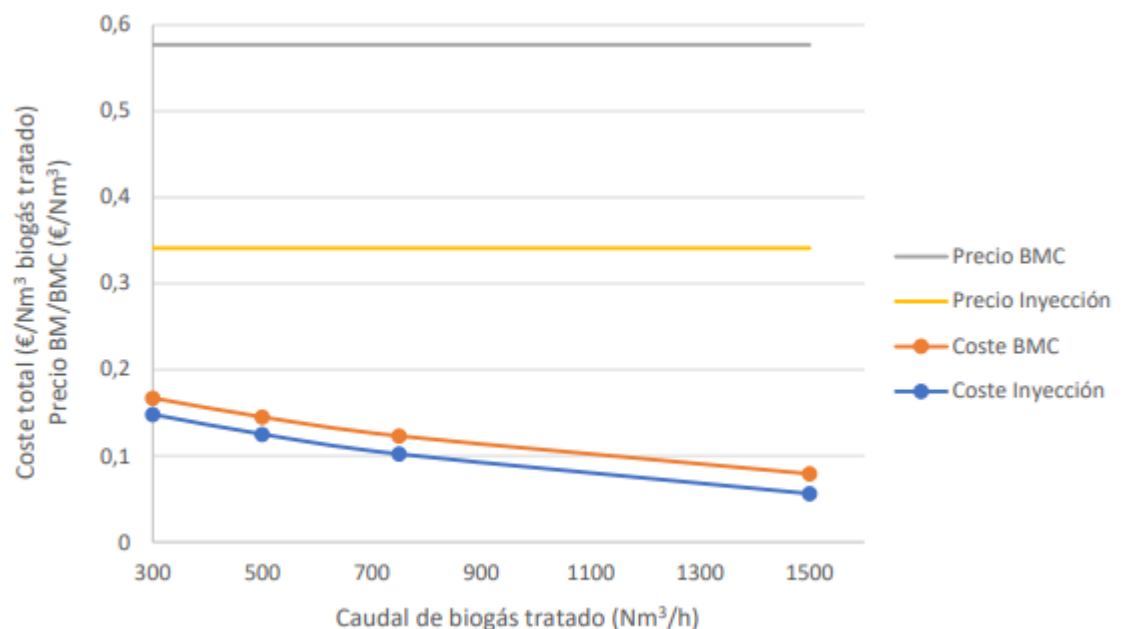


Figura 6.1: Costes en función del caudal de biogás tratado (30)

Además, a parte de los inconvenientes encontrados en la rentabilidad de la planta por sus características de tratamiento y dimensionamiento, a esta alternativa de energía le quedaría por resolver inconvenientes de carácter político como pueden ser:

- Insuficientes incentivos fiscales.
- Normativa europea estandarizada para la calidad del gas inyectado.
- Falta de cooperación transfronteriza.
- Insuficiencia de infraestructuras para el repostaje de GNC y GNL.
- Falta de reconocimiento del recurso.

Adoptando las soluciones a los posibles inconvenientes encontrados, esta fuente de obtención de energía sería una muy buena oportunidad de futuro para contribuir con los objetivos contra el cambio climático, dotar a la comunidad autónoma de Cantabria de una mayor autonomía en la producción de energía, reduciendo su importación y favoreciendo su economía circular.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. **GONZALEZ, Guillermo.** *<https://sites.google.com/site/plantrabajocantabria/los-climas-de-cantabria>. Los climas de Cantabria. [En línea] Google Sites.*
2. **Gobierno de Cantabria.** Instituto Cántabro de Estadística. [En línea] 13 de Mayo de 2022. <https://www.icane.es/data/cattle-exploitation-municipal/results>.
3. **MONCAYO ROMERO, Gabriel.** *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. s.l. : Aqualimpia Engineering, 2013. 9789942017192.*
4. **España.** Decreto 15/2010, de 4 de marzo, por el que se aprueban los Planes Sectoriales de Residuos que desarrollan el Plan de Residuos de Cantabria 2006-2010. Boletín Oficial de Cantabria. 8 de abril de 2010. Núm. 66 .
5. **PASCUAL, Andres, y otros.** *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020. IDAE. Madrid : s.n., 2011.*
6. **demográfico, Ministerio para la transición ecológica y el reto.** *EMISIONES DE GEI POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS A PARTIR DEL INVENTARIO ESPAÑOL – SERIE 1990-2020.*
7. **España.** Decreto 32/2018, de 12 de abril, por el que se aprueba la Estrategia de Acción frente al Cambio Climático de Cantabria 2018-2030. Boletín Oficial de Cantabria. 20 de abril de 2018. núm 78.
8. **DEUBLEIN, Dieter y STEINHAUSER, Angelika.** *Biogas from Waste and Renewable Resources. s.l. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, , 2008. 9783527318414.*
9. **Giraldo-Gomez, Pavlostathis y.** 1991.
10. **VARNERO, María Teresa.** *Manual de biogás. s.l. : Ministerio de energía, Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility, 2011. 978953068920.*
11. **Energía, Agencia Andaluza de la.** *Estudio básico del biogás. s.l. : Consejería de economía, innovación y ciencia, Septiembre 2011.*
12. **HILBERT, Jorge A.** *Manual para la producción de biogás. s.l. : Instituto de Ingeniería Rural.*
13. **Perspectivas de futuros desarrollos e iniciativas en la gestión y tratamiento de purines. Flotats, X. s.l. : RETEMA, Revista técnica de medio ambiente, 2000, Vols. Marzo-Abril.**
14. **Ficha técnica del metano . s.l. : Messer Ibérica de Gases S.A.**
15. **HIDALGO , Dolores.** *Producción de biometano. s.l. : Centro Tecnológico CARTIF.*
16. **Digestato como fertilizante. Biogás, Fachverband.**
17. **Fenosa, Gas Natural.** *El biogás y su inyección a la red. s.l. : Gas Natural Fenosa, 29 de Octubre de 2015.*
18. **Bioenergy, Genia.** *CH4 Upgrading.*

19. **ENAGÁS. ENAGÁS.** [En línea]
https://www.enagas.es/enagas/es/Gestion_Tecnica_Sistema/Seguimiento_del_Sistema_Gasis ta/Normas_de_Gestion_Tecnica.
20. **Esri. ArcGis.** [En línea]
<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?find=Escalante%2C%20Cantabria>.
21. **Smallbiogás. Smallbiogás.** [En línea] Co-funded by the intelligent Energy Europe Programme of the European Union. <https://smallbiogas.biogas3.eu/Acceso.aspx>.
22. **(IDAE), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.** Consumos del sector residencial en España.
23. **Energías renovables .** [En línea] Abril de 2017. <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/el-autobus-de-biometano-de-pamplona-sigue-20170424?adlt=strict&toWww=1&redig=4085D3E5E88B48D695DE25936D0BB834>.
24. **ATUC. ATUC.** [En línea] <https://www.atuc.es/sites/default/files/comunicados/18-1-16npvelocidadcomercial.pdf#:~:text=De%20media%2C%20los%20autobuses%20circulan%20por%20ciudad%20a,espera%20de%20media%20entre%205%20y%2015%20minutos.?adlt=strict&toWww=1&redig=B6335F7336334BBCBCC311F>.
25. **demográfico, Ministerio para la transición ecológica y el reto. REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO, COMPENSACIÓN Y PROYECTOS DE ABSORCIÓN .** 2022.
26. **IDAE. IDAE .** [En línea] https://sede.idae.gob.es/lang/extras/tramites-servicios/2021/MOVES_Proyectos_Singulares_II/Factores_de_conversion_ahorros_y_emisiones_de_CO2.pdf?adlt=strict&toWww=1&redig=E56F9D74F35048A2931F22E628FC6B99.
27. **Cantabria, Meteo. Estadísticas metereológicas.** [En línea]
<https://www.meteocantabria.es/meteocantabria/historico/view-estadistica>.
28. **Parque Tecnológico Valdemingomez, Ayuntamiento de Madrid.** Producción de biometano e inyección en la red de gas natural . 2018.
29. **economista, El. El economista .** [En línea]
<https://www.eleconomista.es/energia/noticias/9228268/06/18/La-primera-planta-industrial-de-biometano-comprimido-en-Espana-arrancara-en-2019.html>.
30. **Biometrans.** Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa. s.l. : CYTED Ciencia y Tecnología para el desarrollo , Junio 2018.
31. **Aragón, Gobierno de.** Evaluación de costes de sistemas y equipos de aplicación de purín. s.l. : Dirección general de desarrollo rural , 2007.
32. **Tierras de Castilla y León. Ganadería.** Proyecto Life Es-Wamar. MORENO, Begoña, DAUDÉN, Arturo y FERNANDEZ, Marta Teresa. 2011. 18890784.

33. Gas Renewable. *[En línea]* <https://www.gasrenovable.org/faqs/>.