



APESA

Révélateur de solutions durables

Estado de la técnica en Pico y Micrometanización

Interreg
POCTEFA
ORHI



UNIÓN EUROPEA
UNION EUROPÉENNE

INFORME FINAL

FECHA: MARZO 2021

PROYECTO ORHI: CÓDIGO
4908



REDACTORES: CHRISTINE PEYRELASSE, MARIE GROS, FLORIAN MONLAU,
CAMILLE LAGNET

AGRADECIMIENTOS

El presente informe ha sido elaborado en el marco del proyecto europeo ORHI (<https://www.orhi-poctefa.eu/>), cofinanciado en un 65% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), que forma parte del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020). El POCTEFA tiene como objetivo reforzar la integración económica y social del espacio transfronterizo España-Francia-Andorra. Su ayuda se dirige al fomento de actividades económicas, sociales y medioambientales transfronterizas por medio de estrategias conjuntas que favorezcan el desarrollo sostenible del territorio

Dicho proyecto tiene como objetivo optimizar los flujos de materia orgánica y plástica dentro de la cadena de valor del sector agroalimentario. Una de sus partes se dedicó al estudio de la pico y micrometanización con el fin de valorizar la materia orgánica lo más cerca posible de su producción.

Este proyecto se inició en enero de 2018 y acaba a finales de marzo de 2021.

RESUMEN

La metanización se está imponiendo en el campo de las energías renovables como un procedimiento que viene a completar los modos de producción convencionales. Si bien la producción de biogás mediante metanización se utiliza desde hace tiempo por parte de los promotores de proyectos de gran capacidad, hoy en día es aplicable en pequeñas explotaciones, e incluso en hogares. Numerosos proveedores se están posicionando en este mercado.

En el presente informe sobre el estado de la técnica se recogen las tecnologías disponibles en el mercado para la metanización a pequeña escala: micrometanización (para una pequeña granja individual) y picometanización (adaptada a escala del hogar). Se presentan los proveedores, las características técnicas y operativas de los materiales comercializados (tipo y cantidad de insumos, pretratamientos, digestión, procesamiento del digestato y soluciones de valorización del biogás), así como los datos económicos disponibles. Asimismo, se especifica la cantidad de unidades en funcionamiento con el fin de valorar la madurez de estas tecnologías y su implementación, en Francia y en el mundo.

Abreviaturas

ATEX	ATmósfera EXplosiva
BioGNV	Gas Natural Vehicular de origen biológico
CIVE	Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (Cultivos energéticos)
COV	Carga Orgánica Volumétrica
EPDM	Etileno-propileno-dieno monómero
GAEC	Groupement Agricole d'Exploitation en Commun (asociación de agricultores)
GES	Gaz à Effet de Serre (Gas de efecto invernadero)
GNV	Gas Natural Vehicular
GPL	Gas de Petróleo Licuado
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (Instalación clasificada para la protección del Medio Ambiente)
MS	Materia Seca
MSV	Materia Seca Volátil
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Polietileno
PEHD	Polietileno de alta densidad
pH	Potencial Hidrógeno
PVC	Policloruro de vinilo
SARL	Société A Responsabilité Limitée (Sociedad de responsabilidad limitada)
SPAN	Sous-Produits Animaux (Subproductos Animales)
TRI	Tasa de Rentabilidad Interna
UGB	Unité Gros Bétail (Unidad de ganado mayor)
UV	Radiación Ultravioleta
VLCT	Valor Límite de Corta duración

Se aplicaron los siguientes tipos de cambio (valor al 01/07/2020):

Tipo de cambio	
1\$	0,89 €
1 rs (rupia india)	0,012 €

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	7
2	PRINCIPIO Y DEFINICIONES.....	7
2.1	PRESENTACIÓN DE LA METANIZACIÓN.....	7
2.1.1	<i>Principios generales.....</i>	7
2.1.2	<i>Aplicación e implementación.....</i>	8
2.1.3	<i>Valorización del biogás.....</i>	10
2.1.4	<i>Valorización del digestato.....</i>	11
2.2	MICROMETANIZACIÓN, PICOMETANIZACIÓN: DEFINICIONES	12
3	NORMATIVAS APLICABLES.....	13
4	PICOMETANIZACIÓN	16
4.1	PRESENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE PICOMETANIZACIÓN	16
4.1.1	<i>Homebiogas (Israel).....</i>	16
4.1.2	<i>MyGug (Irlanda).....</i>	19
4.1.3	<i>Puxin (China).....</i>	21
4.2	ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE UN BALANCE ECONÓMICO EN PICOMETANIZACIÓN.....	23
4.3	RESUMEN SINTÉTICO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE PICOMETANIZACIÓN	26
5	MICROMETANIZACIÓN: PRESENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS Y UNIDADES EXISTENTES.....	27
5.1	DIGESTIÓN DE BIORRESIDUOS	28
5.1.1	<i>EnWise (China).....</i>	28
5.1.2	<i>Bee & Co (Francia).....</i>	29
5.1.1	<i>SEaB Energy (Reino Unido).....</i>	32
5.1.1	<i>Tryon (Francia).....</i>	34
5.2	DIGESTIÓN DE PURINES COMO SUSTRATO BASE PRINCIPAL.....	35
5.2.1	<i>Bioelectric (Bélgica) / Agripower.....</i>	35
5.2.2	<i>Mcube (Francia).....</i>	38
5.2.3	<i>Nénufar (Francia).....</i>	39
5.2.4	<i>PlanET (Alemania).....</i>	42
5.3	DIGESTIÓN DE SUSTRATOS MIXTOS.....	43
5.3.1	<i>Agrikomp (Alemania).....</i>	43
5.3.2	<i>Enerpro Biogaz (Francia).....</i>	45
5.3.1	<i>Green2Gas (Francia).....</i>	48
5.3.1	<i>Host (Países Bajos).....</i>	49
5.3.2	<i>Ejemplo de digestores autoconstruidos.....</i>	51
5.4	RESUMEN SINTÉTICO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE MICROMETANIZACIÓN	52
6	GUÍA DE SELECCIÓN PARA PROCEDIMIENTOS DE MICROMETANIZACIÓN Y PICOMETANIZACIÓN	54
7	CONCLUSIÓN	56
8	BIBLIOGRAFÍA.....	57
9	ANEXOS	63

Lista de Figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DEL BALANCE GLOBAL DE LA REACCIÓN DE METANIZACIÓN.....	7
FIGURA 2. ESQUEMA DE LAS ETAPAS INTERMEDIAS DE LA REACCIÓN DE METANIZACIÓN.....	8
FIGURA 3. ORDEN DE MAGNITUD DEL POTENCIAL METANOGÉNICO DE LAS MATERIAS METANIZABLES (FUENTE: APESA).....	9
FIGURA 4. ESQUEMA RECAPITULATIVO DE LOS MODOS DE VALORIZACIÓN DEL BIOGÁS.....	10
FIGURA 5. REPRESENTACIÓN DE LA PICO Y MICROMETANIZACIÓN EN EL CAMPO DE LA METANIZACIÓN.....	13
FIGURA 6. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN HOMEBIOGAS [22].....	17
FIGURA 7. FOTO DEL DISPOSITIVO HOMEBIOGAS EN MAS BAZAN.....	17
FIGURA 8. FOTO DE UN DISPOSITIVO MYGUG DOMÉSTICO [25].....	20
FIGURA 9. FOTO DE UN DISPOSITIVO MYGUG PROFESIONAL [25].....	20
FIGURA 10. FOTO DEL DISPOSITIVO PUXIN EN EL JARDIN DE SANDRINE. FOTO APESA.....	22
FIGURA 11. ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LA CANTIDAD DE UNIDADES DE MICROMETANIZACIÓN EN EUROPA EN 2015 (GRÁFICA REALIZADA CON DATOS DE [9]).....	27
FIGURA 12. ESQUEMA DE PRINCIPIO DEL PROCEDIMIENTO OSCAR DE ENWISE [36].....	28
FIGURA 13. FOTO DE LA BIOBEEBOX® [39].....	30
FIGURA 14. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA BIOBEEBOX® [39].....	30
FIGURA 15. EJEMPLO DE DISEÑO MODULAR DE LA BIOBEEBOX® DE VITRY [39].....	31
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN FLEXIBUSTER™ [43].....	32
FIGURA 17. FOTO DEL SISTEMA FLEXIBUSTER™ INSTALADO EN LA PLANTA DE SEPUR [44].....	33
FIGURA 18. REPRESENTACIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE DIGESTIÓN SEGÚN EL PROCESO MODUL'O [47].....	34
FIGURA 19. REPRESENTACIÓN DE UNA PLANTA MODUL'O [47].....	34
FIGURA 20. UNIDAD DE METANIZACIÓN INSTALADA POR BIOELECTRIC [48].....	36
FIGURA 21. INSTALACIÓN BIOELECTRIC EN LA COOPERATIVA UNÉAL [50].....	36
FIGURA 22. INSTALACIÓN MCUBE (FUENTE: OVALIE INNOVATION).....	38
FIGURA 23. CUBIERTA NÉNUFAR [55].....	40
FIGURA 24. FOTO DE LA INSTALACIÓN NÉNUFAR EN LA UNIDAD MULTIPORC DE L'AIRE (GANADERÍA PORCINA, VALORIZACIÓN CALDERA). FUENTE NÉNUFAR.....	40
FIGURA 25. FOTO DE LA INSTALACIÓN PLANET EN LA SARL NOVALAIT [61].....	42
FIGURA 26. UNIDAD DE METANIZACIÓN AGRISELECT [65].....	44
FIGURA 27. FOTO DE LA INSTALACIÓN AGRIKOMP EN EL GAEC DE GROS CHÊNE.....	45
FIGURA 28. REPARTO DE LOS TONELAJES DE INSUMOS AGRIKOMP EN EL GAEC DE GROS CHÊNE.....	45
FIGURA 29. FOTO DEL PROCEDIMIENTO "COMPACT" DE ENERPRO BIOGAZ [66].....	46
FIGURA 30. FOTO DEL PROCEDIMIENTO ENERCUBE (FUENTE: ENERPRO).....	46
FIGURA 31. FOTO DEL ENERPENTE (FUENTE: ENERPRO).....	46
FIGURA 32. "SILO TOUR" ENERPRO BIOGAZ EN LA GRANJA DE BEL AIR.....	47
FIGURA 33. FOTO DE LA INSTALACIÓN EN EL GAEC DE TROIS COMMUNES [73].....	49
FIGURA 34. FOTO DE LA INSTALACIÓN EN EL GAEC DE BUISSONS [75].....	50
FIGURA 35. FOTO DE LA INSTALACIÓN EN EL GAEC DE BOIS JOLY [72].....	51
FIGURA 36. ÁRBOL DE SELECCIÓN PARA ESCOGER PROVEEDORES DE TECNOLOGÍAS DE MICRO Y PICOMETANIZACIÓN DEPENDIENDO DEL TIPO Y LA CANTIDAD DE SUSTRATO QUE PROCESAR.....	54
FIGURA 37. INVENTARIO DE PROVEEDORES DE PICO Y MICROMETANIZACIÓN DEPENDIENDO DE LA POTENCIA INSTALADA Y DEL CAUDAL DE BIOMETANO GENERADO. ADAPTADO DE [78].....	55

Lista de Tablas

TABLA 1. MARCO ICPE DE LAS UNIDADES DE METANIZACIÓN	13
TABLA 2. ESPECIFICACIONES DEL EPÍGRAFE 4310.....	14
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS SPAN Y REQUISITOS DE PRETRATAMIENTO [16][17].....	16
TABLA 4. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA HOME BIOGAS 2.0 [22], [23]	18
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS HOME BIOGAS [23].....	19
TABLA 6. PRODUCTOS ADICIONALES HOME BIOGAS [23]	19
TABLA 7. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MYGUG [25].....	20
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES PUXIN ABS	22
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIGESTORES HOME BIOGAS Y PUXIN ABS 3,4 m ³ SEGÚN INFORMACIÓN DE LOS PROVEEDORES	23
TABLA 10. CÁLCULOS DESGLOSADOS DE LA INVERSIÓN GLOBAL PARA AMBOS PICODIGESTORES (PRECIO DE LOS MATERIALES EN VENTA ONLINE).....	23
TABLA 11. CÁLCULOS DESGLOSADOS DE INGRESOS Y GASTOS ANUALES PARA 2 UNIDADES DE PICOMETANIZACIÓN ALIMENTADAS 300 D/AÑO.....	24
TABLA 12. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETORNO BRUTO DE LA INVERSIÓN PARA TRES PICODIGESTORES	24
TABLA 13. TABLA RESUMIDA DE LAS TECNOLOGÍAS DE PICOMETANIZACIÓN.....	26
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA ENWISE	29
TABLA 15: CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA [41].....	31
TABLA 16. PRESENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE SEAB ENERGY [45]	33
TABLA 17. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MODUL'O DE TRYON	35
TABLA 18. RETORNO DE EXPERIENCIA DE UNA INSTALACIÓN BIOELECTRIC EN OELEGEM [51].....	37
TABLA 19. CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA BIOELECTRIC	37
TABLA 20. CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA POR VÍA SECA – AGRIPOWER [49]	37
TABLA 21. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MCUBE.....	39
TABLA 22. EJEMPLOS DE EXPLOTACIONES EQUIPADAS CON CUBIERTA NÉNUFAR [55].....	41
TABLA 23. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA NÉNUFAR [57]	41
TABLA 24. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MÓDULOS VALENTIN [59].....	42
TABLA 25. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA VALENTIN DE PLANET	43
TABLA 26. INVENTARIO DE LAS SOLUCIONES DE COGENERACIÓN DE AGRIKOMP [63]. SÓLO SE PRESENTAN EJEMPLOS DE POTENCIA ≤ 100 kW.....	44
TABLA 27. PRESENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE MICROMETANIZACIÓN PROPUESTAS POR AGRIKOMP	45
TABLA 28. CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS ENERPRO BIOGAZ [67], [71].....	47
TABLA 29. CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA GREEN2GAS	49
TABLA 30. PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MICROFERM	50
TABLA 31. RECAPITULATIVO Y RETORNO DE EXPERIENCIA DE UNA INSTALACIÓN AUTOCONSTRUIDA EN AUSTRIA [76].....	51
TABLA 32. TABLA RESUMIDA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MICROMETANIZACIÓN	53

1 Introducción

La metanización se está imponiendo en el ámbito de las energías renovables como proceso complementario a los métodos de producción convencionales. Si bien la producción de biogás mediante metanización es utilizada desde hace mucho tiempo por los promotores de proyectos de gran capacidad, hoy en día resulta aplicable en pequeñas explotaciones, e incluso en el ámbito doméstico. Muchos proveedores se están posicionando en este mercado.

Este estado de la técnica pretende identificar las tecnologías disponibles en el mercado para la metanización a pequeña escala: micrometanización (para una pequeña explotación individual) y picometanización (adaptada a una escala doméstica). Presenta a los proveedores, las características técnicas y operativas de los equipos comercializados (tipo y cantidad de insumos, pretratamientos, digestión, procesamiento del digestato y soluciones de valorización del biogás) y los datos económicos disponibles. También se especifica el número de unidades en funcionamiento con el fin de valorar la madurez de estas tecnologías y su implantación en Francia y en el mundo.

El presente estudio se articula en torno a cinco ejes: la presentación del proceso de metanización, las limitaciones reglamentarias aplicables a las unidades de metanización y, a continuación, en la tercera y la cuarta parte, un inventario de los procesos de pico y micrometanización disponibles en el mercado. En la última parte se intentan resumir los datos obtenidos para proponer una guía de selección entre las tecnologías disponibles dependiendo de la naturaleza y la cantidad de desechos orgánicos a valorizar.

Aun no siendo exhaustivo, este estado de la técnica constituye un estudio de las tecnologías existentes, que atestigua el creciente interés de los pequeños productores de residuos por la metanización.

2 Principio y definiciones

2.1 Presentación de la metanización

2.1.1 Principios generales

La metanización es una "degradación anaerobia de la materia orgánica por microorganismos" [1]. Requiere un medio reductor (-300 a -330 mV/ENH), mientras que el compostaje necesita la presencia de dioxígeno, las llamadas condiciones aerobias.

Durante el proceso de biodegradación, la metanización genera biogás y un digestato (Figura 1).

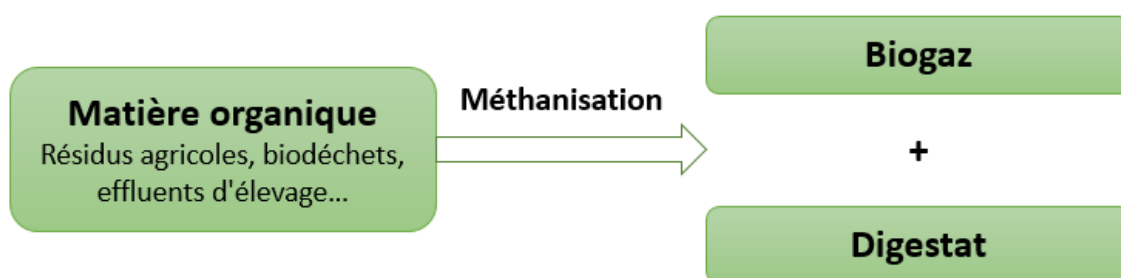


Figura 1. Esquema del balance global de la reacción de metanización

- ⇒ El digestato es el residuo del proceso de digestión. Está compuesto por materia orgánica no digerida y por materias minerales, ya que éstas no se degradan durante el proceso de metanización. Se utiliza como abono o enmienda orgánica, ya sea por aplicación directa o después de una fase de separación sólidos-líquidos.

- ⇒ El biogás es una mezcla gaseosa formada por CH_4 y CO_2 , y también por otros compuestos minoritarios, como sulfuro de hidrógeno (H_2S). Puede transformarse por combustión en calor y electricidad, utilizarse para la producción de biocombustible o inyectarse en la red de gas natural tras su depuración. Las diferentes formas de aprovechamiento del biogás se presentan en el apartado 2.1.3.

Son precisas varias etapas de transformación de la materia para generar biogás (Figura 2).

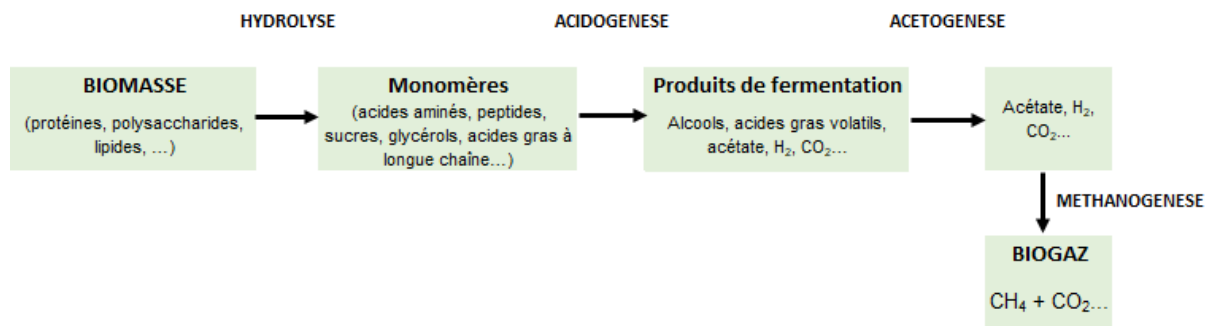


Figura 2. Esquema de las etapas intermedias de la reacción de metanización

En primer lugar, la biomasa se hidroliza, generando monómeros a partir de carbohidratos, lípidos y proteínas. Las bacterias acidógenas degradan estos monómeros en alcoholes, ácidos grasos volátiles, acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. La acetogénesis produce entonces acetato, hidrógeno y dióxido de carbono a partir de los subproductos de la etapa anterior. Finalmente, se genera metano durante la metanogénesis.

2.1.2 Aplicación e implementación

El proceso de metanización tiene lugar en un reactor aislado térmicamente (digestor) para mantener la temperatura constante. Existen distintos rangos de temperatura aceptables para esta digestión:

- ⇒ Mesófilo: 35°C - 40°C. Un 20% aproximadamente del calor producido se autoconsume para calentar el digestor [1],
- ⇒ Termófilo: 52°C - 56°C. Los tiempos de permanencia son más cortos que en el modo mesófilo porque el material carbonado se degrada más rápidamente a esta temperatura. La metanización termófila es más difícil de controlar debido al mayor riesgo de inhibición de las bacterias por los ácidos grasos y el amoníaco. El consumo de calor para calentar el digestor gira en torno al 35 % del calor generado [1].
- ⇒ Psicrófilo: 10 - 20°C. Este rango de temperatura se emplea en la picometanización, ya que las producciones de gas son más lentas que para los digestores calefactados.

Los procedimientos de metanización pueden funcionar de manera continua (o semicontinua) o en modo discontinuo. En modo continuo, el digestor se alimenta y se descarga de forma continua o secuencial a través de bombas o tolvas de alimentación. En modo discontinuo, el digestor trabaja por tandas, con introducción de la materia a degradar al inicio de la digestión y su extracción al final de la misma.

Las tecnologías de digestores también dependen del contenido en Materia Seca (MS) de los sustratos a degradar. En vía húmeda, la mezcla de insumos presenta una tasa de MS inferior al 20%. En vía seca, los insumos presentan tasas mayores de MS (del 25% al 50% MS) que varían según si la tecnología es continua o discontinua.

Los materiales metanizables son residuos orgánicos de origen variado:

- ⇒ fracción fermentescible de residuos domésticos,
- ⇒ lodos de depuradoras,
- ⇒ desechos de la industria agroalimentaria,
- ⇒ desechos agrícolas (deyecciones animales o residuos de cultivos),

⇒ residuos alimentarios.

Los materiales orgánicos que entran en el digestor no deben estar demasiado cargados de lignina, que es resistente a la biodegradación, como las ramas y las astillas de madera. Los materiales inertes, tales como plásticos, metales, vidrios deben ser clasificados antes de introducir los materiales en la digestión para no mermar la calidad del digestato. También es necesario prestar especial atención a la presencia de productos que puedan ser tóxicos o inhibidores para las bacterias, como biocidas, ácidos, sales, etc.

Las materias metanizables se caracterizan por su potencial metanogénico, que corresponde a la cantidad máxima de metano que pueden generar. En la

Figura 3 se presenta el orden de magnitud de dichos potenciales metanogénicos.

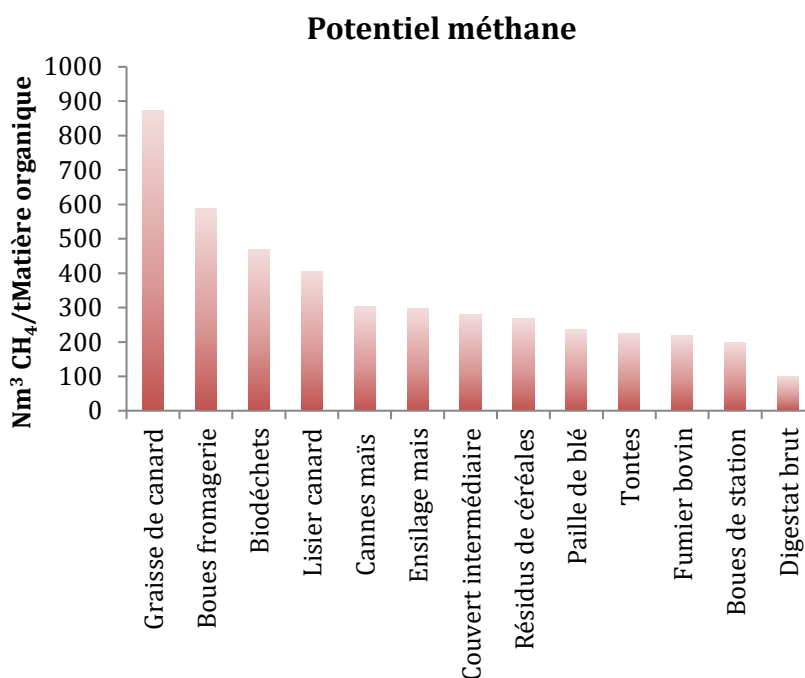


Figura 3. Orden de magnitud del potencial metanogénico de las materias metanizables (Fuente: APESA)

En la gráfica anterior se muestra la diversidad de potenciales metanogénicos según la naturaleza de los sustratos. Las grasas son altamente fermentescibles y los estiércoles bovinos y lodos de depuradora contienen los potenciales metanogénicos más bajos en relación con el peso de materia orgánica.

La mezcla de insumos debe realizarse de manera que permita una producción de biogás estable y continua en el tiempo. El contenido de grasa en la receta no debe superar el 10-15% de la mezcla de entrada en peso para no provocar problemas a nivel de la digestión (acidificación, formación de espuma, subida de grasas). Asimismo, la ración ha de respetar determinados equilibrios bioquímicos para permitir un correcto funcionamiento biológico de la futura unidad. En particular, la ración debe ser equilibrada en términos de carbono, nitrógeno y fósforo:

- Nitrógeno. La relación C/N indica la proporción de carbono orgánico respecto al nitrógeno total en la materia orgánica. Una relación C/N entre 15 y 35 suele ser adecuada para la digestión anaerobia. Valores más altos penalizan la degradación del carbono, mientras que valores demasiado bajos pueden conducir a una acumulación de amoníaco, que es un inhibidor de la metanización.
- Fósforo. El fósforo también es un elemento nutricional esencial para el buen funcionamiento de la metanización; la relación C/P óptima suele situarse entre 100 y 150 [2].

También las bacterias requieren micronutrientes/oligoelementos, que suelen aportar en cantidad suficiente los sustratos procesados.

2.1.3 Valorización del biogás

El biogás está compuesto por metano (50-70% CH₄), dióxido de carbono (30-50% CO₂) y compuestos minoritarios: N₂, NH₃, H₂, H₂S (sulfuro de hidrógeno). Dependiendo de su uso, el biogás requiere etapas de tratamiento más o menos complejas para garantizar su calidad y no dañar las unidades de revalorización.

2.1.3.1 Modos de valorización

Existen cinco vías de valorización del biogás (Figura 4).

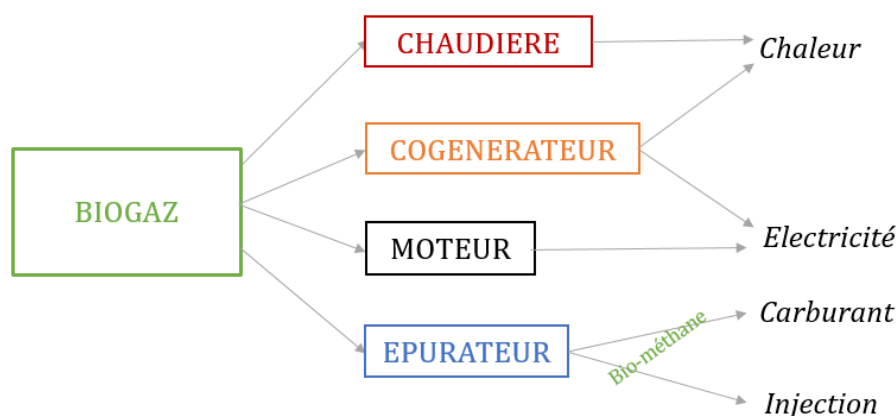


Figura 4. Esquema recapitulativo de los modos de valorización del biogás

Se puede aprovechar el biogás para:

- ⇒ Alimentar una caldera y producir así vapor o agua caliente,
- ⇒ Producir electricidad,
- ⇒ Producir electricidad y calor combinado mediante cogeneración. El calor generado puede valorizarse y la electricidad venderse [3],
- ⇒ Producir combustible: tras su purificación, el biometano puede utilizarse como combustible para los vehículos que funcionan con GNV (Gas Natural Vehicular),
- ⇒ Producir gas natural. Hay que depurar el biogás (para eliminar el CO₂ y las impurezas) y luego comprimirlo antes de inyectarlo en la red de gas natural.

Las soluciones de valorización por inyección o producción de combustible no conciernen, o poco, a la micrometanización y no existen en la picometanización porque la cantidad de biogás producida es demasiado escasa. Los depuradores de gases disponibles en el mercado no se sitúan en estos rangos de caudal. El estudio del GERES informó de que la inyección no es, hasta la fecha, económicamente viable por debajo de 50 Nm³ CH₄/h debido a los costes asociados a la inyección (depurador, alquiler de la estación de inyección y conexión, entre otros) [4]. Sin embargo, algunas instalaciones de micrometanización proponen soluciones de inyección, pero, en su mayor parte, el biogás sirve para producir calor o alimentar un cogenerador. El calor producido se utiliza para calentar los digestores y también puede emplearse para proporcionar calor a la infraestructura de la granja (por ejemplo, naves para el ganado). La cogeneración es muy común porque permite generar electricidad y calor.

En el caso de las "picoinstalaciones", el biogás se valoriza mayormente mediante su combustión en cocinas de gas.

2.1.3.2 Tratamiento del biogás

El biogás que sale del digestor está saturado de agua. La eliminación de esta agua suele ser necesaria. Existen varias soluciones disponibles:

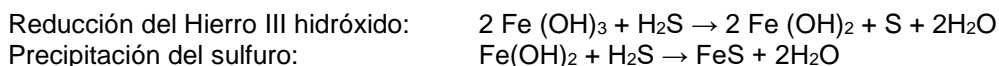
- ⇒ Un pozo canadiense que consiste en hacer circular el biogás por tuberías subterráneas con una pendiente y una longitud suficientes para permitir el enfriamiento del biogás y la recuperación del agua condensada.
- ⇒ Un secador de biogás por refrigeración: un intercambiador tubular conectado a una red de refrigerantes permite condensar el agua y luego evacuarla. A continuación, el biogás debe ser calentado, normalmente por el motor de cogeneración, para reducir la humedad relativa.
- ⇒ Un condensador. En picometanización, se colocan pequeños recipientes en el circuito de biogás para recuperar el agua condensada.

La presencia de H₂S en el biogás expone a riesgos mortales de intoxicación por inhalación. Bastaría una concentración de 1500 ppm para causar la muerte de una persona en 1 minuto [5].

"La intoxicación por inhalación produce irritación de las mucosas oculares y respiratorias, efectos sobre el sistema nervioso central (coma, convulsiones, a veces mortales), así como trastornos respiratorios y cardíacos. Produce daño celular en la córnea, la corteza cerebral, los pulmones y el hígado" [6]. El Valor límite de corta duración (VLP) correspondiente a la concentración máxima a la que puede estar expuesto un trabajador durante 15 minutos o menos es de 10 ppm [6].

Independientemente de su toxicidad, el H₂S también puede generar problemas de corrosión ya que genera ácido sulfúrico cuando se mezcla con agua. Existen distintas soluciones de tratamiento para procesar el H₂S aguas arriba del procedimiento de valorización del biogás [7]:

- ⇒ Insuflación de aire en el cielo gaseoso del digestor de manera controlada para activar bacterias anaeróbicas que conviertan el H₂S en azufre elemental. Se debe ajustar con precisión la cantidad de aire que añadir para no crear una atmósfera explosiva.
- ⇒ Inyección de óxido de hierro en el digestor para precipitar el azufre y descargarlo con el digestato.
Este mecanismo se basa en las siguientes reacciones:



También se puede utilizar una solución de cloruro de hierro para sustituir el óxido de hierro.

- ⇒ Filtración sobre óxido de hierro: las reacciones implicadas son:



Existe un riesgo de ignición del filtro debido a la naturaleza altamente exotérmica de las reacciones involucradas. Por ello, esta técnica se utiliza cada vez menos [7].

- ⇒ Adsorción en carbón activo,
- ⇒ Lavado biológico o químico.

Los proveedores de picometanización suelen proporcionar filtros de carbón activo o de óxidos de hierro.

2.1.4 Valorización del digestato

El digestato ofrece una alternativa a los abonos químicos y un potencial beneficio económico para los operadores de metanizadores.

El digestato puede aprovecharse mediante aplicación directa o después de la separación sólido-líquido. La fase líquida se asimila a un abono rico en nitrógeno. La fase sólida está formada por materia carbonada no digerida. Se utiliza como enmienda orgánica y a veces se somete a una etapa de compostaje. En algunos casos, esta fracción puede contener la mayor parte del fósforo [8].

En picometanización, el digestato se extiende directamente debido a las pequeñas cantidades generadas. En micrometanización, son posibles dos modos de valorización. La calidad del digestato dependerá de las materias que entran en la digestión y del buen funcionamiento de la metanización.

2.2 Micrometanización, picometanización: definiciones

Se pueden proponer varias definiciones de la pequeña metanización. En el proyecto de la Unión Europea, "BioEnergy Farm II – Efluentes, un combustible sostenible para las granjas" se establece una lista de definiciones para la metanización de pequeño tamaño en varios países europeos (Anexo 1).

En el caso de Francia, la metanización a pequeña escala se define como una instalación de menos de 100 kW instalados o 4.000 tn/año de efluentes ganaderos [9]. Esto es coherente con los umbrales utilizados por ADEME en su estudio de 2019 sobre el rendimiento económico de las unidades de metanización [10]. La denominada metanización microindividual corresponde a las unidades de pequeña potencia en la explotación con una potencia inferior a 100 kW [10]. En el estudio realizado por el GERES, se establece un umbral alto de 80 kW para la micrometanización [11].

Este estudio de ADEME concluye, además, que la madurez tecnológica de las unidades de micrometanización es insuficiente y que la rentabilidad se ve penalizada por el pequeño tamaño de las unidades. Uno de los retos de los próximos 5 años sería el desarrollo de unidades estandarizadas que permitan una instalación y explotación sencilla por un bajo coste. Con ello se podría desarrollar el importante potencial de las pequeñas fuentes de afluentes con un uso del biogás para alimentar cogeneradores, o incluso vehículos (BioGNV), según las lógicas territoriales y las evoluciones tecnológicas [10].

La Comisión de Regulación de la Energía (CRE) fija trimestralmente las tarifas de compra de la electricidad, que son decrecientes en un 0,5% cada trimestre. En el caso de la electricidad procedente de biogás no peligroso y de materia vegetal, la tarifa de compra depende de la potencia eléctrica instalada. Así, la tarifa de compra es más interesante para las pequeñas unidades de metanización (≤ 80 kW). En 2020, la tarifa de compra (tarifa básica) es de una media de 0,167 euros/kWh frente a 0,143 euros/kWh para las unidades con 500 KW de capacidad instalada [12]. En el caso de potencias intermedias, las tarifas de compra se calculan mediante interpolación lineal. Se abona una prima para los efluentes ganaderos de 0 a 0,05 euros/kWh dependiendo de la proporción de los mismos en la mezcla de insumos, desde un 0 hasta un 60% (prima máxima) del tonelaje total [12].

Esta potencia de 80 kW se considera, en el presente estado de la técnica, como el umbral alto de micrometanización, es decir, unos 20 Nm³/h de metano. Eso permite cumplir con los umbrales definidos por el GERES [11] y las anteriores tarifas de compra. A menudo, se destina la micrometanización para explotaciones agrícolas, granjas y ganadería. La cantidad de insumos a procesar anualmente es de un máximo de 10.000 tn/año cuando los sustratos están poco cargados, como en el caso de ciertos purines. Considerando las potencias instaladas, el biogás se suele aprovechar en forma de calor o mediante cogeneración.

La picometanización se lleva a cabo a una escala aún más pequeña, ya que se trata principalmente de viviendas, casas rurales o pequeñas explotaciones individuales. Los insumos son generalmente biorresiduos, hierba o efluentes de ganadería. Estos residuos deben ser primero triturados y mezclados con agua para ser introducidos en pequeñas cantidades y de manera uniforme en el digestor. El producto del biogás suele recuperarse por combustión a través de una cocina de gas. No hay posibilidad de inyección a la red en el caso de una picometanización porque el volumen de biogás producido es demasiado pequeño. Hoy en día no existe umbral alguno para definir el límite entre la micro y la picometanización. **En el presente estado de la técnica, establecemos el umbral de la picometanización en las instalaciones cuyo tonelaje de insumos es inferior a 30 toneladas/año, o en torno a 0,2 Nm³/h de metano¹.**

¹ 30 toneladas/año de biorresiduos (43 Nm³ CH₄/t biorresiduo) alimentando un picometanizador 300 d/año

La Figura 5 ilustra el posicionamiento de distintos tipos de metanización según la producción de biogás y el volumen del digester.

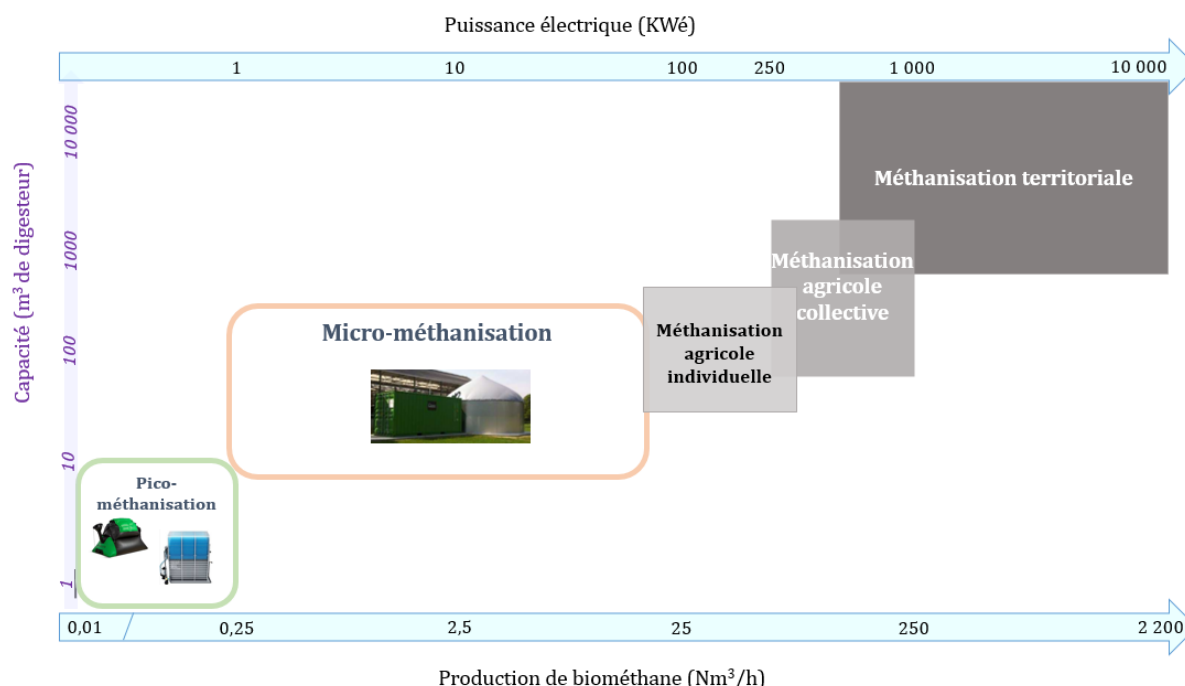


Figura 5. Representación de la pico y micrometanización en el campo de la metanización

Los rangos de producción de biometano son muy amplios ya que van desde menos de 0,2 Nm³/h en el caso de metanizadores a pequeña escala hasta más de 2.000 Nm³/h en el caso de metanizadores territoriales de gran capacidad, algunos de los cuales están actualmente en proyecto.

3 Normativas aplicables

Las instalaciones de metanización están sujetas a un régimen de declaración, registro o autorización en el marco de las Instalaciones Clasificadas para la Protección del Medio Ambiente (ICPE). El régimen de metanización de la unidad depende de la naturaleza y el tonelaje de las materias procesadas (Tabla 1).

Tabla 1. Marco ICPE de las unidades de metanización

Epígrafes	Tipo de materia procesada	Cantidad de materias procesadas		
		Declaración	Registro	Autorización
2781-1	Materia vegetal bruta, efluentes de ganadería, materias estercolares, lactosuero y residuos vegetales del sector agroalimentario	< 30 tn/d	30 tn/d – 100 tn/d	≥ 100 tn/d
2781-2	Otros residuos no peligrosos	/	< 100 tn/d	≥ 100 tn/d
	Dossier para rellenar y entregar en prefectura	Dossier resumido	Dossier técnico +consulta de los municipios +información del público	Estudio de riesgos + estudio de impacto + encuesta pública

Las unidades de micro y picometanización que procesan materias vegetales y efluentes ganaderos estarán sujetas a declaración (para menos de 30 tn/d tratadas). En cambio, las unidades de tratamiento de residuos alimentarios (biorresiduos) serán objeto de registro bajo el epígrafe 2781-2 (para menos de 100 tn/d procesadas).

Los decretos de declaración del 10/11/09, registro del 12/08/10 y autorización del 10/11/09 especifican las disposiciones aplicables para la recepción de los materiales entrantes, las medidas de seguridad (prevención del riesgo de incendio y explosión), el seguimiento del proceso de metanización (análisis del biogás y seguimiento de la digestión), la prevención de las molestias y la gestión de residuos.

También se especifican las normas para la instalación de metanizadores. Debe hacerse a una distancia mínima de cualquier vivienda ocupada por terceros² y 35 m de cualquier fuente de captación de agua (destinada al consumo humano, a la industria agroalimentaria o al riego de cultivos hortícolas o hidropónicos) [13]. No obstante, los micrometanizadores y picometanizadores pueden ser objeto de una excepción tras una evaluación, caso por caso, que demuestre la ausencia de riesgos y molestias para los vecinos y el medio ambiente [14].

Para la combustión del biogás, el epígrafe del ICPE en cuestión es de 2910 C. Las unidades afectadas son las que consumen biogás de las instalaciones clasificadas bajo el epígrafe 2781-1 si la potencia térmica nominal es superior a 1 MW.

El almacenamiento de biogás está sujeto al epígrafe 4310 que sustituye el epígrafe 1411-2 (Tabla 2).

Tabla 2. Especificaciones del epígrafe 4310

Cantidad total de biogás que puede estar presente en la instalación	Régimen ICPE
≥ 10 tn	Autorización
1 tn – 10 tn	Declaración

Los biorresiduos representan una fuente de afluentes creciente para las unidades de metanización porque la normativa obliga, cada vez más, a implantar su valorización. Se definen en el artículo R541-8 del Código del Medio Ambiente como "todo residuo biodegradable no peligroso de jardín o parque, todo residuo alimentario o de cocina no peligroso resultante en particular de los hogares, los restaurantes, los comedores o las tiendas de venta minorista, así como todo residuo comparable resultante de los establecimientos de producción o de transformación de productos alimentarios" [15].

Desde la circular del 10 de enero de 2012, los poseedores o productores de grandes cantidades de residuos compuestos principalmente por biorresiduos están obligados a garantizar una clasificación en origen para valorizarlos (artículo L. 541-21-1 del Código del Medio Ambiente). Desde el 1 de enero de 2016, los productores de más de 10 tn/año de biorresiduos o más de 60 tn/año de aceites alimentarios usados están afectados.

A partir del 1 de enero de 2023, esta obligación se extenderá a las personas que generan o poseen más de cinco toneladas de biorresiduos al año [16].

El desembalaje de los biorresiduos de supermercados e hipermercados es un paso previo necesario para la metanización al separar los envases de los materiales biodegradables. Esta etapa puede ser realizada por el productor de residuos o delegada a la unidad de metanización.

Una normativa específica rige los desechos de cocina y de mesa (DCT). Se encuentran definidos en el anexo 1 del Reglamento sanitario europeo 142/2011 como "todos los residuos de alimentos, incluidos los aceites de cocina usados provenientes de la restauración y de las cocinas, incluidas cocinas centralizadas y cocinas domésticas" [17]. Estos residuos se definen como subproductos animales de categoría 3 (SPAN) (Reglamento CE 1069/2009 artículo 10) [18].

En el caso de los SPAN, el Reglamento europeo n°1069-2009 define los tipos de subproductos animales autorizados para la metanización y las obligaciones de pretratamiento [18]. Los SPAN de categoría 1 (riesgo significativo para la salud pública) no se ven afectados por la metanización. En

²Exceptuando las viviendas ocupadas por personal de la instalación y las viviendas cuyo derecho de uso pertenece al operador, al proveedor de sustratos de metanización o al usuario del calor generado.

cambio, los materiales de la categoría 2 o 3 pueden metanizarse, siempre y cuando estén esterilizados o higienizados (

Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de los SPAN y obligaciones de pretratamiento [16][17]

Categoría SPAN	Tipos de subproductos	Pretratamiento
2	Residuos de matadero (excluidos rumiantes) > 6 mm Carne y pescado, Productos alimentarios viejos retirados de la venta por razones sanitarias Efluentes de ganadería	Esterilización (133°C, 3 bares, 20 minutos) Partículas < 50 mm
3	Partes de animales sacrificados aptos para el consumo humano o exentos de cualquier signo de enfermedad transmisible a las personas o a los animales, cadáveres, plumas, pelo y sangre de animales, alimentos viejos, residuos de cocina y de mesa , leche, huevos...	Pasteurización/higienización (70°C, 60 minutos) Partículas < 12 mm

Pueden autorizarse excepciones a la esterilización/higienización en el caso de los efluentes de ganadería, del tubo digestivo y su contenido, de la leche, los productos lácteos, el calostro, los huevos y los ovoproductos, si la autoridad competente considera que no existe riesgo de propagación de ninguna enfermedad transmisible grave [18].

Se requiere una autorización sanitaria para las plantas de metanización que utilicen como materia prima, sola o en mezcla, SPAN de categoría 2 o 3. Existen excepciones para las unidades que utilizan exclusivamente, como subproductos animales, purines, leche, calostro y material estercoral (sujetas a condiciones de origen).

4 Picometanización

4.1 Presentación de las tecnologías de picometanización

Las unidades de pico-metanización se comercializan en forma de módulos premontados de bajo coste. Estas unidades pueden reducir el consumo de energía de un hogar en los países en desarrollo en un 40% [20] donde los estilos de vida son menos intensivos en energía que en los países desarrollados.

Como regla general, el contenido de MS en la mezcla de alimentación debe ser del 10% como máximo, lo que requiere la adición de grandes cantidades de agua [20]. Aunque estos metanizadores a pequeña escala se adaptan bien a las regiones cálidas (debido a las suaves condiciones de temperatura en las que tiene lugar la digestión), la falta de calefacción penaliza el rendimiento de la digestión en los periodos fríos. Se pueden instalar equipos adicionales (cubierta aislante, invernadero, resistencia calefactora) para aumentar la temperatura de digestión.

Las tecnologías presentadas son las destinadas al mercado europeo y al francés en particular (lista no exhaustiva). Las tecnologías destinadas al mercado indio, africano o chino no son objeto de una presentación desglosada, sino que se enumeran en el apartado 4.3. Dichas presentaciones incluyen una descripción de sus características técnicas y económicas.

4.1.1 Homebiogas (Israel)

4.1.1.1 Presentación

El procedimiento Homebiogas, hoy en día en su versión 2.0, ha sido desarrollado por una start-up israelí creada en 2012 y se comercializa desde 2016. Engie adquirió una participación del 13% en HomeBiogas por medio de su fondo de inversión "ENGIE New Ventures" [21].

El digestor (Figura 6) se suministra en forma de kit prefabricado cuyo tiempo de montaje se estima en sólo una hora y consiste principalmente en un digestor (1500 L) y una bolsa de almacenamiento de gas (700 L).

El módulo comercializado también incluye una resistencia calefactora para el digestor y un sistema de filtración de gases (filtro de carbón activo que se sustituye cada 4 meses) a la salida para eliminar los olores.

Incluye una válvula de seguridad en caso de sobrepresión de la instalación.

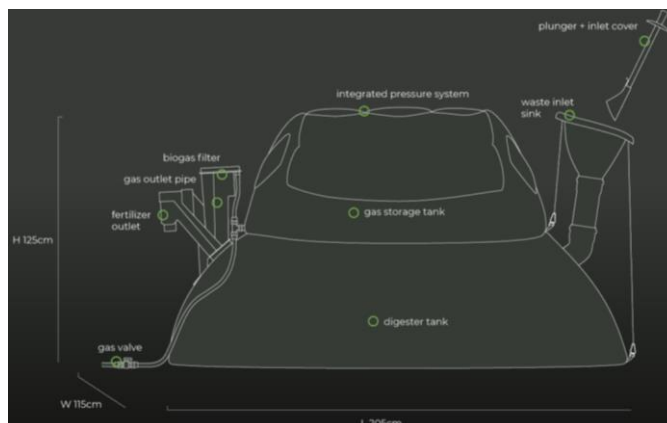


Figura 6. Esquema de instalación Homebiogas [22]

El digestor puede ser alimentado con productos alimenticios orgánicos hasta 6L/día o 15 L estiércol/día, en cuyo caso se debe añadir un volumen de agua de 30L/día al digestor junto con el estiércol [22].

En las regiones donde las temperaturas son superiores a los 20 °C, el digestor estará en su punto óptimo de funcionamiento. El proceso será menos eficiente en las regiones donde la temperatura media es de alrededor de 15°C, debiendo reducirse la cantidad de insumos para compensar la menor eficiencia de las bacterias. En el caso de zonas frías (temperatura media inferior a 15°C), el dispositivo Homebiogas no puede utilizarse sin material adicional como un invernadero, una resistencia calefactora o una cubierta aislante [22], ya que dichos equipos permitirán aumentar la temperatura de digestión.

El almacenamiento de biogás dispone de bolsas de arena para aumentar su presión y permitir su transporte hasta el dispositivo de aprovechamiento. En general, el biogás se utiliza para alimentar una cocina de gas que puede permitir hasta 2 horas de cocción al día por 600 L de biogás producido.

Con el uso de un dispositivo Homebiogas en un hogar, se podrían limitar las emisiones de carbono en unas 6 toneladas al año [23].

4.1.1.2 Retorno de experiencia

Mas Bazan

Una unidad Homebiogas está funcionando en la casa rural de Mas Bazan en Pirénées Orientales. La empresa ATENA ha asesorado a Mas Bazan en la instalación y seguimiento del digestor. Para valorizar sus residuos alimentarios, la casa rural optó por la metanización en lugar del compostaje debido a la presencia de residuos cárnicos.



Figura 7. Foto del dispositivo Homebiogas en Mas Bazan

La inversión total ascendió a 1.200 euros por el material y el asesoramiento de ATENA [24].

Se instaló un dispositivo de calefacción (resistencia de acuario) para mantener una temperatura de 20°C en el digestor en invierno. Esta instalación se sembró con boñiga de vaca en marzo de 2019 y se alimenta desde entonces con restos de comida (residuos orgánicos, carne) a razón de 6 kg por día.

La bolsa de biogás se llena completamente en 1 o 2 días y permite un tiempo de cocción de 1:30h a 2h, en coherencia con los datos proporcionados por Homebiogas. El biogás producido se valoriza por

combustión a través de una placa de cocción específica (situada a 5 m de la instalación). Sin embargo, esta producción es insuficiente para cubrir las necesidades culinarias de la casa rural. La unidad produce unos 15L al día de digestato que se utiliza para abonar las plantas y los frutales de la finca.

Tras un año de explotación, se detectó un punto débil a nivel del sistema de alimentación. La falta de sistema integrado de trituración y agitación ha causado una acumulación de materia aguas abajo de la boca de alimentación. Para limitar dicha acumulación, el operador inyecta ahora agua por chorro después de cada introducción. La falta de trituración parece ser un problema de importancia prioritaria máxima en este equipo.

Se detectó otro punto débil del dispositivo a nivel del tapón de vaciado ya que éste se venció bajo el peso de materias. Se ha realizado una modificación. En cuanto a los olores, se observan cerca del digestor, a la entrada y a la salida.

Les Sourciers

Les Sourciers es una microgranja hidropónica ecológica en el departamento de Gers.

En 2018 se instaló una unidad Homebiogas para la digestión de residuos verdes. En la actualidad, Les Sourciers ha optado por dejar de utilizar este sistema debido a las limitaciones normativas (sanitarias) que no permiten el uso de nutrientes digeridos en cultivos hidropónicos. Cuando se desmontó la unidad, había lodos acumulados no descompuestos en el fondo de la lona, lo que sugiere que la digestión del material no fue óptima. La unidad produjo gas de forma irregular a lo largo del año y por debajo de lo anunciado por el proveedor, sobre todo en invierno.

4.1.1.3 Resumen sintético de la tecnología Homebiogas

Tabla 4. Presentación de la tecnología Homebiogas 2.0 [22], [23]

Insumos	Cantidad máxima/día	6 L de biorresiduos + 6 L de agua o 15 L estiércol + 30 L agua
	Pretratamiento	No (prever trituración)
Digestor	Tecnología	Vía semilíquida
	Volumen útil	1,3 m ³
	Temperatura	Psicrófila
	Calefacción	Resistencia calefactora
	Tiempo de permanencia	30 a 110 días
	Agitación	no
Biogás	Almacenamiento	0,7 m ³
	Producción	0,4 - 0,6 m ³ /d
	Tiempo de cocción	1,5 – 2 h/d
	Valorización	Combustión
Precio (sin entrega)³		720 \$ ~ 640 €
Número de unidades funcionando en el mundo		1.000 No se conoce el número de unidades francesas. Se referenciaron 2.

³ Entrega prevista al precio de 140\$ para Francia

Contacto	Homebiogas ✉ info@homebiogas.com ✉ support@homebiogas.com https://www.homebiogas.com/
	ATENEA Tecnosud, Site 21, Bât 0-plot B, 320 rue James Watt 66 100 Perpignan Francia Carolina Guzman ☎ 06 38 63 59 01 ✉ carolina.guzman@groupeatenea.com

ATENEA es el distribuidor oficial de Homebiogas en Francia. La empresa se encarga de la comercialización del material, así como de su puesta en marcha, de su seguimiento y de la formación de los usuarios.

Homebiogas comercializa también otros formatos de digestor que se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 5. Características de los productos Homebiogas [23]

Modelo		Homebiogas 7.0	Homebiogas 2.0 + Bio-Toilet
Insumos	Cantidad máxima/día	20 L de biorresiduos + 20 L de agua o 36 L estiércol + 70 L agua	300 L Aguas residuales domésticas / biorresiduos / estiércol
	Volumen	4,5 m ³	1,3 m ³
Biogás	Almacenamiento	2,5 m ³	0,7 m ³
	Tiempo de cocción	6 h/d	1 h/d
	Valorización	Combustión	Combustión
Precio (sin entrega)		1.500 \$ ~1.335 €	1.115 \$ ~992 €

Homebiogas propone una gama de productos adicionales al módulo básico, cuyo precio se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Productos adicionales Homebiogas [23]

Productos adicionales	Precio (en €)
Quemador simple	34
Quemador integrado	51
Kit filtro de gas	17
Comprimidos probióticos	22
Bolsa de almacenamiento gas	164
pHmetro	43
Bolas Bio	13
Cubierta aislante	133

4.1.2 MyGug (Irlanda)

4.1.2.1 Presentación

MyGug es un sistema totalmente automatizado de digestión anaerobia desarrollado en Irlanda. Se proponen dos versiones según si el producto se destina a un uso doméstico o a profesionales.



MyGug afirma que con su procedimiento se pueden procesar los residuos orgánicos domésticos a temperaturas ambiente desde -20°C hasta +40°C [25]. El tratamiento de las aguas residuales no está previsto en este tipo de unidad, así como la introducción de hierba, que no se recomienda ya que puede obstruir el macerador.

Figura 8. Foto de un dispositivo MyGug doméstico [25]

Los residuos se colocan en un macerador y una bomba alimenta el digestor en forma de huevo a intervalos regulares. De este "huevo" sale, por un lado, el digestato y, por otro, el biogás, que se filtra para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H_2S). Una válvula mantiene la presión en la bolsa de almacenamiento de gas.



Figura 9. Foto de un dispositivo MyGug profesional [25]

MyGug propone digestores cuyo tamaño varía entre 0,3 m³ y 7,5 m³. Las dimensiones exactas no se comunican. La forma particular del digestor MyGug permitiría una mejor mezcla de los insumos y una mayor resistencia mecánica.

4.1.2.2 Retorno de experiencia

La tecnología está en vía de desarrollo. MyGug tiene instaladas 5 unidades en Irlanda y contempla instalar 50 unidades el año que viene. Hasta la fecha, no se ha instalado ninguna unidad en Francia, pero MyGug tiene intención de entrar en el mercado europeo dentro de los 18 próximos meses.

El primer prototipo de 300 L se instaló en 2018 para el tratamiento de residuos de un hogar. Durante el periodo de prueba, el digestor fue alimentado con una media de 1,3 kg/d y hasta 3,2 kg/d de biorresiduos. El tratamiento de 1,98 kg/d produjo una cantidad de biogás aproximadamente constante en torno a 348 L/día [24].

4.1.2.3 Resumen sintético de la unidad MyGug

Tabla 7. Presentación de la tecnología MyGug [25]

Insumos	Naturaleza	Residuos orgánicos domésticos
	Cantidad/día	Entre 1,5 kg y 130 kg
	Pretratamiento	Maceración
Digestor	Tecnología	Vía semilíquida
	Volumen útil	0,3 m ³ a 7,5 m ³
	Temperatura	No comunicada
	Calefacción	sí
	Tiempo de permanencia	No comunicado
Biogás	Agitación	No
	Almacenamiento	> 0,05 m ³
	Producción	0,2 a 0,5 m ³ /día (digestor doméstico)
	Valorización	Combustión

Precio	Confidencial
Número de unidades funcionando	5
Contacto	MyGug Clonakilty, Co. Cork Irlanda ✉ hello@mygug.eu http://mygug.eu/

4.1.3 Puxin (China)

4.1.3.1 Presentación

Shenzhen Puxin Technology Co. Ltd es una empresa china fundada en 2001. Ha desarrollado numerosos procesos de digestión anaerobia a pequeña escala.

El digestor Puxin PX-ABS se comercializa para particulares. Un invernadero de 3,4 m³ alberga un digestor (1,7 m³) y un gasómetro (1,3 m³) [27]. El sistema consta de un embudo de entrada para facilitar el suministro de residuos y dos salidas: una para el biogás filtrado (desulfurado) y otra para el digestato. El objetivo del invernadero es propiciar la acumulación de calor y limitar su disipación para facilitar la digestión de la materia y, en consecuencia, la producción de biogás.

Puxin propone varios elementos para completar el módulo básico según el tipo de insumos y las condiciones de funcionamiento:

- ⇒ Un triturador para triturar el material antes de introducirlo en el digestor,
- ⇒ Una bomba para alimentar el digestor en insumos líquidos,
- ⇒ Una mezcla de bacterias para sembrar el digestor,
- ⇒ Una bolsa calefactada para aumentar la temperatura del digestato cuando hace frío. La eficiencia de este sistema de calefacción se desconoce.

Puxin ya no comercializa la bomba de circulación que se propuso inicialmente para garantizar la mezcla del contenido del digestor. La falta de mezcla parece ser un punto débil de esta tecnología, que penaliza el rendimiento del digestor en caso de acumulación de material a la entrada del mismo.

También se comercializa un digestor de mayor capacidad (15 m³). En la Tabla 8 se resumen las características de los dispositivos Puxin 3,4 m³ y 15 m³. En cuanto a los equipos adicionales a los digestores se presentan en el anexo 2.

4.1.3.2 Retorno de experiencia

Existirían una decena de unidades Puxin 3,4 m³ instaladas en Francia.

El **Jardín de Sandrine en Esconnets** (65130) instaló un Puxin 3,4 m³ en 2019 (Figura 10) con el fin de metanizar los residuos de frutas y verduras generados por sus actividades de cultivos de vegetales y transformación. Las superficies cultivadas representan 100 m² bajo invernadero y 600 m² en campo abierto. La gestión de este metanizador es objeto de un acompañamiento en el marco del proyecto Orhi. El Ardear Occitanie coordina la organización y ejecución de las obras de mejora de la unidad de picometanización realizadas por la asociación Pico Joules. La APESA es responsable del seguimiento biológico de la unidad. El equipo inicial se completó con una bomba de lavadora para recircular el digestato y favorecer así la mezcla y el contacto de las bacterias con el material a degradar. Asimismo, se realizaron trabajos de aislamiento del digestor para favorecer el mantenimiento de una temperatura favorable a la metanización en épocas de frío.



Figura 10. Foto del dispositivo Puxin en el Jardín de Sandrine. Foto APESA.



El digestor se puso en marcha en el verano de 2020 con boñigas de vaca. A partir de entonces, debido a la falta de actividad de transformación de vegetales durante este periodo, el digestor se alimentó principalmente con hierba mezclada con agua.

Tras un funcionamiento satisfactorio durante unas semanas, el punto de entrada de material se taponó. A pesar de varios intentos de eliminar el tapón de hierba, el digestor tuvo que ser vaciado. Esto demuestra las dificultades que se pueden encontrar con este tipo de digestores. La elección de los materiales a introducir, su trituración y la mezcla con agua antes de la introducción son puntos clave para el funcionamiento del digestor.

Para evitar que se vuelvan a producir obstrucciones, el operador reducirá la proporción de hierba a introducir y añadirá una etapa de mezcla de agua con una proporción aumentada de 1/2 (1 kg de material por 2 kg de agua) antes de su introducción en el digestor.

4.1.3.3 Resumen sintético de la tecnología Puxin

Tabla 8. Características de las unidades Puxin ABS

		Puxin ABS 3,4 m ³ [27]	Puxin ABS 15 m ³ [28]
			
Insumos	Cantidad/día	25 kg biorresiduos o 45 kg estiércol porcino o 60 kg estiércol bovino o 26 kg gallinaza o 65 kg vegetales	180 kg biorresiduos o 320 kg estiércol porcino o 1500 kg estiércol bovino o 450 kg gallinaza 500 kg vegetales
	Mezcla con agua con un ratio de 1 kg de materia por 1 a 2 L de agua		
Digestor	Pretratamiento	No (prever trituración)	No (prever trituración)
	Tecnología	Vía semilíquida	Vía semilíquida
	Volumen útil	1,7 m ³	13,3 m ³
	Peso vacío	150 kg	300 kg
	Temperatura	Mínimo 10°C	Mínimo 10°C
	Calefacción	Sí (optativa)	Sí (optativa)
	Tiempo de permanencia	15 a 35 días	5 a 35 días
Biogás	Agitación	Parcial con bomba de recirculación optativa	Parcial con bomba de recirculación optativa
	Almacenamiento	1,3 m ³	1,2 m ³
	Producción	Max 2 m ³ /día 4 h cocción	No comunicado
Valorización		Combustión / Cogeneración	Combustión / Cogeneración

	Puxin ABS 3,4 m ³ [27]	Puxin ABS 15 m ³ [28]
Precio [29] y [30] (sin transporte ni aranceles)	550 \$ - 750 \$ ~ 490 € - 650 €	2.500 \$ - 3.200 \$ ~ 2.210 € - 2.830 €
Número de unidades funcionando	200 en el mundo y una decena en Francia	No se conoce
Contacto	China ✉ info1@puxintech.com http://en.puxintech.com/domesticbiogasplant	

La capacidad de procesamiento (tonelaje de residuos/d) indicada por el proveedor aparece sobredimensionada habida cuenta del bajo nivel de equipamiento de las unidades (calefacción / agitación) y del tiempo de permanencia necesario para la digestión anaerobia.

4.2 Análisis simplificado de un balance económico en picometanización

Se llevó a cabo un estudio económico previo por parte de APESA para los digestores Homebiogas 2.0 y Puxin (3,4 m³) con el objetivo de valorar su rentabilidad. Se recogen las características de los digestores estudiados en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de los digestores Homebiogas y Puxin ABS 3,4 m³ según la información de los proveedores

Modelo		Homebiogas 2.0.	Puxin ABS 3,4 m ³
Insumos: biorresiduos	Cantidad/día	6 kg	25 kg
Digestor	Volumen	1,3 m ³	1,7 m ³
Biogás	Almacenamiento	0,7 m ³	1,3 m ³
	Producción	0,6 m ³ /d	Max 2 m ³ /d
	Valorización	Combustión	Combustión
Precio		720 \$ ~ 640 €	550 \$-750 \$ ~ 490 €-650 €

En un primer momento, se evalúan los costes de compra de las dos instalaciones de metanización teniendo en cuenta los materiales auxiliares necesarios (Tabla 10). Se hace necesario equipar el digestor de Puxin con una trituradora para las materias que tiene que digerir y con una bomba para transportar el biogás hasta la cocina de gas. El equipo Homebiogas no requiere estos materiales adicionales, ya que los sacos de arena integrados en el sistema permiten aumentar la presión del biogás y desempeñan el papel de bomba de biogás.

Tabla 10. Cálculos desglosados de la inversión global para ambos picodigestores (precio de materiales en venta online)

Homebiogas 2.0.		Puxin 3,4 m ³	
Conceptos	Precio €	Conceptos	Precio €
Digestor	640	Digestor	570
Quemador integrado	51	Quemador	27
Kit filtro de gas	17	Trituradora	350
Comprimidos probióticos	22	Almacenamiento gas	100
Almacenamiento gas	164	Bomba biogás (10 W) ⁴	50
Bolas Bio	13	Transporte y aranceles	250
Transporte y aranceles	250		

⁴ Funcionamiento 4h/día durante el uso de la cocina de gas

Inversión	1.157	Inversión	1.347
------------------	--------------	------------------	--------------

Se realiza el cálculo de los ingresos y gastos anuales con 2 simulaciones según si el gas ahorrado mediante el uso de biogás es gas ciudad o butano en bombona.

En este caso, se consideraron las siguientes hipótesis:

- El coste del gas ciudad es de 0,58 €/m³ (media de la tarifa B1 para el año 2020) [31]. Relacionamos esta tarifa con el volumen de gas normalizado (presión atmosférica y 0°C), es decir 0,58 €/Nm³.
- **PCI butano** = 34,361 kWh/Nm³ [32],
Y una masa volumétrica de 2,51 kg/m³ a 15°C, en fase gaseosa [34] es decir 2,65 kg/Nm³ => 1 kg de butano = 0,38 Nm³ gaseoso
- Precio del butano: 2,59 €/kg para el butano en bombona (25,9 € la recarga de 10 kg) [32], es decir 6,86 €/Nm³,
- PCI gas natural H (alto poder calorífico) que alimenta el 90% del territorio francés = **11,4 kWh/Nm³** [33]
- **PCI metano** = 9,96 kWh/Nm³ [32]
- Alimentación de los digestores 300 d/año

La misma energía de combustión requerirá, con respecto a los PCI, 1 m³ de gas natural o 0,33 m³ de butano o 1,14 m³ de metano.

Tabla 11. Cálculos desglosados de ingresos y gastos anuales para 2 unidades de picometanización alimentadas 300 dj/año

		Simulación 1 Biogás en sustitución del gas ciudad		Simulación 2 Biogás en sustitución de butano en bombona	
		Homebiogas	Puxin 3,4	Homebiogas	Puxin 3,4
Ingresos	Cantidad de biorresiduos kg/d	6	25	6	25
	Nm ³ CH ₄ /t biorresiduos ⁵	43	43	43	43
	Nm ³ CH ₄ producidos/d	0,258	1,075	0,258	1,075
	Precio del gas €/Nm ³	0,58	0,58	6,86	6,86
	Ahorro gas m ³ /d	0,225	0,939	0,075	0,312
	Ahorro gas/d	0,131 €	0,545 €	0,513	2,137
	Ahorro abonos	No calculado			
Gastos	Cambio del filtro biogás ⁶	53 €	6 €	53 €	6 €
	Energía eléctrica bomba biogás	0	1,5	0	1,5
Ahorro/año		-14 €	157 €	101 €	635 €

Este cálculo de ingresos permite calcular el tiempo de retorno bruto, es decir, la inversión inicial dividida por los ingresos anuales (Tabla 12).

Tabla 12. Cálculo del tiempo de retorno bruto de la inversión para tres picodigestores

		Simulación 1 Biogás en sustitución de gas ciudad		Simulación 2 Biogás en sustitución butano en bombona	
		Homebiogas	Puxin 3,4	Homebiogas	Puxin 3,4
Tiempo de retorno		Ausencia de	7,3	13,4	2,1

⁵ Valor medio sacado de una base de datos de pruebas del potencial metano de APESA

⁶ El filtro de biogás y su sustitución por un año están incluidos en la compra del homebiogas

bruto de la inversión (año)	retorno de inversión			
--	---------------------------------	--	--	--

La vida útil de estas unidades se estima en 10 años. El Puxin 3,4 proporciona el mejor retorno de la inversión cuando el biogás producido se utiliza como sustituto del butano en bombona. Cuando el propietario se conecte al gas ciudad, la rentabilidad de la unidad de picometanización será más difícil e inalcanzable para el homebiogas cuya producción de biogás es inferior a la del PUXIN.

Este cálculo presupone que se expresa todo el potencial metanogénico del material debido a su elevado tiempo de permanencia en el digestor. Este puede no ser el caso, especialmente en épocas de frío, cuando la actividad bacteriana disminuye.

Además, la capacidad de tratamiento de residuos mostrada por Puxin parece estar sobredimensionada en comparación con el digestor de Homebiogas. El volumen del digestor Puxin es un 30% superior al del homebiogas, pero, según el proveedor, podría procesar 4 veces más residuos que su competidor Homebiogas.

Este balance económico se verá fuertemente penalizado por la adaptación de la unidad de picometanización a los requisitos reglamentarios. Se exigirán las inversiones no tenidas en cuenta en esta valoración (decreto de declaración) y particularmente las siguientes:

- Cierre de la instalación para prohibir el acceso a personas no autorizadas,
- Detector de metano para las áreas cerradas (por ejemplo, edificio equipado con una cocina de gas alimentada con biogás),
- Ventilación de espacios cerrados y sitios en los que se puede acumular biogás en caso de fuga,
- Analizador de gases ($\text{CH}_4/\text{H}_2\text{S}$) y medición de la cantidad producida,
- Formación de los operadores sobre las molestias y los riesgos,
- Control continuo de la temperatura del digestato y de la presión de biogás.

4.3 Resumen sintético de los procedimientos de picometanización

En la Tabla 13 se resumen los principales datos técnicos y económicos existentes sobre las unidades de picometanización comercializadas hasta la fecha. Las tecnologías presentadas son las destinadas al mercado mundial (lista no exhaustiva). Algunas tecnologías van dirigidas a los mercados indio, africano o chino y no se comercializan en Europa.

Tabla 13. Tabla resumen de las tecnologías de picometanización

Proveedores (País)	Modelos	Precio unidad €	Valorización	Volumen m ³ _{digestor}	Coste €/m ³ _{digestor}
ARTI (India)	ARTI BIOGAS PLANT	140 €	Combustión	0,9	156
ATEC (Camboya)	ATEC BIODIGESTOR	490 €-580 €	Combustión	3,25	150-180
FENGHUO (China)	FH-8 m ³	842 €	Combustión	8	105
	FH-10 m ³	975 €		10	97
	FH-30 m ³	1 330 €		30	44
	FH-50 m ³	3 100 €		50	62
FLEXIGESTER (Inglaterra)	FLEXIGESTER V10	/	Combustión	De 10 a 80	Desconocido
	FLEXIGESTER SIB	/		5	Desconocido
HOME BIOGAS (Israel)	HOME BIOGAS 2	640 €	Combustión	1,3	492
MYGUG (Irlanda)	MYGUG	confidencial	Combustión	0,3 a 7,5	Confidencial
PUXIN (China)	PUXIN ABS 3,4 m ³	490 € - 650 €	Combustión	1,7	290-380
	PUXIN ABS 15 m ³	2 210 € - 2 830 €		13,3	166-212
SISTEMA BIO (Colombia, Kenia, India, México)	SISTEMA BIO	min 1 185 €	Combustión + Cogeneración	de 4 a 40	Desconocido
VIVESTY GREEN (India)	PORTABLE BIOGAS PLANT	415 € (digestor 1 m ³)	Combustión	0,5 a 3	415

5 Micrometanización: presentación de las tecnologías y unidades existentes

La micrometanización es utilizada principalmente en pequeñas explotaciones y entidades que quieren encontrar alternativas a la eliminación de sus residuos orgánicos.

Un estudio sobre micrometanización fue realizado en 2015 por AgroTech A/S en el marco del proyecto europeo "BioEnergy Farm II - Efluentes, un combustible sostenible para las granjas" [9]. Se realizó un censo de las unidades de metanización a pequeña escala en Europa. En los 13 países europeos estudiados, se registraron cerca de 875 instalaciones de metanización a pequeña escala (<100 kW) [9]. En la Figura 11 se ofrece el reparto de dichas unidades por países.

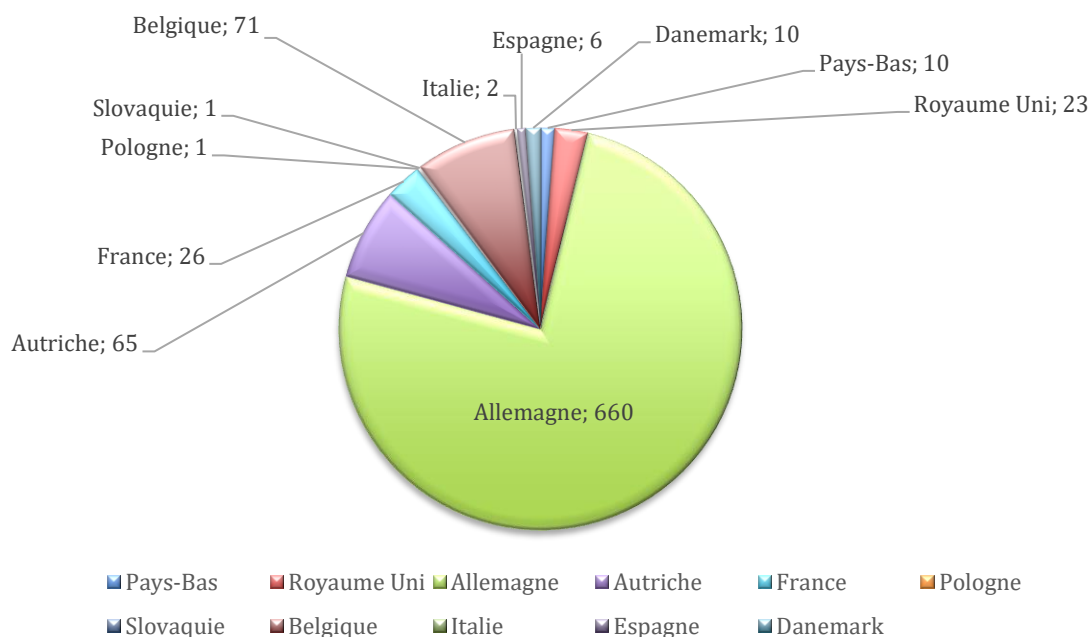


Figura 11. Esquema ilustrativo del número de unidades de micrometanización en Europa en 2015 (gráfica realizada con datos de [9])

Alemania tiene la mayoría de las unidades de pequeña escala instaladas en Europa. Francia va por detrás de Alemania, Bélgica y Austria en el desarrollo de estas unidades. En 2015, 26 unidades francesas fueron catalogadas [9]:

- Unas diez unidades en vía seca discontinua,
- Unas quince con mezcla infinita,
- Una unidad con cubierta flotante.

Más recientemente, el GERES realizó un censo, cuyo estudio se publicó en junio de 2020 [11]. Ha identificado 90 unidades de micrometanización en Francia con una potencia instalada < 80 kW o 20 Nm³ CH₄/h [11]. La base SINOE de ADEME recoge 836 unidades de metanización al 8/12/2020, representando la micrometanización en torno al 10% del parque de metanizadores en Francia [35]. Dichas unidades presentan las siguientes características [11]:

- Insumos de tipo agrícola en más del 90%,
- Valorización del biogás mediante cogeneración (80% de las unidades implicadas) y combustión directa por caldera (20% de las unidades),
- Potencia eléctrica instalada < 36 kW en el 25% de unidades,
- Funcionamiento en vía seca para el 13% de unidades.

Se presentan a continuación las principales tecnologías de micrometanización (lista no exhaustiva) clasificadas por categoría de residuos procesados{Cita}: biorresiduos, purines como sustrato base principal y sustratos mixtos.

5.1 Digestión de biorresiduos

5.1.1 EnWise (China)

5.1.1.1 Presentación

La empresa china EnWise ha desarrollado un digestor por vía seca (OSCAR) para el procesamiento de residuos orgánicos (biorresiduos, efluentes de ganadería) [36]. Las capacidades de tratamiento disponibles se establecen entre 500 kg y 30 toneladas/d.

La unidad en contenedor incorpora varios módulos (Figura 12):

- Pretratamiento con trituración para transformar la materia prima en lodo que se pueda bombear,
- Digestión mediante un procedimiento vía seca con agitador de paletas,
- Valorización del biogás por cogeneración tras la purificación,
- Post-tratamiento del digestato con separación líquido/sólido por flotación. La fracción líquida se procesa luego para eliminar el nitrógeno y el fósforo antes de su traspaso a una depuradora urbana. La fracción sólida se seca y se utiliza como enmienda orgánica.

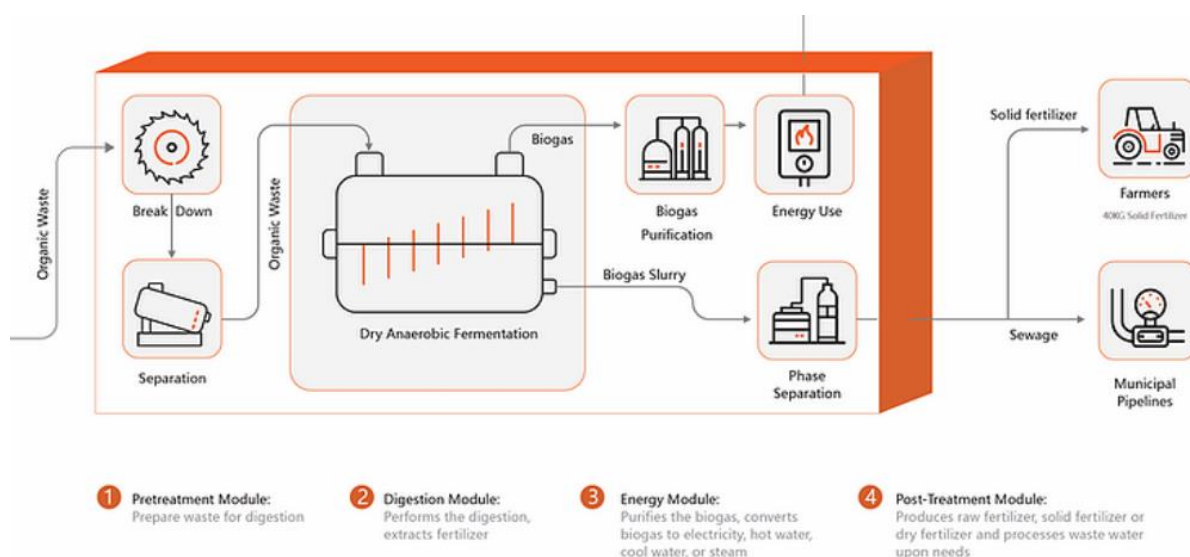


Figura 12. Esquema de principio del procedimiento OSCAR de Enwise [36]

5.1.1.2 Retorno de experiencia

Cinco unidades están funcionando a día de hoy, de las cuales 4 están en China, principalmente para el procesamiento de biorresiduos [36]. Dos unidades chinas llevan un cogenerador con una potencia instalada de 20 kW [36].

Actualmente, se está probando una unidad en Lyon dentro del marco del proyecto Decisive. Este proyecto europeo (septiembre 2016 – febrero 2021) reúne a 13 socios que tienen como objetivo diseñar programas innovadores para la gestión de biorresiduos urbanos [37].

El digestor, comprado por Suez e instalado en 2019, debe permitir el procesamiento de 50 tn/año de biorresiduos. El biogás se aprovecha mediante un motor de cogeneración Sirling de 1 kW y 8 kWth que no requiere una gran purificación del biogás [36][37]. El digestato se somete a una separación de fases. Las pruebas de retorno al suelo se realizan en invernadero con la fracción líquida higienizada (abono hidropónico). La fracción sólida se dirige al compostaje. El coste de esta unidad asciende a 150 000 € [11].

Otra unidad debería instalarse en España (Cataluña).

5.1.1.3 Resumen sintético de la tecnología Enwise

Tabla 14. Características de la tecnología Enwise

Insumos	Naturaleza	Biorresiduos sólidos
	Cantidad	50 a 10.800 tn/año 12% < MS < 32%
	Pretratamiento	Trituración
Digestor	Tecnología	Vía seca
	Volumen	No comunicado
	Temperatura	Mesófila o termófila
	Calefacción	sí
	Tasa de MS	No comunicado
	Agitación	sí
	Tiempo de permanencia	No comunicado
Biogás	Almacenamiento	2h de producción de biogás
	Producción	/
	Valorización	Cogeneración Calor Vapor Sistema de refrigeración
Digestato	Post-tratamiento	Separación de fases por flotación: ⇒ Fracción líquida: tratamiento del nitrógeno (annamox, nitrificación, desnitrificación) y del fósforo, ⇒ Secado de la fase sólida
Inversión		150 000 € para 1 kW Según el tipo de módulos seleccionado
Número de unidades funcionando		6 (5 en China y 1 en Francia)
Contacto		ENWISE 260 Yuantai Road, Baoshan District Shanghai China ✉ joy.luo@enwise.io https://www.enwise.io/

5.1.2 Bee & Co (Francia)

5.1.2.1 Presentación

Bee & Co (Bureau d'étude en Energie et Environnement et Contrôle commande) es una empresa francesa de 8 personas fundada en 2012 [39]. Ha desarrollado un sistema de micrometanizador en contenedor para el procesamiento de biorresiduos, llamado *BioBeeBox®* (Figura 13). Este dispositivo se destina a hipermercados, granjas, entidades territoriales, restauración colectiva, mercados alimentarios.



El sistema *BioBeeBox®* puede adaptarse al tratamiento de 80 a 1.500 toneladas al año de residuos.

Se ofrece para alquiler de larga duración o para venta.

Figura 13. Foto de la BioBeeBox® [39]

La BioBeeBox® se diseñó para el procesamiento de biorresiduos con su unidad de higienización/pasteurización (tratamiento térmico a 70°C durante una hora).

Se presenta el principio de funcionamiento de la BioBeeBox en la Figura 14.

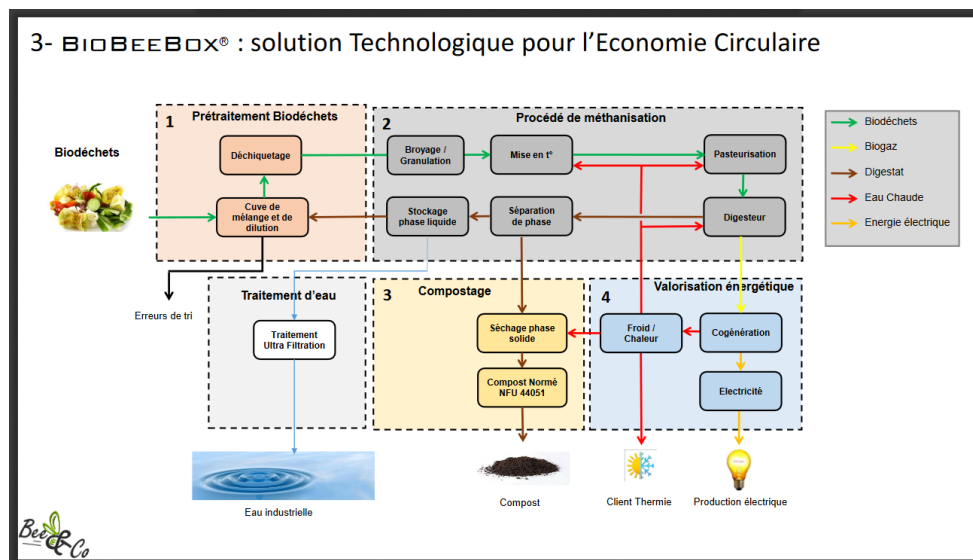


Figura 14. Esquema del funcionamiento de la BioBeeBox® [39]

La unidad de procesamiento incluye como mínimo dos contenedores. Un molino de tritución y granulación de 12 mm prepara el material para su pasteurización y posterior metanización. El biogás se deshumidifica, se desulfura y valoriza mediante cogeneración. En la unidad existe una caldera que permite consumir el biogás en caso de falta de disponibilidad del cogenerador.

Una vez realizada la metanización en los tanques de digestión, el digestato se somete a una separación de fases que genera:

- ⇒ Una fracción sólida compuesta mediante aeración forzada (ciclo de 14 días),
- ⇒ Una fracción líquida tratada mediante ultrafiltración para la producción de agua limpia o la dilución de insumos.

Por 300 toneladas de residuos procesados, la BioBeeBox® genera 10 toneladas de compost normalizado NFU44-051 y 200 m³ de agua.

5.1.2.2 Retorno de experiencia

Hoy en día, dos unidades BioBeeBox® se encuentran instaladas.

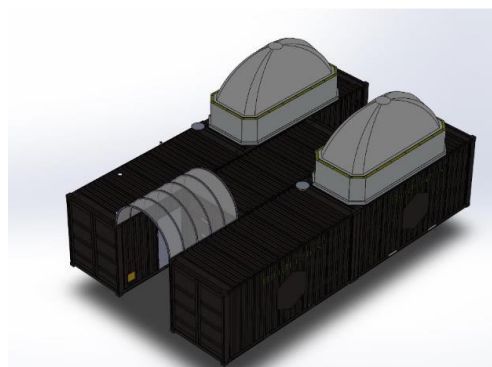
Prototipo BioBeeBox® en Burdeos

La unidad está instalada en el recinto del Mercado de Interés Nacional (MIN) de Burdeos desde julio de 2017. Este metanizador con una capacidad de 250 kg/d de materia orgánica (100 tn/año) está dotado de una caldera. El coste de la inversión asciende a 220.000 €.

El procesamiento de 32 toneladas de residuos permitió la producción de 1,6 tonelada de compost y 4.000 Nm³ de biogás [39].

Unidad BioBeeBox® en Vitry Sur Seine [39], [40]

La unidad se instaló en 2020 dentro del proyecto Vitry Bee'Z en asociación con la ciudad de Vitry sur Seine. Los biorresiduos



procesados provienen de la cocina central de Vitry-sur-Seine, del autoservicio municipal, de dos mercados al aire libre y de unas cuarenta escuelas de infantil y primaria.

Un vehículo alimentado con GNV realiza la recogida de los residuos cerca de la planta del micrometanizador [39].

Figura 15. Ejemplo de diseño modular de la BioBeeBox® de VITRY [39]

La unidad consta de seis contenedores (Figura 15):

- un contenedor de carga de 40',
- dos contenedores de digestión con capacidad total para 400 tn/año de residuos,
- un contenedor para la cogeneración (10 kW),
- un contenedor para el aprovechamiento del digestato.

Se dimensionó para procesar 300 tn/año de biorresiduos y producir:

- Aproximadamente 30.000 Nm³/año de biogás,
- 60 MWh/año de energía eléctrica comercializada,
- 90 MWh/año de energía eléctrica para el autoconsumo del dispositivo,
- 10 tn/año de compost normalizado y 200 m³/año de agua industrial (ultrafiltrada) que se utilizarán para los parques y jardines de Vitry sur Seine.

Un demostrador permitirá producir agua desmineralizada mediante ósmosis inversa.

La inversión total de este proyecto asciende a 690.000 euros, con un coste de explotación de unos 118.000 euros al año, incluidos los costes de recogida [40].

5.1.2.3 Resumen sintético de la tecnología BioBeeBox

Tabla 15: Características de la tecnología [41]

Insumos	Naturaleza	Biorresiduos sólidos
	Cantidad	80 a 1 500 tn/año
Digestor	Pretratamiento	Trituración + pasteurización
	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	No comunicado
	Temperatura	Mesófila
	Calefacción	Calentador de agua
	Tasa de MS	8 - 14%
	Agitación	sí
	Tiempo de permanencia	24 días
Biogás	Almacenamiento	Lona flexible de doble membrana
	Producción	100 Nm ³ biogás/tonelada de residuos
	Valorización	Cogeneración (motor 10 kW) + Caldera
Digestato	Post-tratamiento	Separación de fases, luego: ⇒ Ultrafiltración fase líquida ⇒ Compostaje fase sólida
Inversión		180-1 700 000 € (+ IVA)
Número de unidades funcionando		2 y un proyecto en Comoras para 2021 según el formato de Vitry
Contacto		Bee and Co Rue de la gabarre 33270 Floirac ✉ contact@biobeebox.fr Véronique Perez (Presidente).

5.1.1 SEaB Energy (Reino Unido)

5.1.1.1 Presentación [42]

SEaB Energy es una empresa inglesa creada en 2009. Su sede está en Londres, pero la empresa instala unidades en Inglaterra y en el extranjero: Portugal, Francia, España, Estados Unidos, Corea, Australia y Suráfrica.

Ha patentado dos tecnologías de digestión anaeróbica montadas en contenedores para una instalación compacta y rápida. Esta patente es ahora válida en Francia y una sucursal de SEaB Energy debería instalarse en Francia en 2021.

- El Muckbuster®

El Muckbuster se creó para procesar residuos agrícolas (purines y estiércol). Una bomba alimenta el digestor y se utiliza un cogenerador para aprovechar el biogás. Los residuos sólidos pueden introducirse en un dispositivo optativo de pretratamiento antes de entrar en el digestor [43].

- El Flexibuster™

Este procedimiento se ha diseñado para procesar residuos orgánicos alimentarios.

Este contenedor está totalmente automatizado con:

- una zona de alimentación en insumos,
- una zona de digestión,
- una zona de almacenamiento del biogás generado.

Un detector de gases provoca la parada del sistema en caso de fuga [44].

La mayor unidad instalada tiene una potencia de 180 kW.



Figura 16. Representación Flexibuster™ [43]

Las cargas orgánicas aplicadas para ambas tecnologías entran en el rango de 1 a 5 kg MSV⁷/m³/día.

5.1.1.2 Retorno de experiencia

Flexibuster™ en Thiverval-Grignon (78 850)

Un digestor de SEaB Energy está instalado en Francia en SEPUR, un grupo independiente especializado en la recogida y el tratamiento de residuos. El Flexibuster™ se utiliza para el tratamiento de biorresiduos procedentes de mercados, supermercados, productores y de la restauración individual y colectiva [44]. Los residuos son frutas y verduras y SPAN de categoría 3 (residuos de carnicería y pescadería, leche, huevos...).

La unidad desarrollada por SEaB Energy para la empresa SEPUR consta de:

⁷ MSV: Materia Seca Volátil

- 1 contenedor de recepción de insumos. Los residuos se introducen en una tolva, luego se maceran y se mezclan con el digestato.
- 5 contenedores “digestores” apilables de 1,2 tn/d de capacidad cada uno,
- 1 contenedor de almacenamiento del gas generado (18 m³),
- 1 contenedor para el control del sistema y la higienización de digestatos,
- 1 generador para la producción de calor y electricidad (50 kW).



Figura 17. Foto del sistema Flexibuster™ instalado en la planta de SEPUR [44]

Los digestatos son líquidos debido al bajo contenido de materia seca en el digestor (3%). Una parte se recircula con los residuos y el excedente (2,4 tn/d) se higieniza e incorpora a un proceso de compostaje.

El coste de la unidad ascendió a 575.000 € (+ IVA)

5.1.1.3 Resumen sintético de las tecnologías Muckbuster® y Flexigester™

Tabla 16. Presentación de las tecnologías de SEaB Energy [45]

		Muckbuster®	Flexibuster™
Insumos	Naturaleza	Líquido + Sólido (purines y/o estiércol)	Líquido + Sólido (biorresiduos)
	Cantidad	180 a 1 080 tn/año	180 a 1 080 tn/año
	Pretratamiento	Trituración / higienización	Trituración / higienización
Digestor	Tecnología	Mezcla infinita	Mezcla infinita
	Volumen	No comunicado	No comunicado
	Temperatura	Mesófila	Mesófila
	Calefacción	sí	sí
	Tasa de MS	Del 3% al 10%	Del 3% al 10%
	Agitación	sí	sí
	Tiempo de permanencia	No comunicado	No comunicado
Biogás	Almacenamiento	18 m ³	18 m ³
	Producción	No comunicado	Hasta 120 m ³ /día/digestor [46]
	Valorización	Cogeneración/ Calefacción 8 – 65 kW	Cogeneración/ Calefacción 10-50 kW
Digestato	Post-tratamiento	Separación de fase / Pasteurización Compostaje	Separación de fase / Pasteurización Compostaje
Inversión		300.000 a 400.000 € (+ IVA) para 50 kW	180.000 € a 600.000 € 575 000 € (+ IVA) para 50 kW [46]
Número de unidades funcionando		10	40
Contacto		SEaB Power Ltd 41 Luke Street, Londres Inglaterra Sandra Sassow (cofundadora) ✉ sandrasassow@seabenergy.com https://seabenergy.com/about-seab/	

5.1.1 Tryon (Francia)

5.1.1.1 Presentación

Tryon es una empresa francesa creada en abril de 2015 en torno a la metanización local de biorresiduos alimentarios (peladuras, restos de comidas, productos caducados...). Esta empresa propone un sistema de metanización a pequeña escala para tratar y valorizar los residuos orgánicos procedentes de actividades económicas (plantas de procesamiento de alimentos, supermercados, restaurantes) y de los hogares. La instalación *Modul'O* (Figura 18) está diseñado con módulos estándar y prefabricados sencillos para realizar una mínima obra civil y una implementación sencilla y rápida en zonas periurbanas. El objetivo de TRYON es desarrollar una mini estructura autofinanciada con todos los servicios necesarios (recogida selectiva, gestión de digestatos...) que pueda ser replicada y adaptada a diferentes centros de transformación de alimentos, pequeños municipios, o incluso ciudades de tamaño medio [47].

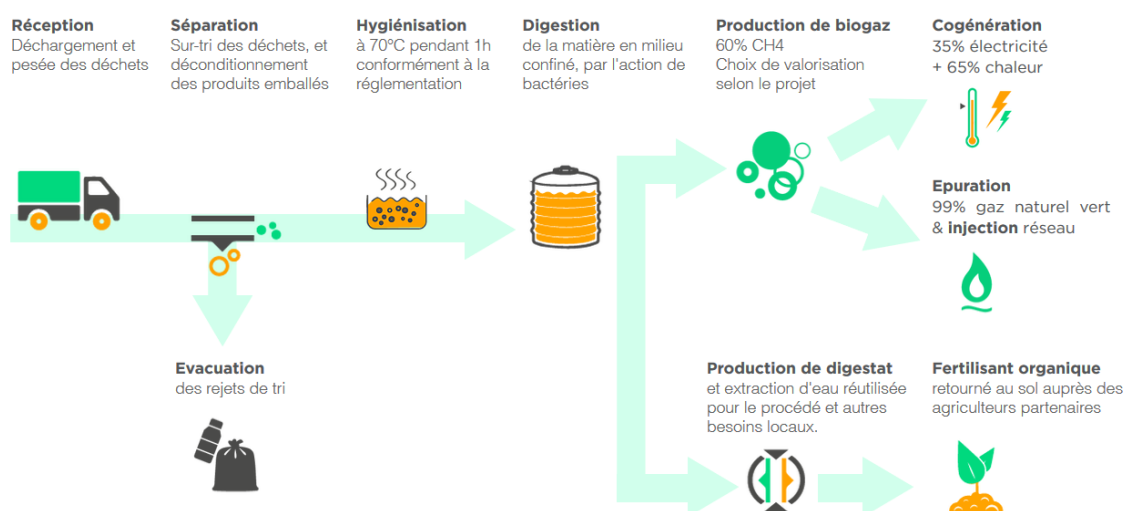


Figura 18. Representación de una estructura de digestión según el proceso Modul'O [47]

Cada módulo de digestión puede procesar 1.000 tn/año. Pueden unirse para alcanzar la capacidad de tratamiento requerida (

Figura 19).

La capacidad de tratamiento de una unidad puede variar entre 1.000 y 8.000 tn/año de residuos. La recuperación del biogás se hará por cogeneración para las capacidades más pequeñas, la inyección en la red de gas natural puede contemplarse a partir de 3.000 tn/año.



Figura 19. Representación de una planta Modul'O [47]

5.1.1.2 Retorno de experiencia

El Modul'O se instalará por primera vez en 2021 en asociación con la mancomunidad ValoSeine. El departamento de Yvelines y Sodexo, a través de la empresa CMIDY, han adjudicado a TRYON un contrato para la gestión completa de los residuos alimentarios de los comedores de los 116 centros de enseñanza secundaria del departamento. La unidad entrará en funcionamiento a partir del

segundo trimestre de 2021 con una capacidad de tratamiento inicial de 4.000 tn/año que se irá incrementando progresivamente hasta 8.000 tn/año. El biogás producido se depurará antes de su inyección en la red de gas natural. En cuanto al digestato, se almacenará en otra planta y será utilizado por los agricultores [47].

5.1.1.3 Resumen sintético de la tecnología Modul'O

Tabla 17. Presentación de la tecnología Modul'O de TRYON

Insumos	Naturaleza	Biorresiduos sólidos
	Cantidad	1000 a 8 000 tn/año
	Pretratamiento	Desembalaje ⁸ + trituración + higienización (70°C, 60 min, 12 mm)
Digestor	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	20 a 100 m ³
	Temperatura	Mesófila
	Calefacción	Sí (un 25% de la producción de biogás se utiliza para calefacción)
	Tasa de MS	10 a 20%
	Agitación	sí
	Tiempo de permanencia	Aproximadamente 30 días
Biogás	Almacenamiento	25 a 80 m ³
	Producción	700 a 7000 MWh/año
	Valorización	Cogeneración a partir de 30 kW Depuración+ Inyección en la red de gas
Digestato	Post-tratamiento	Extendido directo o extracción del agua mediante separación de fase forzada para aprovechar la fracción sólida en compost
Inversión		700.000 a 5.000.000 € (+ IVA)
Número de unidades funcionando en Francia		1 en construcción
Contacto		Tryon 46 rue René Clair 75018 Paris ✉ sebastien@tryon-environnement.com https://www.tryon-environnement.com/le-modul-o

5.2 Digestión de purines en sustrato base principal

5.2.1 Bioelectric (Bélgica) / Agripower

5.2.1.1 Presentación

Bioelectric es un grupo especializado en "miniunidades de metanización estándar" implantado por toda Europa. Esta empresa de origen belga, creada en 2009, se dedica a la producción en serie de equipos de metanización para limitar los costes y simplificar las operaciones de entrega y montaje. Agripower Francia instala las unidades Bioelectric en Francia.

Los equipos propuestos por Bioelectric están destinados a explotaciones ganaderas con un mínimo de 1.500 m³/año de estiércol (es decir, entre 100 y 200 vacas lecheras estabuladas con rascado del suelo y producción de estiércol).



⁸ Tratamiento que separa los biorresiduos envasados de su embalaje.

La unidad se compone del digestor y de un contenedor técnico (Figura 20) que ocupan unos 500 m² de terreno.

Figura 20. Unidad de metanización instalada por Bioelectric [48]

El proceso puede ser totalmente automatizado con alimentación y extracción por bombeo. El control remoto puede ser realizado por Bioelectric con seguimiento del ganadero (a razón de 20 a 30 minutos/día de trabajo según Bioelectric) [48].

El digestor (de 10, 13 o 15 m de diámetro) es de acero inoxidable con aislamiento de *Styrodur* y un circuito de calefacción en el piso y las paredes. La agitación se realiza mediante un agitador con motor externo. El tiempo de permanencia de los purines en el metanizador es de entre 20 y 25 días. El gasómetro (de doble membrana) está equipado con un sistema de desulfuración y control de la presión.

La cogeneración se coloca en un contenedor técnico. Existen varias potencias disponibles, desde 11 kW hasta 77 kW. Las potencias típicas son de 33 y 44 kW, que corresponden a explotaciones ganaderas de 150 a 200 bovinos [49].

La electricidad generada por los motores de cogeneración puede ser inyectada en la red y el calor utilizado para calentar la planta.

La obra requerida para instalación de una unidad incluye [48]:

- Movimiento de tierras,
- Realización de una losa de hormigón para soportar el contenedor y el digestor,
- Realización de zanjas,
- Conexión del contenedor a las redes de agua y electricidad,
- Instalación de la bomba de alimentación en la fosa de purines.

5.2.1.2 Retorno de experiencia

Encontramos las referencias de Bioelectric en Francia en el Norte y Noroeste de Francia [48].

La **cooperativa Unéal en Saint-Laurent-Blangy (62 223)** está equipada con una unidad de metanización Bioelectric desde 2018 [50]. La planta de biogás procesa el estiércol de 140 vacas (Figura 21).



Cantidad de insumos: 12 m³/día de purines

Valorización del biogás: 264.000 kWh/año eléctricos
+ 337.424 kWh/año térmicos

Inversión: 240.000 € (metanizador + fosa previa +
conexión a la red)

Tiempo de retorno de la inversión: 7 años

Figura 21. Instalación Bioelectric en la cooperativa Unéal [50]

Oelegem, Bélgica

En 2013, se instaló una unidad Bioelectric en Oelegem (Bélgica). Se presentan las claves de dicha unidad en la Tabla 18.

Tabla 18. Retorno de experiencia de una instalación Bioelectric en Oelegem [51]

Digestión	Cantidad de insumos (purines)	2.900 m ³ /año
	Volumen digestor	240 m ³
	Temperatura de funcionamiento	35°C - 40°C
	Tiempo de permanencia	25 días
Producción	Cantidad de biogás	24 m ³ /tonelada de purines
	Potencia del motor	19,4 kW
Valorización del calor		73%
Inversión	Inversión	150.000 € (+ IVA) (o 7 732 € (+ IVA)/ kW instalado)
	Ingresos anuales brutos	43.404 €
	Coste mantenimiento anual	6.000 €
	Tiempo de retorno de la inversión	4 años

5.2.1.3 Resumen sintético de la tecnología Bioelectric

Tabla 19. Características de la tecnología Bioelectric

Insumos	Naturaleza	Sólo purines
	Cantidad	2.900 a 5.600 m ³ /año (22 a 44 kW)
Digestor	Pretratamiento	Ninguno
	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	200 m ³ - 300 m ³ - 450 m ³ (10-13-15 m de diámetro y 2,5 m de alto)
	Temperatura	Mesófila (42°C)
	Calefacción	Sí
	Tasa de MS	<10%
	Agitación	Sí
	Tiempo de permanencia	22 a 26 días
Biogás	Almacenamiento	Lona (20 m ³ - 50 m ³ - 75 m ³)
	Producción	24 m ³ /tonelada de purines
	Valorización	Cogeneración (11 a 77 kW) + Calefacción
Digestato	Post-tratamiento	ninguno
Inversión	22 kW	220.000 € (+ IVA)
	33 kW	300.000 € (+ IVA)
	44 kW	350.000 € (+ IVA)
Número de unidades funcionando		200 en Europa 65 a 70 unidades en Francia
Contacto		Agripower France Boulevard Ampère 44 470 Carquefou Francia Eric Lecoq (Director General) ☎ 02 28 06 05 90 ✉ contact@agripower-france.com https://www.agripower-france.com/

Agripower Francia propone una solución de metanización por vía seca discontinua para tonelajes de unos 3.000 tn/año de estiércol - 33 kW. La comercialización de este procedimiento acaba de empezar.

Tabla 20. Características de la tecnología por vía seca – Agripower [49]

Insumos	Naturaleza	Sólo estiércol
	Cantidad	3 000 tn/año
Digestor	Pretratamiento	Ninguno
	Tecnología	Vía seca discontinua
	Volumen	300 m ³ (4 contenedores de 75 m ³)

	Temperatura	Mesófila (42°C)
	Calefacción	sí
	Tasa de MS	Entre un 25 y un 50% MS
	Agitación	no
	Tiempo de permanencia	40 - 55 días
Biogás	Almacenamiento	Gasómetro intermedio
	Producción	80 m ³ /tonelada de estiércol
	Valorización	Cogeneración (33 kW)+ Calefacción
Digestato	Post-tratamiento	Ninguno
Inversión	33 kW	300.000 € (+ IVA)
Número de unidades funcionando		Comercialización en curso
Contacto		Agripower France Boulevard Ampère 44 470 Carquefou Francia Eric Lecoq (Director General) ☎ 02 28 06 05 90 ✉ contact@agripower-france.com https://www.agripower-france.com/

5.2.2 Mcube (Francia)

5.2.2.1 Presentación

El proyecto MCUBE, cofinanciado por la Unión europea, tuvo lugar durante el periodo 2015 - 2019 para el desarrollo de una solución de Micrometanización Modular [52].

Reúne a distintos socios:

- Ovalie Innovation (filial de innovación de los grupos de cooperativas agrícolas Maïsadour y Vivadour) como representante del grupo,
- 2 empresas: Atelier des Graves (31), SIREA (81)
- Centros de investigación: INP Purpan (31), INSA CRITT GPTE (31).
- Entidades institucionales: ADEME, Región Occitania, Unión Europea por medio de FEDER.

El procedimiento MCube consiste en una lona flotante instalada sobre los tanques existentes para la recuperación del biogás producido. Para maximizar la producción, se instala en el tanque un dispositivo de calentamiento y agitación. Un "cubo de metanización" integra los equipos técnicos: autómata de control, bombeo, agitación, calentamiento, herramientas de depuración [53].



Figura 22. Instalación MCube (Fuente: Ovalie Innovation)

La valorización del biogás generado se realiza actualmente en cogeneración (las potencias van desde 36 hasta 62 kW). Se están estudiando otras formas de aprovechamiento. En particular, está en marcha un proyecto de investigación para desarrollar una solución de micropurificación, que permitiría la valorización del biometano en inyección en las redes de gas. En efecto, los bajos caudales de biogás producidos no son, hoy en día, compatibles con las depuradoras existentes en el mercado.

Esta tecnología de micrometanización es modular y estandarizada para una instalación rápida y un coste optimizado. La empresa Enaccess, filial de Ovalie innovation, se creó para facilitar la implementación de la tecnología MCube. Los trámites administrativos, las inversiones y la explotación

del micrometanizador correrán a cargo de Enaccess, que contratará la compra de los purines a los productores [53].

5.2.2.2 Retorno de experiencia

Hoy en día, se encuentran instaladas dos unidades piloto con potencias de 36 kW:

- Una unidad en Gers (Barcelone-sur-Gers) para el tratamiento de purines de patos,
- Una unidad en la Granja experimental de Lamothe de la Escuela de Ingenieros de Purpan, en Seysses para la digestión de efluentes bovinos.

En 2021, se prevé la instalación de 5 nuevas unidades de micrometanización en las Regiones de Nueva-Aquitana y Occitania. Con la entrada en servicio de dichas unidades se podrá probar el modelo desarrollado por Enaccess antes de implementar esta tecnología a mayor escala.

5.2.2.3 Resumen sintético de la tecnología MCube

Tabla 21. Presentación de la tecnología MCube

Insumos	Naturaleza	Efluentes y residuos agrícolas
	Cantidad	1.000 a 10.000 tn/año
	Pretratamiento	no
Digestor	Tecnología	Mezcla infinita cubierta de la fosa de almacenamiento de purines + añadido calefacción y agitación
	Volumen	Tanque/fosa existente
	Temperatura	30°C
	Calefacción	sí
	Tasa de MS	No comunicado
	Agitación	Burbujeo de biogás
	Tiempo de permanencia	De media unos 6 meses
Biogás	Almacenamiento	Bajo cubierta
	Producción	No comunicado
	Valorización	Cogeneración
Digestato	Post-tratamiento	Sin objeto
Inversión		300.000 € - 500.000 € (+ IVA) para una unidad de 36 kW (1.000 m³/año de purines + sustratos complementarios)
Número de unidades funcionando en Francia		2 unidades piloto: 5 en proyecto
Contacto		Ovalie Innovation Mme Anne-Marie Busuttil ✉ Annemarie.busuttil@ovalie-innovation.com ☎ 06 37 76 35 82 https://ovalie-innovation.com/projetmcub/

5.2.3 Nénufar (Francia)

5.2.3.1 Presentación

Nénufar es una PYME francesa especializada en la valorización del biogás generado en fosas de almacenamiento. La PYME ha desarrollado la cubierta Nénufar (Figura 23) que se adapta a la geometría de las fosas existentes y a la presencia de agitadores [54].

Se consideran cuatro posibles beneficios con este procedimiento [55]:

- Reducción de las molestias olfativas y de las emisiones de GES relacionados en el almacenamiento de purines,
- Conservación del valor fertilizante (nitrógeno) de los purines con limitación de las emisiones de amoníaco,

- Limitación de volúmenes para extender previniendo la entrada de pluviales,
- Valorización del biogás generado durante el almacenamiento.



Figura 23. Cubierta Nénufar [55]

La cubierta es una lona lastrada en los purines por un toro neumático en el que se coloca un toro de agua que permite el hundimiento de unos diez centímetros de profundidad. En caso de sobrepresión, el biogás puede escapar por el espacio entre la pared de la fosa y la cubierta.

Para las instalaciones de metanización ya en funcionamiento, la cubierta Nénufar puede instalarse en las fosas de digestato o fosas previas de insumos para capturar el biogás y optimizar la producción de metano.

Nénufar propone la instalación de unidades completas que integran las tuberías de biogás, una bomba impelente ATEX (transporte y presurización del biogás), un analizador de gases (CH_4 , CO_2 , H_2S , O_2), un caudalímetro de biogás, un tratamiento del biogás (por inyección de oxígeno o filtro de carbón activo) así como su aprovechamiento.

El biogás puede aprovecharse en la producción de calor (una caldera) o con un cogenerador (36 kW).

5.2.3.2 Retorno de experiencia

La primera unidad Nénufar se instaló en la granja experimental de Grignon en Thiverval-Grignon (78 850) en 2014 [56].

La lona se colocó sobre una fosa de purines de 25 m de diámetro con una capacidad de 1.500 m³ (Figura 24). La explotación produce 5.500 m³ de purines de bovino cada año.

El biogás se almacena en la lona, dirigiéndose luego hacia una caldera de 240 kW que se utiliza para calentar el agua necesaria para los procesos de lechería (pasteurización).

En esta unidad, no se instaló ningún sistema de calefacción. Por tanto, la producción de biogás depende de la temperatura y fluctúa a lo largo del año. Se estima un ahorro de 10.000 euros/año en el consumo de combustible.



Figura 24. Foto de la instalación Nénufar en la unidad Multiporc de l'Aire (criadero porcino, valorización caldera). Fuente: Nénufar.

Se instalará una unidad de metanización en el emplazamiento para el tratamiento del estiércol. La fosa de purines existente se transformará en un depósito de almacenaje del digestato. La cubierta de Nénufar permanecerá en su lugar y permitirá recuperar el biogás y dirigirlo a la depuradora del nuevo proyecto de metanización.

Gaec de Pécané, en Bréhan [57]

Los socios del Gaec de Pécané han equipado su fosa de purines con una cubierta Nénufar (30 m de diámetro) para su explotación lechera de 150 vacas. Esta fosa de 3.500 m³ permite una autonomía de almacenamiento de 9 meses. Dado el volumen, el tiempo de permanencia de los purines en la fosa es largo, permitiendo una producción máxima de biogás. El tiempo de trabajo para la explotación de esta unidad se estima en 2 h/semana por parte de los ganaderos sin contar el seguimiento diario de la instalación.

La inversión ascendió a 260.000 euros por la cobertura de la fosa, los 3 agitadores permanentes de 15 kW, el motor de cogeneración de 36 kW sobre una losa de hormigón y protegido en un cofre aislado, la bomba impelente, el analizador de biogás, el sistema de tratamiento con carbón activo, así como la red de calor que da servicio a un gallinero de 1.000 m² y a la vivienda. Parte del calor se utiliza para calentar parcialmente la fosa mediante serpentines de agua caliente y aumentar la temperatura de los purines en unos 5°C.

El ahorro de gas para calentar el gallinero se estima en 1.500 a 2.000 euros al año. El proyecto ha recibido apoyo financiero de la Región de Bretaña (60.000 euros) y de ADEME (24.000 euros). La amortización de la inversión se calcula en 6 años (una vez deducidas las ayudas).

En el estudio técnico-económico de Émilie Bondoerffer se presentan otros retornos de experiencia [55]. Se resumen los elementos claves de dichos retornos de experiencia en la Tabla 22.

Tabla 22. Ejemplos de explotación con cubierta Nénufar [55]

Planta	Cantidad de insumos/año alimentando la fosa cubierta por el procedimiento Nénufar	Capacidad de la fosa m ³	Valorización biogás
Centro porcino de Guernevez (29)	500 m ³ purines porcino	300	Calefacción
SARL Fertiwatt en Fougerolles-du-Plessis (53)	Digestato de metanización	8 000	Cogeneración
SCEA de Neuville (36)	5500 m ³ purines porcino	3 400	Calefacción caldera de 70 kW
EARL de Quistillic (29)	1700 m ³ purines bovino	500	Calefacción
EARL de l'Avenir (44)	Digestato de metanización	2 300	Cogeneración

5.2.3.3 Resumen sintético de la tecnología Nénufar

Tabla 23. Presentación de la tecnología Nénufar [57]

Insumos	Naturaleza	Purines bovino y porcino / digestato
	Cantidad	1.500 tn/año (mínimo) a 30.000 tn/año ⁹
	Pretratamiento	no
Digestor	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	Tanque de almacenamiento existente
	Temperatura	Psicrófila
	Calefacción	sí
	Tasa de MS	2% (purines de terneros) al 11-12% (vacas lecheras con camas de paja)
	Agitación	Depende de la instalación existente
	Tiempo de permanencia	Depende del tamaño del tanque de almacenamiento
Biogás	Almacenamiento	Gasómetro

⁹ Ganaderías porcinas

	Producción	No comunicado
	Valorización	Cogeneración (ganadería lechera > 100 vacas) / Calefacción
Digestato	Post-tratamiento	Sin post-tratamiento
Inversión		50.000 € - 170.000 € (+ IVA) para la cubierta 260.000 € (+ IVA) para una instalación completa de 36 kW
Número de unidades funcionando en Francia		50
Contacto		Nénufar SAS 127 rue Charles Tillon (Bâtiment B7) 93 300 Aubervilliers Francia ☎ 09 86 32 84 84 Rémy Engel (Director General) ✉ r.engel@nenufar.fr http://nenufar-biogaz.fr/

5.2.4 PlanET (Alemania)

5.2.4.1 Presentación

PlanET es una empresa alemana fundada en 1998. En la actualidad cuenta con más de 180 empleados en oficinas técnicas en Alemania, Países Bajos, Francia y Canadá. Se han instalado 450 plantas de biogás de PlanET en todo el mundo, incluidas más de 50 plantas en Francia [58].

PlanET comercializa el digestor “VALENTIN” con potencias instaladas que van desde 40 hasta 150 kW. El equipo es de tipo modular y premontado en fábrica para permitir una construcción rápida que suele durar entre 2 y 3 semanas sobre una losa de hormigón dispuesta previamente [58]. El digestor es de acero inoxidable.

Se comercializan dos módulos, cuyas principales características se presentan en la Tabla 24 [58].

Tabla 24. Características técnicas de los módulos Valentin [59].

	Valentin 600	Valentin 900
Volumen de digestión	580 m ³	891 m ³
Diámetro	16,5 m	20,5 m
Cantidad máxima de sustrato procesado por 30 días de tiempo de permanencia	19 m ³ /d 7.000 m ³ /año	29,5 m ³ /d 10.500 m ³ /año
Potencia	40 – 80 kW	60 - 150 kW
Volumen del gasómetro	600 m ³	900 m ³

5.2.4.2 Retorno de experiencia

Una unidad Valentin se encuentra instalada en la SARL Novalait de Graffigny-Chemin (52150) desde noviembre de 2018 (Figura 25). La ganadería consta de 340 vacas lecheras, 60 terneros y 40 vacas Jersey [59]. La unidad de metanización 100% purines incorpora una cisterna de 50 m³, un digestor de 600 m³ con calefacción (en piso y pared), un agitador eco@mix y un cogenerador de 50 kW [58][59].



Figura 25. Foto de la instalación PlanET en la SARL Novalait [61]

La electricidad se vende a EDF y el calor se utiliza para producir agua caliente para la sala de ordeño. El digestato se esparce para fertilizar los cultivos. El tiempo de supervisión de la unidad se limitaría a unos minutos al día, más el vaciado del motor cada 2 semanas [59]. El coste de inversión fue de 500.000 € [60].

5.2.4.3 Resumen sintético de la tecnología PlanET

Tabla 25. Presentación de la tecnología Valentin de PlanET

Insumos	Naturaleza	Efluentes y residuos agrícolas
	Cantidad	7 000 – 10 000 m ³ /año
	Pretratamiento	Sin objeto
Digestor	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	580 - 891 m ³
	Temperatura	Mesófila
	Calefacción	Sí
	Tasa de MS	<10%
	Agitación	eco@mix
Biogás	Tiempo de permanencia	30 días (varía según los proyectos)
	Almacenamiento	600-900 m ³
	Valorización	Cogeneración: 40 – 150 kW
Digestato	Post-tratamiento	Según necesidad
	Inversión	450.000 – 500.000 € (+ IVA) (50 kW)
Número de unidades funcionando en micrometanización < 80 kW		En el mundo: 450 En Francia: 50
Contacto		Biogaz PlanET France Rue Ampère 35 340 Liffre Francia ☎ 02 23 25 56 50 ✉ info@biogaz-planet.fr Ph. DERU Tel. 03 25 01 04 99 contact@phderu.fr http://slurry-to.energy/fr/ http://www.biogaz-planet.fr/

5.3 Digestión de sustratos mixtos

5.3.1 Agrikomp (Alemania)

5.3.1.1 Presentación

AgriKomp es una empresa alemana cuya filial AgriKomp Francia se fundó en 2006 [62]. Especializada en la metanización a pequeña escala, la empresa ha instalado 950 unidades en el mundo. Agrikomp propone soluciones de valorización del biogás mediante cogeneración o inyección en la red, para potencias desde 55 kW hasta unos pocos MW [63].

Las soluciones AgriSelect se ofrecen para las más pequeñas unidades, se adecuan a explotaciones de más de 70 UGB¹⁰. La potencia instalada puede ir desde 50 hasta 195 kW en cogeneración [64]. Se utilizan módulos estándar y premontados para reducir el tiempo de realización.

Estas unidades (Figura 26) suelen incluir:

- un sistema de introducción de la materia sólida (Vielfrass®),
- una fosa FormProtect,

¹⁰ UGB o “Unité Gros Bétail” (unidad de ganado mayor) es un tipo de conversión de los animales en unidad energética que permite calcular las necesidades energéticas de una granja.

- una membrana de almacenamiento de gas (Biolene®),
- un agitador de paletas (Paddeligant®),
- un cogenerador.

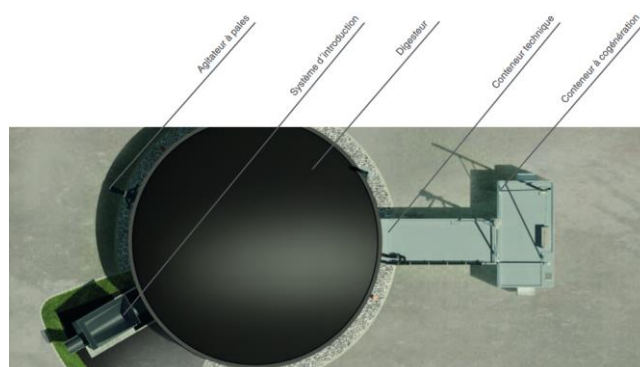


Figura 26. Unidad de metanización AgriSelect [65]

Se presentan varios ejemplos de soluciones de micrometanización en el folleto AgriSelect [11] (Tabla 26).

Tabla 26. Inventario de soluciones de cogeneración de AgriKomp [63]. Sólo se presentan ejemplos de potencia ≤ 100 kW.

Potencia en kW	55	80	100
Diámetro digestor (m)	13	13	16
Cantidad de insumos a título de ejemplo (tn/año)	1950 purines bovinos 780 estiércol bovinos 400 ensilados 80 rechazos de pesebre 80 paja menuda	2800 purines bovino 1100 estiércol bovino 450 ensilados 150 rechazos de pesebre 100 paja menuda	3500 purines bovino 1500 estiércol bovino 450 ensilados 150 rechazos de pesebre 150 paja menuda
Vacas lecheras	65	90	120
Producción electricidad kWh/año	457.710	665.760	832.200
Producción calefacción kWh/año	583.335	773.946	915.420

5.3.1.2 Retorno de experiencia

La lista de referencias de AgriKomp está disponible en su página web [64]. La mayor parte de las potencias instaladas se sitúa entre 150 y 250 kW. Agrikomp construye pocas unidades de micrometanización, cuya rentabilidad es menor que la de los proyectos más grandes. En 2011, se instaló una unidad de bajo potencia. Se presenta a continuación.

GAEC de Gros Chêne (41700 Couddes)

En 2011 se instaló una unidad a medida con una capacidad instalada de 75 kW para la digestión de sustratos agrícolas (Figura 27,

Figura 28) [64].



APESA

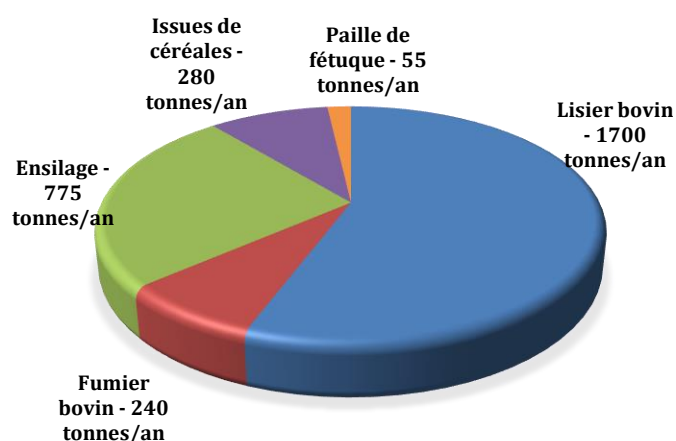


Figura 27. Foto de la instalación AgriKomp en el Gaec de Gros Chêne

Figura 28. Reparto de los tonelajes de insumos AgriKomp en el Gaec de Gros Chêne

La unidad procesa 3.050 tn/año de residuos agrícolas generando 2.795 m³/año de digestato.

5.3.1.3 Resumen sintético de la tecnología Agrikomp

Tabla 27. Presentación de las tecnologías de micrometanización propuestas por AgriKomp

Insumos	Naturaleza	Estiércol, purines, desechos de cereales, ensilados
	Cantidad	> 4 500 tn/año
Digestor	Pretratamiento	Higienización: térmica Cooker®
	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	No comunicado
	Temperatura	Mesófila
	Calefacción	sí
	Tasa de MS	Hasta un 12%
	Agitación	sí
Biogás	Almacenamiento	Tanque con membrana Biolene® (EPDM)
	Valorización	Cogeneración (mínimo 55 kW)
Digestato	Post-tratamiento	Separación de fase Quetschprofi® (criba fina y cilindro neumático)
Inversión		9.000 € (+ IVA) /kW [57]
Número de unidades funcionando		130 en total en Francia. Más de 950 unidades de metanización en el mundo. Pocas referencias en micrometanización (< 85 kW).
Contacto		AgriKomp France rue Franciade 41 260 La Chaussée St Victor Francia Bastien VERDIER (Técnico comercial biogás Suro3este) ✉ b.verdier@agrikomp-biogaz.fr ☎ 02 54 56 18 57 www.agrikomp.fr

5.3.2 Enerpro Biogaz (Francia)

5.3.2.1 Presentación

Enerpro Biogaz, empresa francesa creada en 2015, propone distintos módulos de micrometanización por vía seca y líquida destinados a los sectores agrícolas, a las cerveceras y a las queserías [56]. Hoy en día, da empleo a 4 personas.

Cuatro módulos se comercializan a fecha de hoy:

- Módulo Compact (Capacidad de 10 o 20 m³)

Este módulo patentado está dedicado al tratamiento de pequeños volúmenes de efluentes líquidos (purines, lactosuero, efluentes orgánicos) en funcionamiento continuo.



El sistema está enterrado permitiendo una alimentación por gravedad. La temperatura del digestor se regula mediante una losa calefactora [56].

Figura 29. Foto del procedimiento "Compact" de Enerpro Biogaz [66]

- Enercube (Capacidad de 100 m³)

Enercube se dedica al tratamiento de efluentes líquidos. Enerpro tiene el derecho exclusivo de comercializar este módulo. El tanque rectangular de acero del digestor se agita mediante burbujeo del biogás [67]. Se han instalado dos unidades, una con valorización del biogás por cogeneración (50 kW) y una unidad en una cervecera con valorización del biogás como calor (60 kWth).



Figura 30: Foto del procedimiento Enercube (fuente: Enerpro)

- Módulo Casier (Capacidad de 20 m³)

Esta unidad trata pequeños volúmenes de sólidos de paja (estiércoles, residuos vegetales) en discontinuo. Se basa en el proceso Ducellier-Isman que permite limitar el equipo y el consumo de energía para la mezcla y la homogeneización. El jugo producido, cargado de bacterias metanogénicas, recircula mediante la apertura/cierre de válvulas controladas por el operador. La temperatura se regula [68].

- Enerpente (Capacidad superior a 150 m³)

Este módulo es una variación de gran volumen del Casier. Enerpente se presenta como un silo flexible en forma de salchicha. Se basa en el proceso Ducellier-Isman de vía sólida discontinua. El material se introduce en el silo con un tractor o una carretilla telescópica [56]. Para procesar el estiércol, se acaba de instalar una unidad, diseñada para alimentar un grupo de cogeneración de 63 kW. Está en vía de entrar en servicio [69].



Figura 31: Foto del Enerpente (fuente: Enerpro)

5.3.2.2 Retorno de experiencia

⇒ Compact

4 unidades Compact han sido instaladas por Enerpro, la primera en 2016 en la Granja de Meunier en Morbihan [56] para el tratamiento del efluente de queso y del salvado producido por la panadería. La inversión ascendió a 25.000 € [56].

Procesó 25 L/d de suero, 50 L/d de aguas blancas y 25 tn/año de salvado de trigo. La tecnología Compact está diseñada para efluentes líquidos, pero en el caso de la Granja de Meunier funcionó con sólidos degradables. El biogás se utilizó para producir calor para calentar el agua de la quesería (3000 kWh/año) y para secar mijo y alforfón (1500 kWh/año), gracias a un tanque de almacenamiento de 50 m³.

Este metanizador ya no funciona desde el año 2018 debido al cese de la actividad ganadera y, como consecuencia, de la producción de efluentes que tratar. El digestato no se utilizó durante el periodo de uso del metanizador.

⇒ **Silotour**

Este procedimiento funciona desde 2016 en la Granja Bel Air en Finistère [70] en el marco de un proyecto piloto. Procesa 2.600 m³/año de purines de terneros.



Figura 32. "Silo tour" Enerpro Biogaz en la Granja Bel Air

El silo (Figura 32) se alimenta en purines cada 20 minutos con ayuda de una bomba. El biogás generado (13 000 m³/año) se acumula en la parte superior del digestor, tras lo cual se filtra y se aprovecha por parte de una caldera de 40 kWth [11].

El agua caliente se utiliza principalmente para la producción de leche reconstituida para los terneros. También se utiliza para calentar el digestato (35°C), parte del cual se mezcla con los insumos.

El coste de la instalación fue de 75.000 € [70]

- 46.000 € digestor,
- 12.000 € contenedor + caldera,
- 10.000 € automatismos + equipos,
- 7.000 € estudio.

La instalación ha sido cofinanciada hasta un 40% por la Región y ADEME en el marco del Plan Energético Bretón y del desarrollo de una unidad piloto experimental. Los agricultores esperan recuperar su inversión en 10 años, con 10.700 euros de ahorro energético anual y 3.000 euros de costes estimados [71].

⇒ **Casier**

Dos unidades fueron instaladas por Enerpro biogaz [56]. El módulo Casier se utiliza en una granja con 70 vacas lecheras, una quesería y una planta de producción de pasta. Los materiales metanizados son principalmente estiércol de paja, así como suero de leche y residuos de pasta. La unidad está compuesta por dos módulos "Casier" y una vejiga para el almacenamiento del jugo de la leche de 20 m³. El biogás se aprovecha en forma de calor con una caldera de biogás de 7 kWth. El coste de la instalación es 65 000 €.

5.3.2.3 Resumen sintético de las tecnologías Enerpro Biogaz

Tabla 28. Características de las tecnologías Enerpro Biogaz [67], [71]

		Compact	Enercube	Casier	Enerpente
Insumos	Naturaleza	Líquidos (purines, lactosuero)		Sólidos (estiércoles, residuos vegetales)	
	Cantidad	Según el tipo de insumos			
	Pretratamiento	no	Enerfeed optativo para la trituration	no	no
Digestor	Tecnología	Semilíquida		Vía sólida	
	Volumen	10 o 20 m³	100 m³	20 m³	>150 m³
	Temperatura	Mesófila	Mesófila	Mesófila	Mesófila
	Calefacción	Losa calefactora	Red de calor interna	Losa calefactora	Losa calefactora
	Tasa de MS	< 20% MS insumos		> 50% MS insumos	
	Agitación	Optativa mediante burbujeo	Sí mediante burbujeo	No, recirculación de jugos	No, recirculación de jugos
	Tiempo de permanencia	No comunicado	No comunicado	No comunicado	No comunicado

		Compact	Enercube	Casier	Enerpente
Biogás	Almacenamiento	20 m ³	70 m ³	20 m ³	Depende del tamaño de digestores
	Producción	Hasta 60 m ³ /día, según insumos y T°C	hasta 300 m ³ /d	Hasta 60 m ³ /d	Depende del tamaño de digestores
	Valorización	Calor	Cogeneración 30 a 120 kW o calor	Calor	Cogeneración 60 a 120 kW
Digestato	Post-tratamiento	Optativo	Optativo	Posible compostaje	Posible compostaje
Inversión		30.000 a 100.000 € (+ IVA)	300.000 a 600.000 € (+ IVA) con cogeneración	30.000 a 100.000 € (+ IVA)	300.000 a 600.000 € (+ IVA) con cogeneración
Número de unidades funcionando		4	2	2	1
Contacto		Enerpro Biogaz 154 rue de Vern 35200 RENNES Francia ☎ 06 32 74 46 62 ✉ Alexandre.bougeant@enerpro-biogaz.fr			

5.3.1 Green2Gas (Francia)

5.3.1.1 Presentación

Green2Gas, anteriormente BIO4GAS, es una empresa francesa fundada en 2011. Hoy en día, emplea a unas veinte personas. Comercializa unidades de metanización a escala de cada granja, en cogeneración y, desde 2018, en inyección.

5.3.1.2 Retorno de experiencia

Green2Gas tiene unas cuarenta referencias en Francia. Se han instalado unas quince referencias en la escala de micrometanización. En la actualidad, la empresa ya no se posiciona en potencias de 50 y 64 kW, sino en las de 75 kW como mínimo.

GAEC de Trois Communes

Se instaló una unidad de micrometanización Green2Gas en el GAEC Trois Communes en La Chapelle-Thècle (71470) en 2017 [73]. La explotación trabaja con policultivos y producción lechera con 65 vacas entre los 200 bovinos de la granja.

El metanizador se alimenta cada año con 1.800 toneladas de estiércol líquido, 800 toneladas de estiércol y 300 toneladas de CIVE, a los que hay que añadir 250 toneladas/año de orujo de uva y 250 toneladas/año de residuos de cereales.

Se utiliza una fosa previa de 25 m³ para mezclar los insumos que luego se bombean, se trituran y se introducen en el digestor de 600 m³ (tecnología Bert) para un tiempo de permanencia de 50 días.

El digestor (Figura 33) consiste en dos tanques de hormigón, uno dentro del otro, conectados por aberturas en el piso del tanque interior. El biogás producido se almacena bajo el techo y en un gasómetro flexible en el techo.



Figura 33. Foto de la instalación en el GAEC de Trois Communes [73]

El calentamiento y la agitación continua se consiguen mediante el efecto de termosifón de un proceso patentado llamado Thermo-Gas Lift (TGL®). Este tubo de acero inoxidable de doble pared está situado en el centro de cada cámara.

Como complemento, se colocan dos agitadores semisumergidos en la parte superior de cada tanque para romper la costra.

El biogás es valorizado por un cogenerador para generar 64 kW y 87 kWth. El calor se utiliza en el dispensador automático de leche para los terneros, en la calefacción de dos viviendas y en un secador plano de dos celdas de 60 m².

El funcionamiento de esta unidad requiere un tiempo equivalente a media jornada de trabajo (alimentación del digestor, seguimiento de la metanización y mantenimiento).

La inversión total ascendió a 752.000 euros + IVA, incluidos 45.000 euros para el secador. El proyecto fue subvencionado con 280.767 euros por ADEME y la Región Borgoña-Franco-Condado.

5.3.1.3 Resumen sintético de la tecnología Green2Gas

Tabla 29. Características de la tecnología Green2Gas

Insumos	Naturaleza	Sustratos agrícolas
	Cantidad	> 3 500 tn/año
Digestor	Pretratamiento	Trituración
	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	No comunicado
	Temperatura	Mesófila
	Calefacción	sí
	Agitación	Thermo-Gas Lift (TGL®) y agitadores semisumergidos
	Tiempo de permanencia	No comunicado
Biogás	Almacenamiento	Doble membrana encima del digestor
	Producción	No comunicado
	Valorización	Cogeneración 75 kW Inyección para proyectos de suficiente tamaño
Digestato	Post-tratamiento	No comunicado
Inversión		600.000 € - 700.000 € (+ IVA) para las unidades de potencia 75 kW, o 8.000 a 9.300 € (+ IVA)/kW
Número de unidades funcionando		Unas cuarenta referencias en Francia con unas quince en micrometanización
Contacto		Green2Gas Parc SWEN - 1 rue des Vergers Bât 6 Allée B – 69 760 Limonest Francia ✉ audrey.beaumadier@g2gas.com https://green2gas.com/

5.3.1 Host (Países Bajos)

5.3.1.1 Presentación

La empresa neerlandesa Host comercializa el digestor "Microferm" para pequeñas explotaciones de residuos agrícolas. Consiste en un digestor de torre del tipo mezcla infinita. **Ya no se ofrece en Francia, pero sigue estando disponible en el extranjero.** Las unidades instaladas en Francia están ahora equipadas con una valorización de biogás por inyección que favorece los metanizadores de tamaños superiores a la micrometanización.

5.3.1.2 Retorno de experiencia

En 2013 se instaló una unidad "Microferm" en Francia. Sigue funcionando en el Gaec de Buissons, en Saint-Lambert-La-Potherie (49 070). Esta torre de 12 m (135 m³) procesa los efluentes de 115 vacas lecheras [74]:

- 2 750 tn/ de purines,
- 836 tn/año de aguas de lavado de ordeño,
- 195 tn/año de rechazos de silos de piensos,
- 44 tn/año de paja menuda.



Figura 34. Foto de la instalación en el GAEC de Buissons [75]

El biogás producido tras unos diez días de degradación se trata con carbón activo antes de la cogeneración (65 kW) para producir electricidad y calor para la calefacción de cuatro casas y el agua sanitaria de la granja. El digestato crudo se esparce.

El funcionamiento del metanizador se estima en 19 h/mes para el seguimiento técnico y administrativo, el mantenimiento del digestor y la carga de insumos [74].

La unidad costó 576.000 € que se financiaron hasta un 40 % por parte de ADEME y del Consejo Regional de Países del Loira. El retorno de la inversión se estimó en 7 años.

5.3.1.3 Resumen sintético de la tecnología Microferm de Host

Tabla 30. Presentación de la tecnología Microferm

Insumos	Naturaleza	Efluentes y residuos agrícolas
	Cantidad	> 4 000 tn/año
	Pretratamiento	Según necesidad
Digestor	Tecnología	Mezcla infinita
	Volumen	135 m ³
	Temperatura	mesófila

Biogás	Calefacción	sí
	Agitación	Agitador de paletas
	Tiempo de permanencia	12 días
	Almacenamiento	Envolvente flexible
	Producción	Según insumos
Digestato	Valorización	Cogeneración / inyección
	Post-tratamiento	Postdigestor
Inversión		576.000 € (+ IVA) (65 kW)
Número de unidades funcionando		200 instalaciones en Europa, de las cuales una decena en Francia
Contacto		HOST France La Raboisnelière 44110 ERBRAY Francia ☎ 02 44 05 53 90 ✉ info@hostfrance.fr https://www.host.nl/fr/methanisation/

5.3.2 Ejemplo de digestores autoconstruidos

Atraídas por la autosuficiencia energética y los beneficios económicos y medioambientales, algunas explotaciones han construido su propio digestor [76].

Digestor austriaco para efluentes de ganadería [76]

El proyecto europeo BioEnergy Farm 2 (2014-2016) sobre "metanización a pequeña escala" ha identificado una serie de referencias de micrometanizadores. En particular, el Sr. Berneckers, un agricultor ecológico, informó sobre un metanizador construido por él mismo en Austria.

Los insumos (estiércol bovino y purines) se introducen por gravedad en una fosa de recepción de hormigón de 12 m³ y se mezclan con el estiércol del ganado. Los efluentes son empujados desde la fosa hacia el digestor a medida que entran los insumos. Del mismo modo, el digestato se empuja desde el digestor a otra fosa, bombeándose luego a la fosa de almacenamiento de 700 m³. En cuanto al biogás, se almacena en un gasómetro que alimenta un cogenerador.

Tabla 31. Recapitulativo y retorno de experiencia de una instalación autoconstruida en Austria [76]

Instalación	Fecha de construcción	2011
	Cantidad de insumos	1 170 tn/año (730 tn/año purines bovino 440 tn/año estiércol bovino)
	Volumen digestor	120 m ³
	Temperatura de funcionamiento	39°C
	Tiempo de retención	35-40 días
Producción	Cantidad de biogás	50.000 m ³ /año
	Energía eléctrica	6 kW 52.000 kWh/año
	Energía térmica	148.000 kWh/año
Consumo eléctrico de la propia unidad		7 %
Inversión	Importe de la inversión	100.000 € (+ IVA) 16.667 € (+ IVA) / kW instalado
	Retorno de la inversión	5-6 años si se acepta como central eléctrica verde Si no 10-12 años

El tiempo de trabajo se estima en 15 minutos / día.

Digestor del Gaec de Bois Joly

El metanizador fue construido en autoconstrucción con el asesoramiento de la empresa Aria Energie, diseñadora de la unidad de metanización [77].

Esta tecnología de tipo discontinuo se instaló en 2007 (Figura 35).

La instalación consta de los siguientes elementos:

- Área de almacenamiento de insumos de 450 m².
- 4 digestores en paralelo de 185 m³ de capacidad cada uno (por una capacidad total de 740 m³), de hormigón, semienterrados, equipados con calefacción y gasómetro (lona de EPDM de 120 m³)
- Área de almacenamiento del digestato de 275 m²
- Cogenerador de 30 kW.



Figura 35. Foto de la instalación en el GAEC de Bois Joly [72]

El calor generado a partir del biogás permite:

- Calentar los purines aguas arriba del digestor y los jugos de recirculación de los fondos del silo.
- Mantener la temperatura entre 37°C y 40°C.
- Cubrir las necesidades térmicas de la explotación.

Cada digestor se carga desde 4 hasta 5 veces al año con 56 tn/carga de materia prima sólida y 39 tn/carga de materia prima líquida. La planta se ha diseñado para procesar 1.380 tn de material al año. Esta explotación fue supervisada por ADEME entre el 01/02/2009 y el 30/04/2010 [77]. Dicho seguimiento mostró que los rendimientos de la digestión anaerobia son satisfactorios con una expresión del 90% del potencial metanogénico de la mezcla. Estas prestaciones se obtienen gracias a un elevado tiempo de permanencia evaluado en 70 días.

El uso de digestato en lugar de fertilizantes químicos permite al GAEC ahorrar 8.000 euros al año. Además, la granja intercambia el digestato por paja para el ganado, con lo que se ahorra 6.000 euros al año en piensos para el ganado. El ahorro vinculado a la revalorización del calor se estima en 4.000 euros/año en calefacción para la explotación.

La inversión total ascendió a 314.200 euros + IVA, es decir, 10.473 euros + IVA/kW. El importe total de las ayudas (ADEME y Consejo General de Vendée) ascendió a 140.420 € (+ IVA), lo que representa un 44 % de la inversión total [77].

5.4 Resumen sintético de los procedimientos de micrometanización

En la Tabla 32 se resumen los principales datos técnicos y económicos relativos a las tecnologías de micrometanización estudiadas.

Los costes de inversión se sitúan entre 6.500 y 14.000 euros (+ IVA)/kW y dependen del tipo y la cantidad de sustratos tratados. Las unidades que procesan biorresiduos deben estar equipadas con módulos de higiene, a diferencia de las demás unidades. La relación de costes más baja corresponde al procedimiento Nénufar, que equipa las balsas de almacenamiento con cubiertas para recuperar el biogás, lo que limita los costes en comparación con otras tecnologías que requieren la construcción de digestores.

Tabla 32. Tabla resumen de las tecnologías de micrometanización

Proveedores (País)	Modelos	Tecnología	Sustratos	Capacidad tn/año	Potencia kW	Valorización	Precio k€ (+ IVA)	Inversión €/kW
Enwise	OSCAR	Vía seca	Biorresiduos	300 a 10.000	20	Cogeneración	150 k€ Unidad piloto, 1 kW para 50 tn/año	Desconocida
Bee & Co	BioBeeBox®	Vía líquida		80 a 1.500	10	Cogeneración + Calefacción	690 k€ 10 kW para 300 tn/año	69 000 con material de demostración ¹¹
SEaB	Flexibuster™	Vía líquida		150 a 1.000	8-180	Cogeneración/ Calefacción	575 k€ para 50 kW	11 500
Tryon	Modul'O	Vía líquida		250 a 8.000	> 30	Cogeneración, inyección	700 a 5.000 k€	Desconocida
Bioelectric	Bioelectric	Vía líquida	Purines como sustrato base principal	3.000 a 6.000	11 – 77	Cogeneración + Calefacción	220 k€ (22 kW) 300 k€ (33 kW) 350 k€ (44 kW)	8.000 a 10.000
MCube	MCube	Vía líquida		1.000 a 10.000	36	Cogeneración	300 - 500 k€ (36 kW)	8.000 a 14.000
Nénufar	Nénufar	Vía líquida		1.500 a 30.000	36	Cogeneración + Calefacción	260 k€ (36 kW)	7.300
PlanET	Valentin	Vía líquida		7.000 a 10.500	40-150	Cogeneración	500 k€ (50 kW)	10.000
Agrikomp	AgriSelect	Vía líquida		3.000 – 6.000	Min 55	Cogeneración (mínimo 55 kW)	/	9.000
Enerpro Biogaz	Compact	Vía líquida	Sustratos mixtos	>100 L/año	calor	Calor	25 k€	No disponible
	Silotour	Vía líquida		>500 tn/año	30 a 80	Calor / cogeneración	75 k€ (40 kWth)	
	Casier	Vía seca		>100 L/año	calor	Calor	65 k€ (7 kWth)	
	Silopente	Vía seca		>500 tn/año	30 a 80	Calor / cogeneración	/	
Green2Gas		Vía líquida		>3.500 tn/año	Min 75 kW	Cogeneración	/	8.000 a 9.300
Host	Microferm ¹²	Vía líquida		>4.000 tn/año	65 kW	Cogeneración	576 k€ (65 kW)	8.900
Aria Energie / Autoconstrucción ¹³	Silo	Vía seca		1 400	30	Cogeneración	314 k€ (+ IVA)	10.500 €/kWh

¹¹ La unidad BiobeeBox® computa costes adicionales en relación con las otras unidades, como por ejemplo un módulo de ósmosis inversa para fines de demostración

¹² No comercializado en Francia

¹³ Según el retorno de experiencia del Gaec de Bois Joly [77]

6 Guía de selección para procedimientos de micrometanización y picometanización

En la Figura 36 se ofrece un árbol de selección para ayudar al productor a escoger entre los proveedores y las tecnologías que se adecúan al tipo y a la cantidad de sustratos producidos. Los sustratos con menos de 30 toneladas al año orientarán a los productores hacia soluciones de picometanización. Si bien existen numerosos proveedores en este mercado, sólo se identificaron tres para Europa. Los tonelajes mayores de 30 tn/año requerirán recurrir a proveedores de micrometanización.

De este modo, en lo que a micrometanización se refiere, existen empresas especializadas en soluciones dedicadas para el procesamiento de biorresiduos y purines.

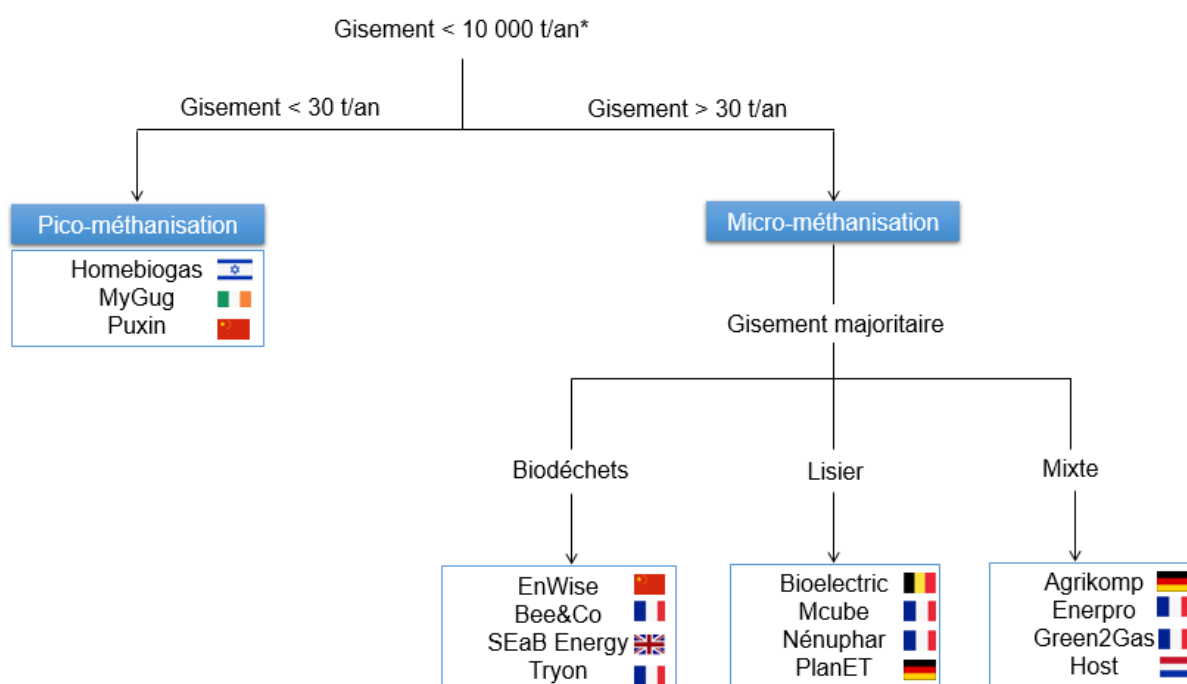


Figura 36. Árbol de selección para escoger proveedores de tecnologías de micro y picometanización dependiendo del tipo y la cantidad de sustrato para procesar.

*Se admiten tonelajes mayores en el caso de tecnologías que utilizan cubiertas sobre fosas existentes (tipo Nénufar y Mcube).

Las tecnologías propuestas por los proveedores permiten generar biometano, que se suele valorizar mediante combustión para las unidades de picometanización y mediante cogeneración en el caso de las unidades de micrometanización. Las potencias eléctricas instaladas y los caudales de biometano adaptados a las tecnologías estudiadas se recogen en la Figura 37.

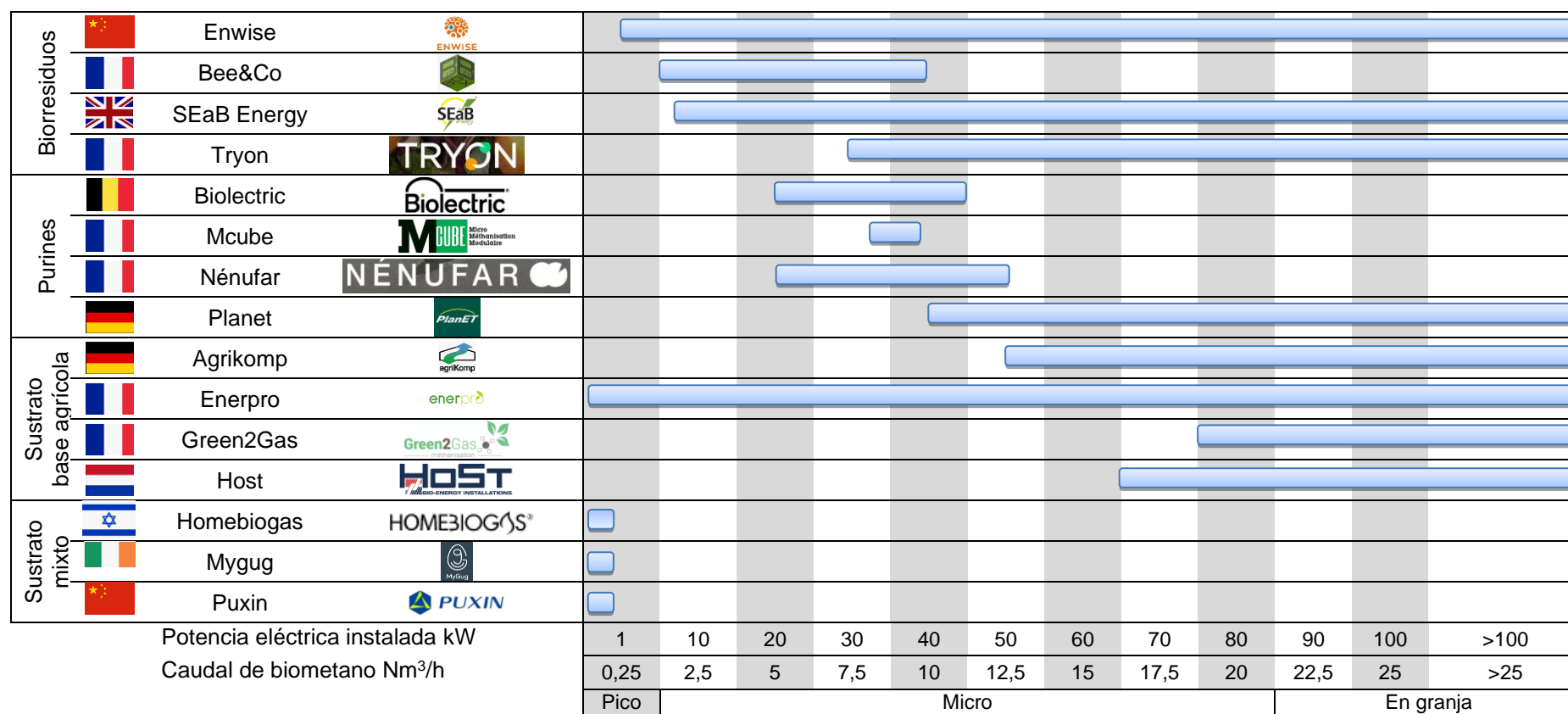


Figura 37. Inventario de proveedores de pico y micrometanización dependiendo de la potencia instalada y del caudal de biometano producido. Adaptado de [78]

7 Conclusión

Desde hace varios años, la metanización se está imponiendo como una solución para reducir los costes energéticos, valorizar los residuos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El aprovechamiento del digestato permite, además, limitar el uso de fertilizantes químicos asegurando un retorno a la tierra de la materia orgánica. Desde el punto de vista económico, la producción de biogás permite la producción de energía verde, una fuente potencial de ingresos para el productor.

La metanización a pequeña escala puede permitir que los residuos se traten lo más cerca posible de sus lugares de producción, lo que mejora aún más el equilibrio medioambiental global. A nivel europeo, la metanización a pequeña escala se ha desarrollado considerablemente, sobre todo en Alemania. En la actualidad, Francia cuenta con un pequeño centenar de unidades de micrometanización (< 80 kW) [11]. A pesar de una tarifa de compra favorable para la electricidad, su rentabilidad se ve penalizada por su pequeño tamaño. Un estudio de ADEME de 2019 concluía que su rentabilidad depende en gran medida de las subvenciones [10]. En el caso de las unidades por vía líquida con valorización del biogás mediante cogeneración, el 18% de las unidades alcanzan una TRI del 8% sin subvención, frente al 31% con subvención [10]. Uno de los retos de los próximos 5 años será el desarrollo de unidades estandarizadas que permitan una instalación y funcionamiento sencillos a bajo coste [10].

Algunos proveedores se posicionan en este mercado con soluciones adaptadas a sustratos específicos, como los biorresiduos y los purines. Están apareciendo referencias para los biorresiduos debido a las limitaciones normativas que empujan a su valorización. En cuanto a los purines, se han desarrollado soluciones sencillas con la instalación de lonas en las balsas existentes que permiten un aprovechamiento del material con obras y seguimiento operativo limitados.

A una escala aún menor, existen soluciones de picometanización para explotaciones muy pequeñas y particulares. Si bien existe un gran número de soluciones prefabricadas, pocas están destinadas al mercado europeo. Existen varios obstáculos para la implantación a gran escala de la picometanización en Europa y particularmente en Francia:

- Normativa aplicable. A pesar de su baja capacidad de tratamiento, estas unidades están sujetas al régimen de instalaciones clasificadas. Una unidad que procese únicamente residuos vegetales estará sujeta a declaración, mientras que una unidad que procese biorresiduos estará sujeta a registro, en cuyo caso se impondrá un requisito de higienización.
- Cuestiones de seguridad. El pequeño volumen de biogás producido no debe hacernos olvidar las cuestiones de seguridad. Son de tener en cuenta el riesgo tóxico (ligado a la presencia de H_2S y compuestos indeseables en el biogás) y el riesgo de explosión. La combustión de biogás (cocinas de gas) en recintos cerrados requerirá, en particular, la instalación de una ventilación eficaz y un detector de gas. También existen incógnitas sobre la calidad del digestato generado por estas pequeñas unidades y la posible presencia de patógenos, especialmente cuando los biorresiduos son tratados sin higienización.
- Prestaciones sin optimizar. Los picometanizadores están diseñados de la forma más sencilla, lo que puede provocar atascos y acumulación de material a la entrada del digestor en ausencia de una agitación eficaz. Su funcionamiento se verá facilitado en el procesamiento de materias líquidas escasas en fibras. Las bajas temperaturas en invierno penalizan fuertemente los rendimientos de la digestión y, en consecuencia, las producciones de biogás. Los proveedores ofrecen equipos adicionales (resistencias calefactoras, invernaderos, aislamiento) para limitar estas disminuciones de rendimiento, lo cual incrementa los costes de inversión y explotación. Están apareciendo nuevos equipos en el mercado, como la solución propuesta por MyGug, que podría mejorar la fiabilidad técnica de la picometanización.
- La rentabilidad de estas unidades no siempre está ahí, especialmente cuando existe una conexión de gas natural. La elección de implementar una unidad de picometanización no se basará en criterios económicos, si no en la voluntad de aprovechar residuos orgánicos para generar una energía verde y un digestato que permita sustituir los fertilizantes comerciales.

8 Bibliografía

- [1] ADEME Angers, « Fiche Technique : METHANISATION ». febr. 2014.
- [2] Cresson Romain, « Méthanisation ». Narbonne, 10/06 2011, Consultado el día: agosto 10, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www6.inrae.fr/treasure/contentn/download/3212/32576/version/1/file/Cresson.pdf>.
- [3] Préfet de l'ORNE, L'ORNE Conseil Général, et Agricultures & Territoires Chambre d'agriculture Orne, « La méthanisation des matières organiques - Guide à l'attention des porteurs de projets ». febr. 25, 2015, Consultado el día: agosto 04, 2020. [Online]. Disponible en: https://www.canopee12.fr/files/DOCUMENTS/Guide_Methanisation_Orne.pdf.
- [4] A. Levet, « Etat de l'art de la micro-méthanisation : le développement de la micro-méthanisation en France », Métha'Synergie, 2020.
- [5] S. Tissot et A. Pichard, « Seuils de Toxicité Aiguë Hydrogène Sulfuré (H₂S) », *Ministère de l'écologie et du développement durable-ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapés*, 2000.
- [6] INRS, « Sulfure d'hydrogène, Fiche toxicologique n°32 ». Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES, 2014.
- [7] « Nenufar Biogaz – Couverture de fosse récupératrice de biogaz ». <http://nenufar-biogaz.fr/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [8] ADEME, M. Benbrahim, N. Thévenin, et F. Muller, « Qualité agronomique et sanitaire des digestats agricoles », ADEME, Angers, Rapport Final 0906C0053, oct. 2011. Consultado el día: febr. 02, 2021. [Online]. Disponible en: <http://www.naskeo.com/docs/fr/methanisation/naskeo-rapport-ademe.pdf>.
- [9] K. Hjort-Gregersen, « Market overview micro scale digesters ». AgroTech A/S, Denmark, mayo 27, 2015, Consultado el día: agosto 04, 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2015/10/bioenergyfarm2-marche-methanisation-petite-echelle-agrotech2015-05-27.pdf>.
- [10] L. Boucher et P. Levasseur, « Performances et potentiels de diffusion d'unités de méthanisation agricole, 44 pp + annexes », 2019.
- [11] A. Levet, « Etat de l'art de la micro-méthanisation - Le développement de la micro-méthanisation en France ». Metha'Synergie, julio 2020, Consultado el día: febr. 02, 2021. [Online]. Disponible en: https://methasynergie.quai13.fr/wp-content/uploads/2020/10/ALE-20_10_Methasynergie_Etat-de-lart-micro-m%C3%A9thanisation-.pdf.
- [12] EDF, « Tarif de rachat de l'électricité issue du biogaz en 2020 », 2020. <https://selectra.info/energie/guides/environnementn/rachat-electricite-gaz-edf#cogeneration>.
- [13] L. Michel, *Arrêté du 10/11/09 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation soumises à déclaration sous la rubrique n° 2781-I*, vol. DEVP0920876A. 2009.
- [14] J. Marilossian, « Question n°13911 - Assemblée nationale », *Assemblée nationale*, 2019. <https://questions.assemblee-nationale.fr/q15/15-13911QE.htm> (consultado el día: febr. 12, 2021).
- [15] LégiFrance, *Article L541-8*, vol. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et nuisances (Articles L511-1 à L597-46). 2020.

- [16] LégiFrance, *Article L541-21-1*, vol. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et nuisances (Articles L511-1 à L597-46). 2021.
- [17] European Parliament, « Document 02011R0142-20201208 », *EUR-Lex*, dic. 08, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-contentn/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02011R0142-20201208> (consultado el día: febr. 11, 2021).
- [18] Parlamento Europeo y del Consejo, *Reglamento (CE) No 1069/2009*. 2009.
- [19] Parlamento Europeo, *REGLAMENTO (UE) No 142/2011 DE LA COMISIÓN*. 2011.
- [20] H. Jouhara *et al.*, « Municipal waste management systems for domestic use », *Energy*, vol. 139, p. 485-506, nov. 2017, dic: 10.1016/j.energy.2017.07.162.
- [21] Engie, « ENGIE investit dans HomeBiogas, fournisseur d'une solution innovante de production de biogaz pour les particuliers », 2018. <https://www.engie.com/journalistes/communiqués-de-presse/homebiogas-solution-innovante-production-biogaz-pour-particuliers>.
- [22] « HomeBiogas 2 », *Homebiogas / Household Biogas Digester System*. <https://www.homebiogas.com/Products/HomeBiogas2> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [23] Homebiogas, « Products », *HomeBiogas*, 2020. https://www.homebiogas.com/Products/Additional_Products (consultado el día: agosto 09, 2020).
- [24] Mas Bazan, « La cuisine avec les déchets de cuisine », *Mas Bazan*, junio 13, 2019. <https://www.masbazan.fr/actualite-gite-perpignan-57.php> (consultado el día: agosto 09, 2020).
- [25] MyGug, « Welcome to MyGug », *MyGug*, 2021. <http://www.mygug.eu/> (consultado el día: agosto 06, 2020).
- [26] K. Coffey, « Public Report for SEAI RDD/000157 », 2018. [Online]. Disponible en: <https://www.seai.ie/documents/research-projects/RDD-000157.pdf>.
- [27] Shenzhen Puxin Technology Co, « PUXIN assebmly biogas system-3.4m3 », *PUXIN*, 2015. <http://en.puxintech.com/domesticbiogasplant> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [28] Shenzhen Puxin Technology Co, « PUXIN portable assembly biogas system-15m3 », *PUXIN*, 2015. <http://en.puxintech.com/abs15m3home> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [29] « CE Approved Small 3.4 m3 Biogas Equipment Plant, View biogas equipment, PUXIN Product Details from Shenzhen Puxin Technology Co., Ltd. on Alibaba.com ». https://puxinbiogas.en.alibaba.com/productn/60467130675-803025232/CE_Approved_Small_3_4_m3_Biogas_Equipment_Plant.html?spm=a2700.icbuShop.41413.10.1dff406dybxhZJ (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [30] « New Energy Biogas Puxin Professional Biogas Digester System Project - Buy Energy Biogas,Household Small Home Biogas Digester,Biodigester Puxin Biogas System Product on Alibaba.com ». https://www.alibaba.com/product-detail/New-Energy-Biogas-Puxin-Professional-Biogas_60466934073.html?spm=a271v.8028081.0.0.7cfe3e5fbwAL2H (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [31] Proveedores gas, « Prix m3 gaz chez Engie et les autres fournisseurs : comparatif 2020 », 2020. <https://www.fournisseurs-gaz.com/prix/m3-kwh> (consultado el día: dic. 08, 2020).
- [32] Selectra, « Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : signification, calcul, formule ». Consultado el día: febr. 19, 2021. [Online]. Disponible en: <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique-inferieur>.

- [33] Picbleu, « Tabla comparatif pouvoir calorique inférieur (PCI) des énergies », *Picbleu*, 2021. <https://www.picbleu.fr/page/tableau-comparatif-pouvoir-calorique-inferieur-pci-des-energies> (consultado el día: febr. 12, 2021).
- [34] Picbleu, « Site internet Picbleu », *Picbleu*, dic. 22, 2020. <https://www.picbleu.fr/page/tableau-comparatif-pouvoir-calorique-inferieur-pci-des-energies>.
- [35] SINOE, « Carte des unités de méthanisation et de biogaz », *SINOE Déchets*, 2021. <https://carto.sinoe.org/carto/methanisation/flash/> (consultado el día: febr. 11, 2021).
- [36] ENWISE, « Home », *ENWISE*, 2020. <https://www.enwise.io/> (consultado el día: ener. 10, 2021).
- [37] DECISIVE, « Micro-scale Anaerobic Digestion », *DECISIVE*. <https://www.decisive2020.eu/the-projectn/micro-scale-anaerobic-digestion/> (consultado el día: ener. 05, 2021).
- [38] DECISIVE, « A Decentralised Management Scheme for Innovative Valorization of Urban Biowaste », European Union's Horizon 2020, Rapport Final D6.1, ener. 2018. Consultado el día: ener. 04, 2021. [Online]. Disponible en: <http://www.decisive2020.eu/wp-content/uploads/2018/03/Methodology-for-characterisation-of-the-biowaste-management-system-in-the-DECISIVE-demonstration-sites.pdf>.
- [39] BEE & COAccueil, « Biobeebox ». <https://www.biobeebox.fr/page-de-projet> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [40] Perez, « Demande d'Enregistrement de l'unité de traitement des restes alimentaires de la ville de Vitry-Sur-Seine par microméthanisation contenairisée – BioBeeBox® ». 2019, [Online]. Disponible en: https://www.val-de-marne.gouv.fr/contentn/download/16405/114297/file/DDEE_VitryBeeZ_revC.pdf.
- [41] V. Perez, « Entretien avec la Présidente de Bee & Co », dic. 09, 2020.
- [42] SEaB Energy, « Site Internet de SEaB Energy ». <https://seabenergy.com/>.
- [43] SEaB energy, « Muckbuster(TM) », *SEaB energy*, 2018. <https://seabenergy.com/products/anaerobic-digesters/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [44] SEaB energy, « Flexibuster(TM) », *SEaB energy*, 2018. <https://seabenergy.com/products/mb400/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [45] S. Sassow, « SEaB Energy », febr. 05, 2021.
- [46] ARCOE, « Installation de traitement des biodéchets adjacente au local de transit de déchets dangereux diffus et à la déchetterie à Thivernal (78) », 2018.
- [47] TRYON, « Produire de l'énergie localement et agilement, Modul'o, la micro-méthanisation modulaire innovante », *TRYON la méthanisation locale et modulaire pour valoriser les biodéchets alimentaires*. <https://www.tryon-environnement.com/postn/2018/10/11/le-modul-o-> (consultado el día: agosto 06, 2020).
- [48] BIOELECTRIC France, « BIOELECTRIC France Solutions standards de micro-méthanisation », abr. 05, 2016, Consultado el día: agosto 04, 2020. [Online]. Disponible en: <http://www.bioenergyfarm.eu/wp-content/uploads/2015/10/BIOELECTRIC-PRESENTATION.pdf>.
- [49] Actusnews(R), « Accueil », *AGRIPOWER France*, 2020. <https://www.agripower-france.com/> (consultado el día: febr. 11, 2021).
- [50] AgroMedia, « Process : Unéal inaugure l'une des premières unités de micro-méthanisation adaptée à une exploitation laitière », *AGROMedia.fr*, oct. 26, 2018. <https://www.agro-media.fr/actualite/process-uneal-inaugure-lune-des-premieres->

- unites-de-micro-methanisation-adaptee-a-une-exploitation-laitiere-30687.html (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [51] BioEnergy Farm, « Cas d'étude – Belgique - Bioelectric ». Consultado el día: febr. 20, 2021. [Online]. Disponible en: [http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/b1bff1bdc37df748c125791a0043db4a/1d97c55bafc4f864c1257ead00327822/\\$FILE/BEF-Methanisation-Belgique-Installation-sur-lisier-automatisee.pdf](http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/b1bff1bdc37df748c125791a0043db4a/1d97c55bafc4f864c1257ead00327822/$FILE/BEF-Methanisation-Belgique-Installation-sur-lisier-automatisee.pdf).
 - [52] Sirea, « Mcube - La micro-méthanisation à la ferme », *Sirea Group*, 2021. <https://www.sireagroup.com/realisations/mcube/> (consultado el día: febr. 11, 2021).
 - [53] OVALIE-INNOVATION, « Le projet MCUBE est cofinancé par l'UNION EUROPÉENNE. L'Europe s'engage avec le fonds européen de développement régional. », *OVALIE-INNOVATION*, 2021. <https://ovalie-innovation.com/projetmcub/> (consultado el día: ener. 04, 2020).
 - [54] Nénufar, « Valorisation du biogaz », *Nénufar*. <http://nenufar-biogaz.fr/installation/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
 - [55] E. Bondoerffer, « Evaluation technico-économique de la couverture Nénufar », Rennes, 2017.
 - [56] Enerpro Biogaz, « Mon biogaz en toute indépendance », *Enerpro*. <https://enerpro-biogaz.fr/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
 - [57] N. Goualan, « Une micro-méthanisation en couvrant la fosse », *Paysan Breton*, vol. Élevage Energies et Environnement, 2020.
 - [58] PlanET, « Valentin - Le concept d'installation intelligent », *PlanET*, 2019. http://slurry-to.energy/wp-content/uploads/2019/05/PB_VALENTIN_FR_Web.pdf (consultado el día: febr. 04, 2020).
 - [59] PlanET, « Valentin - The smart machinery concept », *PlanET*, 2019. http://slurry-to.energy/wp-content/uploads/2019/05/DATASHEET_VALENTIN_INTERNATIONAL_Web.pdf (consultado el día: febr. 04, 2020).
 - [60] B. Contour, « Un méthaniseur pour boucler la boucle », *Grands troupeaux magazine*, n° 73, p. 51-53, 2019.
 - [61] PlanET, « Fiche de présentation de SARL Novalait », 2019.
 - [62] agriKomp France, « Accueil », *AgriKomp France*, 2020. <https://agrikomp.com/fr/> (consultado el día: febr. 11, 2021).
 - [63] agriKomp, « AGRISELECT - Solution de cogénération compacte », *agriKomp*, 2020. <https://agrikomp.com/fr/accueil/unit%C3%A9s-de-m%C3%A9thanisation/solutions-cog%C3%A9n%C3%A9ration/agriselect> (consultado el día: agosto 04, 2020).
 - [64] AgriKomp France, « Les installations de biogaz - agriKomp France », *AgriKomp France*. <https://agrikomp.com/fr/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
 - [65] Agrikomp, « Brochure AGRISELECT : Unité de méthanisation compacte à partir de 55 kWel », 2020.
 - [66] « Nos références - à chacun ses raisons de nous faire confiance », *Enerpro Biogaz : la méthanisation au service de l'exploitation*. <https://enerpro-biogaz.fr/nos-references/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
 - [67] N. Angeli, « Enerpro », dic. 07, 2020.
 - [68] M. Piazza, « La ferme d'AgroParisTech produira du gaz vert qui sera injecté dans le réseau », *Le Monde de l'Energie*, mayo 10, 2019. <https://www.lemondedelenergie.com/ferme-agro-paristech-gaz-vert/2019/05/10/> (consultado el día: agosto 10, 2020).

- [69] N. Angeli, « L'énergie par la micro-méthanisation de proximité. », présenté à Alternatiba Nantes, Nantes, sept. 05, 2015, Consultado el día: febr. 01, 2021. [Online]. Disponible en: <https://alternatiba.eu/nantes/2015/espace-thematique/enerpro/>.
- [70] T. Dagorn, « Le silo-tour chauffe le lait des veaux », *Le silo-tour chauffe le lait des veaux*, 2017, [Online]. Disponible en: <https://www.paysan-breton.fr/2017/07/le-silo-tour-chauffe-le-lait-des-veaux/>.
- [71] Alexandre. Bougeant, « Enerpro », dic. 11, 2020.
- [72] F. Douard, « La méthanisation en voie sèche du GAEC du Bois Joly en vidéo », *Bioénergie*, ener. 2015.
- [73] F. Douard, « Bio4Gas inaugure une unité de méthanisation à la taille de la ferme au GAEC des Trois Communes », *Bioénergie International*, agosto 29, 2019. <https://www.bioenergie-promotion.fr/61224/bio4gas-inaugure-une-unite-de-methanisation-a-la-taille-de-la-ferme-au-gaec-des-trois-communes/> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [74] A. Le Gal, « La méthanisation à l'échelle de mon exploitation », *Terrena La nouvelle agriculture*, 2019. <https://www.terrena.fr/la-methanisation-a-lechelle-de-mon-exploitation/> (consultado el día: febr. 11, 2021).
- [75] A. El Habti, « Audit de fonctionnement technico-économique SAS PRADE BIOGAZ », Nouvelle Aquitaine, sept. 2018. [Online]. Disponible en: https://www.methanaction.com/wp-content/uploads/2019/02/Rapport_audit_SASPradeBiogazVF012019.pdf.
- [76] BioEnergy Farm, « Autriche – Un digesteur autoconstruit fiable et robuste ». Consultado el día: marzo 05, 2021. [Online]. Disponible en: [http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/25237/\\$File/BEF-Methanisation-Autriche-Digesteur-autoconstruit.pdf](http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/25237/$File/BEF-Methanisation-Autriche-Digesteur-autoconstruit.pdf).
- [77] ADEME, « Suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly », nov. 2010. [Online]. Disponible en: <https://www.aile.asso.fr/wp-content/uploads/2013/03/rapport-final-du-suivi-du-gaec-du-bois-joly.pdf>.
- [78] SiaPartners, « La micro-méthanisation, marché de niche ou véritable potentiel à court terme ? », *SiaPartners*, 2017. <https://www.sia-partners.com/fr/actualites-et-publications/de-nos-experts/la-micro-methanisation-marche-de-niche-ou-veritable> (consultado el día: febr. 11, 2021).
- [79] Shenzhen Puxin Technology Co, « Home », *PUXIN*, 2015. <http://en.puxintech.com/Home> (consultado el día: agosto 04, 2020).
- [80] Alibaba.com, « Puxin Grind System Kitchen Food Waste Crusher », *Alibaba.com*, 2021. https://www.alibaba.com/product-detail/PUXIN-Grind-System-Kitchen-Food-Waste_60590971477.html?spm=a2747.manage.0.0.7b9171d29AGpRf (consultado el día: agosto 12, 2020).
- [81] Alibaba.com, « Puxin Food Waste Shredder For Restaurant Hotel Family Waste Treatment », *Alibaba.com*, 2021. https://www.alibaba.com/product-detail/PUXIN-Food-Waste-Shredder-for-restaurant_1580501129.html?spm=a2747.manage.0.0.7b9171d29AGpRf (consultado el día: agosto 10, 2020).
- [82] Alibaba.com, « Puxin Biogas Lamp », *Alibaba.com*, 2021. https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=puxin+biogas+lamp&viewtype=G&tab= (consultado el día: agosto 08, 2020).
- [83] Alibaba.com, « Puxin high quality durable biogas storage bag », *Alibaba.com*, 2021. https://puxinbiogas.en.alibaba.com/productn/60368645591-811833937/Puxin_high_quality_durable_biogas_storage_bag.html?spm=a2700.icbuShop.41413.9.246973e0hF0b84 (consultado el día: agosto 10, 2020).

- [84] Alibaba.com, « Puxin Biogas Burner », *Alibaba.com*, 2021. https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=puxin+biogas+burner&viewtype=G&tab= (consultado el día: agosto 08, 2020).
- [85] Alibaba.com, « Puxin Biogas Generator », *Alibaba.com*, 2021. https://french.alibaba.com/product-detail/puxin-small-biogas-generator-1-5kw-3kw-5kw-60296280424.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.2d517ceclZwjvN (consultado el día: agosto 08, 2020).

9 Anexos

Anexo 1. Definiciones nacionales de unidades de metanización de pequeño tamaño [9]

Pays	Sources d'informations	Définition exprimée en kW _e installé	Définition exprimée selon d'autres critères
Pays-Bas	Auke-Jan Veenstra, LTO Noord Aukejan.veenstra@groengas.nl		80-250 vaches, 250-1000 truies, 50-50,000 porcs charcutiers, 5000-75,000 poules, 25,000-150,000 Poulets
Royaume Uni	David Turley, NNFCC d.turley@nnfcc.co.uk	<50 kW _e	
Allemagne	Dominik Dörrie, IBBK d.doerrie@bogaz-zentrum.de Mark Paterson, KTBL m.paterson@ktbl.de	<75 kW _e	
Autriche	Franz Kirchmeyr, EBA-ARGE Kompost&Biogas kirchmeyr@kompost-biogas.info	<100 kW _e	
France	Charles Maguin, TRAME c.maguin@trame.org Stéphanie Bonhomme, TRAME s.bonhomme@trame.org Hervé Gorius, CRAB herve.gorius@finistere.chambagri.fr	< 100 kW _e	100-130 vaches laitières plus de 250 truies environ 4000 tonnes /an d'effluents d'élevage
Hongrie	Dr. Kornel Kovacs, University of Szeged kovacs.kornel@brc.mta.hu		<80 vaches
Pologne	Marek Amrozy, NAPE mamrozy@nape.pl	<40 kW _e	
Slovaquie	Jan Gadus, Slovak University of Agriculture in Nitra, Jan.Gadus@uniag.sk		Informations insuffisantes
Belgique	Laurens Vandelanoot Laurens.vandelanoot@innovatiesteunpunt.be	10 – 200 kW _e	Max 5000 tonne d'effluents d'élevage, cultures ou déchets/année
République Tchèque	Jan Matejka, Czech Biogas Association Jan.matejka@czba.cz	<100 kW _e	
Italie	Remigio Berruto, DEIAFA Remigio.berruto@unito.it	<300 kW _e	Min 70 % effluents Max 30 % autres
Espagne	Begoña Ruiz, Departamento de Medio Ambiente, Bioenergía e Higiene Industrial bruiz@aina.es	<100 kW _e	
Danemark	Michael Tersbøl, Økologisk Landsforening mt@okologi.dk		Environ 200 truies + divers types de biomasse, 6000 porcs

Anexo 2: Productos adicionales Puxin [79]

Productos adicionales	Características	Precio
Trituradora PXC FWD-20L [80] 	Capacidad máx.: 20 L / 10 kg Peso: 4,5kg	300 \$-400 \$ 266 €-354 €
Trituradora PX-FWD-226L [81]	Capacidad máx.: 2 toneladas/h 226L	1000\$-1200\$ 885€-1062€
Lámpara de biogás [82] 	Consumo en biogás: 0,07 m ³ /h Potencia: 60-100 W	6\$-10\$ 5€-9€
Bolsa de almacenamiento de biogás [83] 	Capacidad: 0,5-200 m ³	30 \$-1000 \$ 27 €-885 €

		
<p>Cocina de gas biogás [84]</p> 	<p>Consumo: 0,45 m³/h por quemador</p>	<p>10\$-50\$ 9€-44€</p>
<p>Cocina de gas biogás quemador grande</p> 	<p>Consumo: 2-3 m³/h por quemador Presión de gas en la entrada: 1600 Pa</p>	<p>22 €</p>
<p>Generadores eléctricos [85]</p> 	<p>Potencia: 1,5 kw (1,05 m³ biogás /h) y 3 kW (2,1 m³ biogás/h)</p> <p>Calidad del Biogás:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tasa de metano mínima: 65% - Requiere desulfurización previa <p>Presión de gas: 2 000 – 6000 Pa</p>	<p>1,5 kW: 480\$-550\$ (428€-490 €)</p> <p>3 kW: 500\$-800\$ (445€-712 €)</p>