



**ESTUDIO:** “Valorización energética de residuos agropecuarios en la Provincia de Valdivia, integradas a un sistema de gestión de abastecimiento sostenible, para producción de biogás en unidades centralizadas de cogeneración, biofertilizantes y reducción de contaminantes”

EST-2008-0204

## ANÁLISIS TÉCNICO

30 de Marzo de 2009

OFICINA DE PARTES 2 FIA	
RECEPCIONADO	
Fecha	01 DIC 2009
Hora	12:20
Nº Ingreso	9/69

# Índice

Índice .....	2
Índice de Tablas .....	4
Índice de Ilustraciones .....	4
1 Fermentación/Biodigestión y Biogás.....	6
1.1 Antecedentes generales .....	6
1.2 Proceso de fermentación .....	10
1.3 Tipos de Fermentación .....	12
1.4 Parámetros.....	14
1.4.1 Temperatura.....	14
1.4.2 pH.....	14
1.4.3 Materia seca/sólidos totales (ST) y contenido de humedad .....	14
1.4.4 Materias orgánica/Sólidos volátiles (SV) .....	15
1.4.5 Sólidos suspendidos totales (SST) .....	15
1.4.6 Densidad aparente .....	15
1.4.7 Demanda química de oxígeno (DQO).....	15
1.4.8 DBO5: Demanda biológica de oxígeno en 5 días.....	15
1.4.9 Nutrientes e inhibidores.....	16
1.4.10 Alcalinidad y ácidos orgánicos volátiles (TA/ FOS) .....	18
1.4.11 Amonio y amoniaco.....	19
1.4.12 Actividad metanogénica .....	19
1.4.13 Biodegradabilidad anaerobia .....	21
1.4.14 Condiciones para la Producción de Biogás.....	21
1.5 Parámetros - Los resultados de análisis en laboratorio .....	23
1.5.1 Resultados de muestras – productores seleccionados .....	23
1.5.2 Resultados de muestras – Análisis completo de residuo agropecuario .....	24
1.6 Cogeneración de energía térmica y eléctrica.....	26
1.7 Biometano.....	27
1.8 Fertilizantes orgánicos. ....	29
2 Identificación y evaluación de alternativas técnicas para la producción de biogás y obtención de energía eléctrica y térmica. ....	31
2.1 Alternativas técnicas – Planta de Biogas.....	31
2.1.1 El fermentador .....	31
Fosa Anterior .....	37
2.1.2 Sistema de transporte.....	37
2.1.3 Técnica de alimentación.....	38
2.1.4 Admisión Directa .....	38
2.1.5 Pozo de lavado .....	39
2.1.6 Embudo de Alimentación .....	40
2.1.7 Estaciones de docificación.....	42
2.1.8 Conductos.....	44
2.1.9 Bombas .....	45
2.1.10 Retiro de material sólido .....	47
2.1.11 Retiro de restos fermentados .....	48
2.1.12 Calefacción .....	49
2.1.13 Homogenización.....	51
2.1.14 Sistema Conductor de Biogas.....	59
2.1.14.1 Salida del gas .....	59
2.1.14.2 Preparación del gas .....	61
2.1.14.3 Acumulador de gas .....	61

2.1.14.4 Salidas del acumulador del gas.....	62
2.1.15 Utilización del gas.....	66
2.1.15.1 Motores de combustión interna.....	70
2.1.15.2 Celda de Combustible.....	75
2.1.15.3 Microturbina de gas.....	76
2.1.15.4 Preparación del biometano.....	77
2.1.15.5 Alimentación a la red de gas.....	81
2.1.15.6 Utilización del combustible.....	82
2.1.15.7 Formación de de CO2.....	82
2.1.16 Procedimientos para el Desazufrado del Biogás.....	82
2.1.16.1 Proceso Biológico.....	83
2.1.16.2 Biodepuradores.....	83
2.1.16.3 Hidróxido de Hierro para la unión de Sulfuro de Hidrógeno.....	85
2.1.16.4 Filtro de Carbón Activado.....	89
2.2 Técnicas de Medición y Regulación (MRT).....	89
2.2.1 Datos de cada uno de los Parámetros de Operación.....	91
2.3 Posibilidades de utilización de Calor.....	96
2.4 Aprovechamiento de los restos de fermentado.....	97
2.4.1 Almacenamiento de los restos de fermentado.....	97
2.4.2 Procedimiento de distribución.....	100
2.4.3 Preparación Térmica de los restos fermentados.....	103
3 Identificación de dificultades técnicas de extracción, manipulación y transporte.....	110
4 Identificación de los tratamientos actuales de gestión de residuos agrícolas y ganaderos.....	112

## Índice de Tablas

Tabla 1: La composición del Biogás .....	6
Tabla 2. Composición Soluciones utilizadas en los ensayos de actividad metanogénica. ....	20
Tabla 3: Resultados muestras-productores seleccionados.....	23
Tabla 4: Muestra Estiércol N°20 .....	24
Tabla 5: Muestra ensilaje Pasto N° 51 .....	24
Tabla 6: Muestra Ensilaje maíz N° 7.....	25
Tabla 7: Muestra Restos de forraje N°20.....	25
Tabla 8: Rendimientos típicos para un motor.....	26
Tabla 9: Principales diferencias entre biogas y biometano .....	28
Tabla 10: Sistemas discontinuos y continuos .....	32
Tabla 11: Formas constructivas para los motores BHKW y sus procedimientos de combustión. ....	70
Tabla 12: Características mínimas para motores a gas (Preschne, Golish U. Wichmann, 2000) .....	73
Tabla 13: Características y presentaciones de los BHKW motorizados para Biogás.....	74
Tabla 14: Principales diferencias entre biogás y biometano .....	80
Tabla 15: Resumen respecto de las sales de fierro más utilizadas para desazufar. ....	88
Tabla 16: Tecnologías necesarias y con sentido para plantas de biogás. ....	89
Tabla 17: Tecnología utilizada en la medición de biogás.....	92
Tabla 18: Tapas para los contenedores de estiércol líquido (Reducción de emisiones de amoniaco) y costos específicos (modificados según KTBL, 2005).....	99
Tabla 19: Distribución de los restos fermentados. ....	102

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Etapas del proceso de producción de Biogás.....	7
Ilustración 2: Resumen proceso productivo Biogás.....	9
Ilustración 3: Esquema del proceso de producción de biogás.....	10
Ilustración 4: Ejemplo de fermentador.....	35
Ilustración 5: Ejemplo de un fermentador acostado a la izquierda, con desazufrado externo y disposición hacia el contenedor de gas.....	36
Ilustración 6: Tipos de embudos.....	39
Ilustración 7: Pozos modificados con tapa y apisonadores .....	40
Ilustración 8: Embudo de alimentación.....	41
Ilustración 9: Estación de docificación.....	43
Ilustración 10: Carros mezcladores de forraje .....	43
Ilustración 11: Ejemplo de sustrato llevado hacia un fermentador mediante un pistón de presión. ....	44
Ilustración 12: Bombas centrífugas/ bombas purgadoras sumergibles.....	45
Ilustración 13: Bomba de compresor rotativo .....	46
Ilustración 14: Alimentación continua.....	47
Ilustración 15: Ejemplo de un equipo para la extracción de material sólidos sumergidos.....	47
Ilustración 16: Esquema retiro de restos fermentados .....	49
Ilustración 17: Revolvedores de aspas.....	51
Ilustración 18: Revolvedores de Hélices Sumergidas.....	52
Ilustración 19: Mezclador de varilla.....	53
Ilustración 20: Revolvedores axiales.....	54
Ilustración 21: Revolvedores de eje largo.....	55
Ilustración 22: Revolvedores de Paleta.....	56
Ilustración 23: Revolvedores hidráulicos.....	57
Ilustración 24: Procedimiento presión de gas - proceso de Mezcla .....	58
Ilustración 25: Esquema sistema conductor de biogás.....	59
Ilustración 26: Esquema principio de funcionamiento simplificado para la protección de sobrepresión. ....	60
Ilustración 27: Acumulador de gas. ....	62
Ilustración 28: Esquema carcasa de lámina .....	63
Ilustración 29: Esquema techo de de folio.....	64

Ilustración 30 Esquema techo.....	65
Ilustración 31: Esquema Generador de Calor de Bloque (BHKW) .....	68
Ilustración 32: Visión esquemática de las distintas formas de uso energético del biogás. ....	69
Ilustración 33: Comparación entre motor a gas y motor de combustión interna .....	71
Ilustración 34: Almacén base de motores para BHKW.....	72
Ilustración 35: Turbina a gas.....	77
Ilustración 36: Esquema de la tecnología de obtención de biometano a partir de biogás.....	80
Ilustración 37: Procedimiento para el desazufado del biogás.....	83
Ilustración 38: Típica forma de un biodepurador con filtros para el desazufado biológico .....	84
Ilustración 39: Esquema aprovechamiento de los restos de fermentado.....	97
Ilustración 40: Posibles procesos de la preparación de los restos de fermentado (LANGHANS 2003) .....	104
Ilustración 41: Fotografía lechería y patio de espera de una lechería.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Ilustración 42: Fotografía de lechería con vacas estabuladas .....	111
Ilustración 43: Fotografía establos generados para la mejor obtención de purines .....	111
Ilustración 44: Fotografías de ejemplos de sistemas de recepción de residuos líquidos de lecherías.....	112
Ilustración 45. Fotografía de ejemplos de residuos sólidos.....	112

# 1 Fermentación/Biodigestión y Biogás

## 1.1 Antecedentes generales

El proceso básico en la generación de biogás es la digestión anaeróbica; una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que produce el “biogás”, que a su vez, es una mezcla gaseosa de metano  $\text{CH}_4$  (40% a 70%) y dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  (30% a 70%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, sulfuro de hidrógeno e hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí.

Tabla 1: La composición del Biogás

Composición del Biogás	
Elemento	Volumen
Metano ( $\text{CH}_4$ )	40%-70%
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	30%-70%
Nitrógeno (N)	< 3%
Oxígeno (O)	< 2%
Sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0-3%
Hidrógeno ( $\text{H}_2$ )	0-1%

Como materia prima para producir biogás pueden utilizarse diversos materiales orgánicos (biomasa), como por ejemplo:

- Residuos de cosecha: paja, rastrojo de maíz y otros cultivos, maloja de caña de azúcar, etc.
- Residuos de origen animal, desechos de establos (estiércol, orina, paja de camas, camas de gallinas ponedoras), desperdicios de mataderos (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero, etc.
- Residuos de origen humano: basura, heces y orina.
- Residuos agroindustriales: salvado de arroz, desechos de tabaco y semillas, residuos del procesamiento de hortalizas y frutas, residuos de té y café, etc.

- Residuos forestales: ramas, hojas, cortezas, etc.
- Plantas acuáticas: algas marinas.

La preparación del biogás como producto primario, puede ser realizada en cuatro etapas, como muestra la siguiente ilustración:

**Ilustración 1: Etapas del proceso de producción de Biogás**



Fuente: Elaboración propia.

La ilustración 1 muestra las cuatro etapas del proceso de producción de biogás:

a) Producción, suministro, almacenamiento, ensilado, preparación, transporte y recolección de los sustratos (materias primas renovables).

b) Proceso de fermentación y obtención de biogás.

Durante este proceso más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en el proceso de crecimiento bacteriano, frente al 50% consumido en un sistema aerobio. La Biodigestión anaeróbica es uno de los procesos más utilizados para el tratamiento de purines, en el cual la materia orgánica es transformada biológicamente bajo condiciones anaeróbicas, en metano y Dióxido de carbono (Biogás).

El gas producido puede ser recolectado y utilizado como combustible. El fango final estabilizado que se extrae no es putrescible y su contenido de organismos patógenos es nulo o muy bajo. Esta conversión biológica del sustrato complejo, en el que se encuentra materia orgánica en suspensión o disuelta, se realiza a través de una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente. Este proceso biológico natural, es realizado por grupos o comunidades de bacterias en recipientes cerrados (reactores).

c) Almacenamiento de los residuos de fermentación, tratamiento y posterior distribución sobre superficies agrícolas como fertilizante.

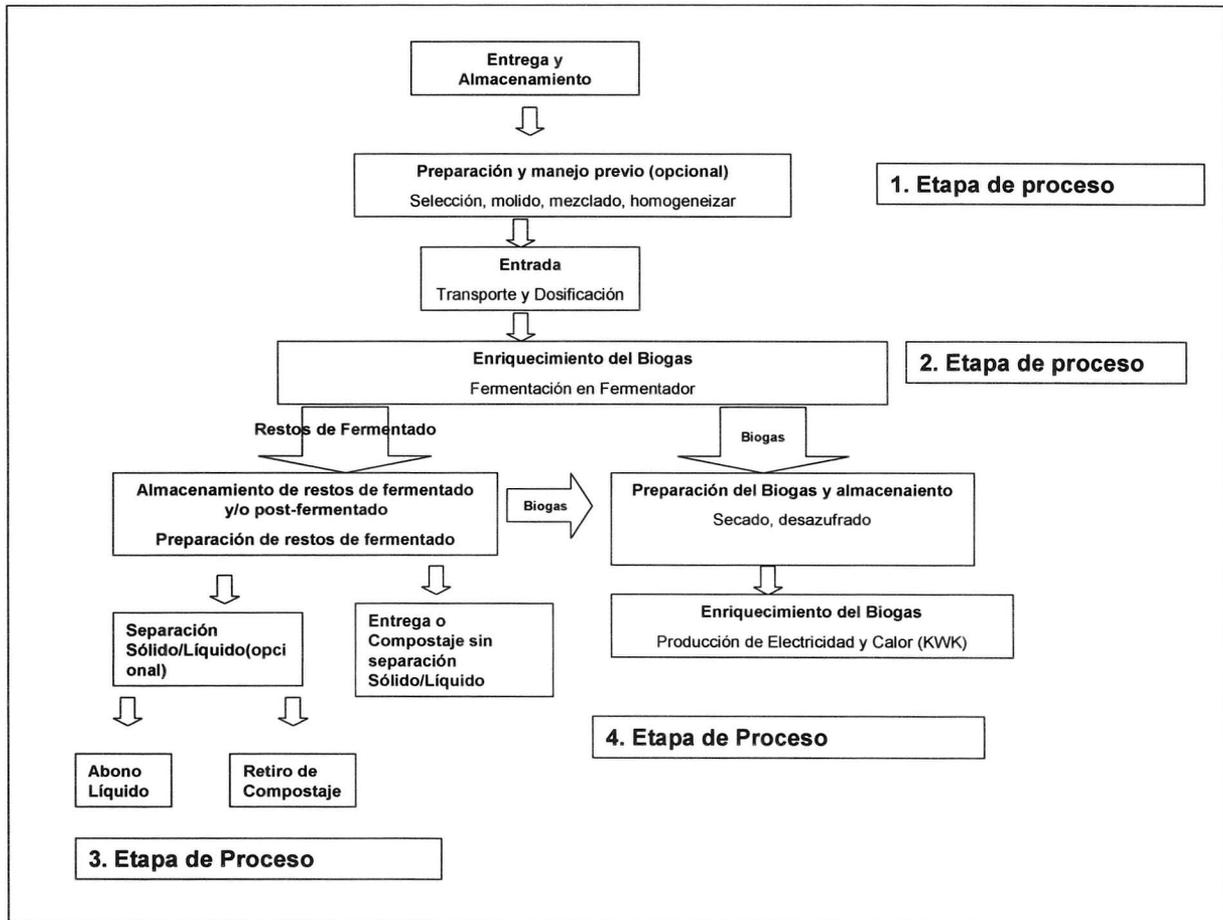
d) Almacenamiento de biogás, preparación y aprovechamiento.

Generalmente, después del digester anaerobio se incorpora una laguna de almacenamiento, en la cual se acumula el efluente tratado en el digester. La permanencia de las aguas en la laguna de almacenamiento proporciona un tratamiento adicional al purín, debido a que en ella disminuye el contenido de nitrógeno y otros nutrientes de las aguas. Se debe descartar que el efluente proveniente del digester, posea una carga orgánica muy baja, lo que implica que la laguna deja de tener actividad microbiana de descomposición o es escasa, con lo que los sólidos que salen del digester solo tienden a decantarse.

Las etapas arriba descritas, componen el proceso completo de producción de biogás, el cual tiene lugar en una planta de biogás o biodigester.

En el proceso productivo, las sustancias orgánicas (materias primas) son degradadas bioquímicamente (a través de fermentos) en varias etapas hasta transformarse en biogás. Por otra parte, los residuos orgánicos (que contienen biogás útil) son almacenados en fermentadores cerrados o en contenedores abiertos, y por norma, los líquidos son utilizados como abono agrícola en las praderas. Finalmente el biogás resultante es almacenado.

Ilustración 2: Resumen proceso productivo Biogás



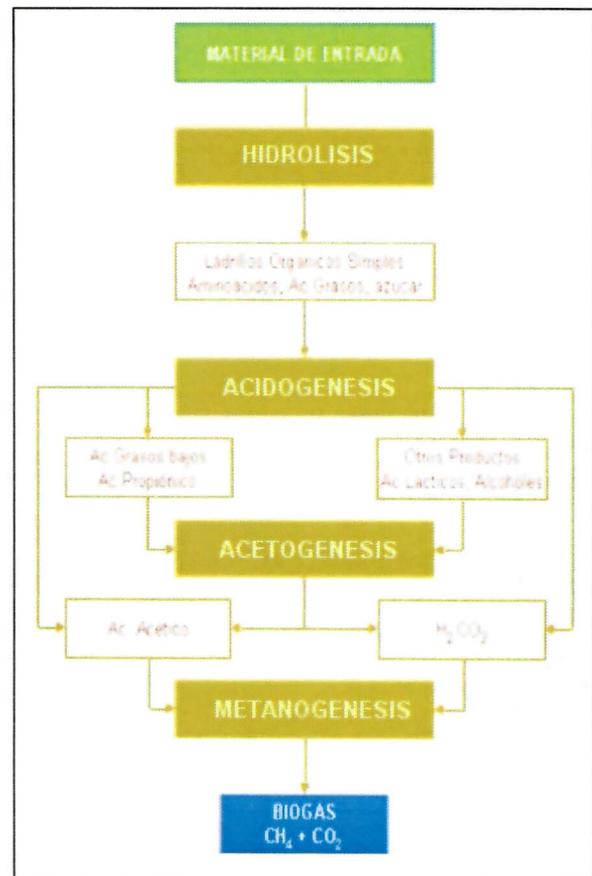
## 1.2 Proceso de fermentación

Durante el proceso de producción de biogás participan diferentes clases de microorganismos anaerobios cuyo comportamiento es influido tanto por los materiales resultantes, como por el valor del pH, la temperatura y el tipo de proceso de descomposición. De acuerdo a la adaptabilidad de estos microorganismos a las exigencias del proceso, es posible llegar a casi la total descomposición de todas las sustancias orgánicas. Se pueden distinguir cuatro procesos bioquímicos paralelos, independientes y entrelazados entre sí que permiten la degradación anaeróbica de las sustancias biógenas:

Ilustración 3: Esquema del proceso de producción de biogás

- a) Durante la hidrólisis los biopolímeros son degradados a monómeros u otros productos solubles. Con este proceso se puede lograr que las grasas se transformen en ácidos grasos e hidratos de carbono, por ejemplo los polisacáridos se convierten en mono u oligosacáridos y proteínas, y la albúmina se convierte en péptidos, ó eventualmente en aminoácidos. Esta reacción es catalizada por las facultades de los mismos microorganismos anaerobios, donde éstos mediante la difusión de exoenzimas realizan la hidrólisis del material de entrada. En esta fase, la velocidad de reacción se determina según la complejidad de los materiales introducidos.

- b) En el proceso de la acidogénesis (fermentación) – el cual se produce al mismo tiempo que la hidrólisis – los monómeros producidos se transforman por un lado en ácidos grasos y carbónicos, como por ejemplo ácidos de mantequilla, ácido propiónico y acético, y por otro lado, en alcoholes bajos como el etanol. En este paso de la degrada-

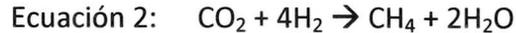


Fuente: Elaboración propia.

ción los microorganismos anaerobios ganan energía por primera vez. En esta transformación se produce un 20% del total de ácidos acéticos.

c) Durante la acetogénesis los ácidos grasos bajos y los ácidos carbónicos, al igual que los alcoholes bajos y eventualmente, también las sales disueltas en acetato, son transformados primariamente en ácidos acéticos por los microorganismos acetogénicos.

d) Al final, en la fase anaeróbica obligada, se tiene el proceso de la metanogénesis en donde los ácidos acéticos son transformados en metano (ver ecuación 1). Así mismo aproximadamente el 30% del metano se produce según la ecuación 2; Además del metano en estas reacciones químicas también se obtiene agua y CO<sub>2</sub>.



Como remanente queda una mezcla de material orgánico difícil de degradar, que contiene por ejemplo lignina y algunos elementos inorgánicos, tales como arena u otros minerales que son considerados desechos. Sin embargo, este material remanente puede ser transformado en abono ya que también contiene gran cantidad de oligoelementos, y además casi todo el nitrógeno del sustrato, en una forma biodisponible (NH<sub>4</sub> con pH neutro).

### **1.3 Tipos de Fermentación**

#### **BioDigestión convencional**

El proceso de BioDigestión convencional se suele llevar a cabo en una única fase. Las funciones de BioDigestión, espesado de fangos y formación de sobre nadantes, se lleva a cabo de forma simultánea. El fango crudo se introduce en la zona en la que el fango esta siendo digerido activamente y en la que se esta liberando gas. El fango se calienta por medio de un intercambiador de calor externo. Conforme el gas asciende hacia la superficie, arrastra partículas de fango y otros materiales, tales como grasas y aceites y a cabo formando una capa de espumas.

Como resultado de la BioDigestión, el fango se estratifica formando una capa de sobrenadante por encima del fango digerido, y experimenta un aumento de la mineralización. Como consecuencia de la estratificación y de la ausencia de mezcla completa, se utiliza menos del 50% del volumen del digestor convencional y solo se utiliza en instalaciones pequeñas.

#### **BioDigestión de una fase y alta carga**

Este proceso difiere del proceso convencional de una fase en que la carga de sólidos es mucho mayor. El fango se mezcla íntimamente mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración y se calienta para conseguir optimizar la velocidad de BioDigestión. A excepción de las mayores cargas y del mejor mezclado, entre el digestor primario de un proceso convencional de dos etapas, y un digestor de una fase y alta carga, solo existen algunas diferencias. Los equipos de mezclado deben tener mayor capacidad; y en caso de digestores de alta carga el tanque deberá ser mas profundo, para favorecer el proceso de mezcla completa.

El bombeo de fango al digestor se debe llevar a cabo de forma continua o temporalizada en ciclos de 30 minutos a 2 horas de duración, a fin de mantener condiciones constantes en el interior del reactor. El fango que entra desplaza el fango digerido hasta un tanque de almacenamiento. Debido a que no se produce una separación del sobrenadante, y a que los sólidos se reducen en un 45-50% por liberarse en forma de gas, el fango digerido suele tener una concentración del orden de la mitad de la de los fangos crudos. Los digestores pueden tener cubiertas fijas o flotantes. Algunas o todas las cubiertas flotantes pueden ser, a su vez, campanas de recogida de gas, lo cual permite disponer de un volumen de almacenamiento de gas independiente o un depósito de almacenamiento de gas adicional. Alternativamente, el gas se puede almacenar en una campana de gas independiente o en un depósito de almacenamiento a presión.

### **BioDigestión en dos fases**

En muchas ocasiones un digestor de alta carga se combina en serie con un segundo tanque de BioDigestión. En este proceso, el primer tanque se utiliza para la BioDigestión, y se equipa con dispositivos y concentración del fango digerido y para la formación de un sobrenadante relativamente clarificado. En muchas ocasiones ambos tanques se construyen idénticos, de forma que cualquiera de ellos puede ser el tanque primario. En otros casos, el segundo de los tanques puede ser abierto, no calentado o una laguna de fango. Los estanques pueden tener cubiertas fijas o flotantes al igual que en la BioDigestión de una etapa. Las ventajas que aporta este proceso de dos fases, comparándolas con el de una sola, se resumen a continuación:

- El primer reactor actuará de amortiguador a la llegada de algún golpe de carga del afluente, aportando gran seguridad y estabilidad al sistema; también este reactor eliminará el oxígeno disuelto del afluente, por lo que la eficacia en el segundo reactor será óptima.
- Permite conseguir un BioGás de mayor riqueza en metano, lo que repercute en el balance económico.
- Puede conseguirse un aumento cinético de la hidrólisis por agitación en el primer reactor, y evitar la pérdida de microorganismos de esta primera etapa intercalando un decantador y bomba, para retornar éstos a su origen.

- Este sistema admite una mayor flexibilidad en variaciones de carga, pH y temperatura, a la vez que ofrece mayores facilidades en la actuación, seguimiento y control del proceso.

## **1.4 Parámetros**

Descripción y relevancia de parámetros importantes para analizar muestras para obtener resultados relevantes para la producción de biogás:

### **1.4.1 Temperatura**

La temperatura es importante para las bacterias que trabajan en el proceso de degradación de la materia orgánica, es más cada tipo de bacterias tiene una temperatura óptima para vivir. Puesto que, en los procesos de producción de biogás se requiere optimizar la producción de metano, se intenta de optimizar el ambiente para la vida de las bacterias metanogénicas. Los análisis realizados en laboratorio demuestran, que una temperatura óptima para su funcionamiento es alrededor de los 35 °C, que es un ambiente mesofílico (+/- 37 °C), en la práctica también existen plantas operando en el rango termofílico (+/- 55 °C). Situación, que da cuenta que las bacterias son capaces de adaptarse dentro de ciertos rangos de temperatura, siendo importante que la temperatura sea estable y no varíe durante el día.

### **1.4.2 pH**

El valor del pH determina la acidez del sustrato y muestra si existe un desequilibrio en la cadena de producción de las bacterias. El óptimo encontrado para el proceso de mecanización es el valor de pH que oscila entre 6,6 y 7,6.

### **1.4.3 Materia seca/sólidos totales (ST) y contenido de humedad**

La materia seca, también denominada con la abreviación ST (sólidos totales), especifica la masa sólida dentro de la prueba que no es agua. La que se calcula al separar la masa seca de la masa total, midiendo, además, la cantidad de agua a partir de la humedad de la biomasa.

Los sólidos totales son los obtenidos en el laboratorio después de secar la muestra a 103-105°C.

#### **1.4.4 Materias orgánica/Sólidos volátiles (SV)**

La materia orgánica o SV (sólidos volátiles) define la masa orgánica que puede ser degradado para generar el biogás, la cual es definida a través del análisis de un porcentaje de la materia seca del sustrato, siendo este parámetro uno de los más importantes para encontrar la cualidad de un sustrato para la producción de biogás.

Los sólidos volátiles (SV) corresponden a los compuestos volatilizados durante la calcinación de la muestra a  $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$ , representando una medida de la materia orgánica.

#### **1.4.5 Sólidos suspendidos totales (SST)**

Los sólidos suspendidos totales (SST) son los obtenidos después de separar los sólidos por centrifugación y secarlos a  $103\text{-}105^{\circ}\text{C}$ . Las condiciones de centrifugación dependen del tipo de lodo que se trabaje, lo importante es lavar al menos 3 veces un volumen conocido.

#### **1.4.6 Densidad aparente**

La densidad de un material determina el peso por volumen, y es importante para calcular el volumen del reactor necesitado para digerir una cierta cantidad de material medido en toneladas.

#### **1.4.7 Demanda química de oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno es una medida del nivel de materia orgánica químicamente oxidable en la muestra. Se define, como la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación total de la materia orgánica de la muestra, este método es aplicable a muestras líquidas, pero posee una modificación para poder aplicarla en sólidos. La determinación de este parámetro puede ser en fase soluble o total, la primera de éstas es cuando la muestra ha sido expuesta a un paso de centrifugación, donde el sobrenadante será analizado con su respectiva dilución; y la fase total corresponde cuando la muestra ha sido diluida dentro de los rangos de medición tal cual, sin ser expuesta a procesos de separación.

#### **1.4.8 DBO5: Demanda biológica de oxígeno en 5 días**

Este parámetro no es relevante para la producción de biogás.

#### 1.4.9 Nutrientes e inhibidores

Los nutrientes, y específicamente el nitrógeno en el sustrato son importantes en varios aspectos, por un lado para definir el valor del fertilizante que produce la planta de biogás, a su vez delimitan el proceso y una posible inhibición de este. Para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales. Los nutrientes en un proceso de producción de biogás son medidos a través parámetros tales como la DBO5 (demanda biológica de oxígeno en 5 días), DQO (demanda química de oxígeno) nitrógeno total, fósforo total y materia orgánica.

Una buena productividad de metano requiere de una razón determinada de Carbono/nitrógeno, con el fin de evitar la formación de compuestos, como el amonio que presenta efectos inhibitorios de la producción de metano. La relación C (carbono): N (nitrógeno): P (fósforo): S (azufre) debiera establecerse alrededor de 600:15:5:1, a fin de proveer a los microorganismos de las condiciones adecuadas para su desarrollo.

La carencia en un nutriente puede provocar una disminución en la actividad microbiana, y por ende una baja en la velocidad de producción de metano

La inhibición en niveles tan bajos como 1,7 g/l N-NH<sub>4</sub>, sin embargo, también se ha demostrado que la actividad metanogénica puede ser mantenida aún a niveles de 12 g/l N-NH<sub>4</sub>, lo que es posible, siempre y cuando se utilicen lodos granulares, y siempre que sean previamente adaptados. No obstante, la actividad metanogénica comienza a disminuir a partir de 2,5 g/l N-NH<sub>4</sub>, por lo que se podría concluir que hasta dicho nivel la actividad es máxima.

La mayor "resistencia" a la inhibición de productos tóxicos en general y a la ejercida por el nitrógeno amoniacal en particular de los lodos granulares, en comparación con lodos floculares, ha sido también ampliamente demostrada, por lo que se concluye que siempre un reactor utilizando lodos granulares podrá tener un mejor comportamiento, que uno con lodos floculares, trabajando a los mismos niveles de productos inhibitorios. Sin embargo estos lodos sólo pueden ser utilizados para el tratamiento de efluentes líquidos.

También se ha demostrado el efecto que el pH y la temperatura pueden ejercer sobre la actividad de las bacterias metanogénicas, como resultado de su impacto sobre el equilibrio entre amoníaco y el ión amonio, ya que el compuesto que finalmente produce la inhibición sobre las bacterias metanogénicas es el amoníaco en su forma libre. Al igual que en el caso del amonio, los niveles de inhibición no están claros y varían ampliamente. Los valores van desde presencia de inhibición desde 0,02 gN-NH<sub>3</sub>/L para rango mesófilo y 0,2 gN-NH<sub>3</sub>/L para lodo termófilo no adaptado hasta 1,1 gN-NH<sub>3</sub>/L en un ensayo con purines de cerdo con un lodo adaptado.

La hidrólisis y fermentación de sustratos con alto contenido proteico genera grandes cantidades de amonio, el cual al acumularse, desplaza el equilibrio amonio-amoniaco, lo que produce el efecto inhibitorio anteriormente descrito.

Otros compuestos derivados de la degradación de las proteínas también pueden generar inhibición en las bacterias metanogénicas, un ejemplo de esto, lo constituye el ácido fenilacético, el cual se puede acumular en el medio producto de la fermentación de sustratos con alto contenido proteico.

Los ácidos grasos volátiles (AGV), agentes intermediarios del proceso, también tienen un rol importante en los procesos de inhibición que sufren las bacterias participantes en el proceso de digestión anaeróbica, ya que su concentración varía rápidamente ante cambios en el sistema, por ejemplo cuando ocurren sobrecargas orgánicas. Se ha reportado inhibición en la acetogénesis debido a acumulación de la forma no ionizada de propiónico, mientras que la acumulación de acético inhibe la acetogénesis a partir de propiónico. Sin embargo, se requerirían concentraciones por encima de los 4000 mg/L de acético para afectar de forma significativa la producción de metano.

Los compuestos azufrados en altas concentraciones también son inhibitorios de una gran cantidad de población bacteriana. La relación sulfhídrico/metano en el biogás está dada por la competencia existente entre las bacterias metanogénicas y sulfuroductoras por los sustratos útiles. Además, de la competencia concentraciones altas de sulfato y ácido sulfhídrico también causan inhibición, la cual se ve favorecida por condiciones de pH bajo y bajas temperaturas.

Otras fuentes de inhibición dependiendo de la concentración en que se encuentren son metales pesados, ácidos grasos de cadena larga, entre otros.

#### **1.4.10 Alcalinidad y ácidos orgánicos volátiles (TA/ FOS)**

La alcalinidad es definida como la capacidad de neutralizar ácidos, debido a la presencia de sustancias tampón o amortiguadoras. El comportamiento de estas sustancias puede variar ampliamente de acuerdo con el pH de la disolución (APHA, 1992).

Los reactores anaerobios se acidifican debido a sobrecargas y presencia de tóxicos, dicha acidificación se debe a la diferencia de velocidades con que las poblaciones bacterianas realizan el proceso de acidogénesis y metanogénesis, con lo cual podrían acumularse AGVs, y afectar el pH, lo que finalmente puede provocar la acidificación del reactor. La medida del pH como parámetro de control no permite adelantarse al evento de acidificación del sistema, pues su disminución es la respuesta al agotamiento de la alcalinidad considerando que los AGVs son el intermediario más importante en el proceso de digestión anaerobia.

El parámetro alfa ( $\alpha$ ) es una relación entre alcalinidades que se puede determinar como el valor de alcalinidad debida a Ácidos Grasos Volátiles (AGV) sobre la alcalinidad total. Este valor se puede usar como parámetro de control de estabilidad, recomendando no superar el valor de 0,3 para evitar la acidificación del reactor cuando se cuenta con valores de alcalinidad total cercanos a los 2500 mg CaCO<sub>3</sub>/L. Cuando los digestores operan con alcalinidad total mayor, el límite máximo de alfa debe corroborarse.

En digestión anaerobia normalmente la alcalinidad se clasifica en alcalinidad total (AT), alcalinidad parcial o verdadera (AP) y alcalinidad intermedia (AI). La alcalinidad total (AT) se puede considerar aproximadamente como la suma de la alcalinidad debida al bicarbonato y a los ácidos grasos volátiles y se determina a través de una valoración desde el pH inicial hasta pH 4,3, expresándose generalmente como CaCO<sub>3</sub> equivalente.

#### **1.4.11 Amonio y amoniaco**

Se considera amonio disuelto a la suma del amoníaco disuelto ( $\text{NH}_3$  (aq)) más los iones amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Con este método se puede determinar amonio a concentraciones entre 0,06 a 1.400 mg  $\text{NH}_3\text{-N/L}$ , por lo que se debe considerar la dilución correspondiente.

La cantidad relativa de amonio e ión amonio es determinada por el pH de la solución. En solución ácida, donde el ión hidrógeno está fácilmente disponible, virtualmente todo el nitrógeno amoniacal es convertido a ión amonio, mientras que a pH por sobre 9,3 el amonio será transformado a ión amonio.

#### **1.4.12 Actividad metanogénica**

Dentro de la caracterización de los lodos anaerobios a utilizar para inocular los ensayos, se debe determinar la actividad metanogénicas, que tiene por objetivo determinar la máxima capacidad degradativa de la población metanogénica en condiciones óptimas. La etapa de producción de metano es considerada la etapa limitante de los sistemas anaerobios al poseer la menor velocidad de crecimiento de todas las poblaciones involucradas.

Para determinar la actividad metanogénica se alimenta el producto intermediario ácidos grasos volátiles (AGV), estos corresponden a ácidos grasos volátiles de cadena corta, formándose normalmente en el proceso anaerobio por la acción de bacterias acidogénicas, con la actividad metanogénica y la cantidad total de lodo en el reactor se puede estimar la velocidad máxima de carga orgánica que debe aplicarse a un reactor anaerobio. Todos los microorganismos necesitan nutrientes y elementos trazas para su metabolismo, en la metanogénesis en particular las enzimas contienen iones como Ni y Co, tales como la coenzima F420, además, de Ni y Co también se ha reportado que el Fe en cantidades trazas son estimuladores del proceso anaerobio. La falta o restricción de algún micronutriente o elemento traza podría provocar por si solo la disminución de la velocidad de metanogénesis. Nitrógeno, fósforo, sulfuro, calcio, magnesio, hierro, cobalto y níquel han sido probados como esenciales para sostener una alta velocidad de utilización del acetato.

Los ensayos se realizan en botellas de 150 mL, en las cuales se colocan el lodo, el sustrato (AGV) y los nutrientes necesarios. El parámetro de seguimiento de este ensayo es la producción de metano diariamente. Como nutrientes se utilizan cuatro soluciones de macronutrientes, una solución de elementos traza, una de sulfuro de sodio y extracto de levadura. La composición de la disolución de nutrientes utilizada se detalla en la tabla que sigue. El sulfuro de sodio se agrega para mantener la anaerobiosis en el medio. Los AGV corresponden a ácidos grasos volátiles de cadena corta, formándose normalmente en el proceso anaerobio por la acción de bacterias acidogénicas. Se recomienda una concentración de AGV entre 3.5 y 4.5 gDQOAGV/L. En los ensayos se utiliza ácido propiónico, butírico y acético.

Tabla 2. Composición Soluciones utilizadas en los ensayos de actividad metanogénica.

Nutriente	Concentración	Cantidad (150mL)	Cantidad (100mL)	Cantidad (50mL)
<b>Solución de Macronutrientes</b>	<b>g/L</b>	<b>mL</b>	<b>mL</b>	<b>mL</b>
NH <sub>4</sub> Cl	85	0.6	0.4	0.2
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	37	0.3	0.2	0.1
CaCl <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O	8	0.3	0.2	0.1
MgSO <sub>4</sub> •4H <sub>2</sub> O	9	0.3	0.2	0.1
<b>Solución de elementos trazas</b>	<b>mg/L</b>	<b>0.6 mL</b>	<b>0.4mL</b>	<b>0.2 mL</b>
FeCl <sub>3</sub> •4H <sub>2</sub> O	1000			
CoCl <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O	1000			
MnCl•4H <sub>2</sub> O	250			
CuCl <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O	15			
ZnCl <sub>2</sub>	25			
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	25			
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> •4H <sub>2</sub> O	45			
Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> •H <sub>2</sub> O	50			
NiCl <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O	25			

EDTA	500			
HCl 36%	0.5			
Resazurín	250			
<b>Solución de Sulfuro</b>	--	<b>g</b>	<b>G</b>	<b>g</b>
Na <sub>2</sub> S•H <sub>2</sub> O	--	0.03	0.02	0.01
<b>Extracto de Levadura</b>	--	<b>g</b>	<b>G</b>	<b>g</b>
	--	0.03	0.02	0.01

#### 1.4.13 Biodegradabilidad anaerobia

El análisis de biodegradabilidad anaerobia determina el porcentaje de la materia orgánica que es susceptible de ser degradado anaeróbicamente, para ello se pone en contacto el agua residual con lodo anaerobio, y se monitorea la producción de biogás.

La metodología es básicamente la misma que la utilizada para la medición de actividad metanogénicas, la diferencia radica, en que el medio de cultivo utilizado para la mezcla de AGV es reemplazada por la muestra a analizar.

Esta debe diluirse (en caso necesario) de forma de conseguir una concentración final en la botella cercana a 5gDQO/L. Junto con la adición de nutrientes, se debe añadir bicarbonato de sodio, en relación 1 g bicarbonato/g DQO, para neutralizar la producción de ácidos orgánicos y mantener el pH durante el ensayo, luego al finalizar completamente la producción de biogás se toma una muestra de la botella y se le mide DQO.

#### 1.4.14 Condiciones para la Producción de Biogás

Diversas variables influyen en el proceso de digestión anaeróbica, pero para que las bacterias aseguren su ciclo biológico es estrictamente necesario que se presenten en condiciones óptimas los siguientes factores:

- **Temperatura:** La digestión anaeróbica funciona en un amplio rango de temperaturas, pero dentro de él se distinguen unas zonas claramente diferenciadas que corresponden a las temperaturas de funcionamiento óptimo de tres grupos diferentes de bacterias: las psicrófilas (<20°C), las mesófilas (20°C<T<45°C) y las termófilas (50°C<T<60°C). Es recomendable trabajar en el rango mesófilo, ya que alrededor de 35-36°C se tienen las mejores condiciones de crecimiento de las bacterias y

velocidad de producción de metano.

- **Acidez:** Este es uno de los parámetros de control más importantes debido a que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a las variaciones del mismo. Así, la acidez determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6. En este rango se consigue una buena degradación y una alta concentración de metano en el biogás.
- **Contenido de sólidos:** Los sólidos son los alimentos para las bacterias. Si la alimentación está muy diluida, las bacterias no pueden operar bien. Al mismo tiempo un exceso en sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y por consiguiente la efectividad del proceso. Se suele operar en buenas condiciones con menos de un 10% de sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido de humedad.
- **Nutrientes:** Para el crecimiento y la actividad de las bacterias, es necesario un aporte de nutrientes a las células. Éstas deben disponer en el sustrato que alimenta al biodigestor de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales. Pequeñas concentraciones de sodio, potasio, calcio, molibdeno o hierro favorecen la descomposición del sustrato y la formación de metano.
- **Tóxicos:** Aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas.
- **Alcalinidad:** Da una medida de la capacidad amortiguadora (colchón) que posee un digestor ante posibles cambios del pH del efluente a tratar, y ya se ha visto la importancia de que el pH se mantenga más o menos constante dentro de un rango de valores. Esta alcalinidad va a determinar el que se puedan tratar o no residuos que no sean neutros. El principal tampón lo constituye el sistema dióxido de carbono/bicarbonato, el  $\text{CO}_2$  que se forma en el propio proceso al descomponerse la materia orgánica reacciona con el amoníaco procedente de la dominación de compuestos nitrogenados y con los cationes metálicos presentes en el medio, formando carbonatos y bicarbonatos.
- **Tóxicos:** Aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes, antibióticos y pesticidas.

## 1.5 Parámetros - Los resultados de análisis en laboratorio

### 1.5.1 Resultados de muestras – productores seleccionados

Tabla 3: Resultados muestras-productores seleccionados

Muestra	Número	Materia seca (g/ g muestra)	Materia orgánica (g/ g muestra)
Estiércol	7	0,128	0,096
	17	0,142	0,088
	18	0,108	0,085
	32	0,161	0,111
	41	0,148	0,095
	45	0,166	0,133
	48	0,118	0,092
	51	0,170	0,078
	59	0,116	0,086
	Cama de paja	7	0,212
20		0,542	0,451
32		0,154	0,116
41		0,294	0,232
45		0,324	0,230
48		0,305	0,262
59		0,317	0,287
Ensilaje de pasto	7	0,335	0,309
Restos de Forraje	18	0,332	0,308
	41	0,496	0,464
	48	0,289	0,271
	59	0,150	0,132

### 1.5.2 Resultados de muestras – Análisis completo de residuo agropecuario

Tabla 4: Muestra Estiércol N°20

	Resultado	Unidades
DBO5	920,13	gramos/g muestra seca
DBO	1183,02	gramos/g muestra seca
Sólidos Totales	0,03	gramos/litro muestra
Sólidos Volátiles	20,40	gramos/g muestra
Nitrógeno Total	0,01	gramos/litro muestra
Fósforo Total	3,54	mg/g muestra seca
Densidad	1,02	gramos/ml
Materia orgánica	0,02	gramos/gramos
Humedad	97,01	%
Amonio	0,12	mg/g muestra seca
Nitrato	0,055	mg/g muestra
pH	7,10	Unidades de Ph
Carbono Orgánico	44, 36	% base seca

Tabla 5: Muestra ensilaje Pasto N° 51

	Resultado	Unidades
DBO5	968,48	gramos/g muestra seca
DBO	1052,05	gramos/g muestra seca
Sólidos Totales	0,39	gramos/litro muestra
Sólidos Volátiles	96,03	gramos/g muestra
Nitrógeno Total	0,01	gramos/litro muestra
Fósforo Total	0,84	mg/g muestra seca
Densidad	0,29	gramos/ml
Materia orgánica	0,33	gramos/gramos
Humedad	60,73	%
Amonio	0,44	mg/g muestra seca
Nitrato	0,017	mg/g muestra
pH	4,41	Unidades de Ph
Carbono Orgánico	39,45	% base seca

**Tabla 6: Muestra Ensilaje maíz N° 7**

	<b>Resultado</b>	<b>Unidades</b>
DBO5	1018,42	gramos/g muestra seca
DBO	1056,88	gramos/g muestra seca
Sólidos Totales	0,30	gramos/litro muestra
Sólidos Volátiles	151,65	gramos/g muestra
Nitrógeno Total	0,00	gramos/litro muestra
Fósforo Total	0,36	mg/g muestra seca
Densidad	0,51	gramos/ml
Materia orgánica	0,30	gramos/gramos
Humedad	70,18	%
Amonio	0,35	mg/g muestra seca
Nitrato	0,009	mg/g muestra
pH	3,69	Unidades de Ph
Carbono Orgánico	39,63	% base seca

**Tabla 7: Muestra Restos de forraje N°20**

	<b>Resultado</b>	<b>Unidades</b>
DBO5	868,85	gramos/g muestra seca
DBO	944,88	gramos/g muestra seca
Sólidos Totales	0,41	gramos/litro muestra
Sólidos Volátiles	111,00	gramos/g muestra
Nitrógeno Total	0,01	gramos/litro muestra
Fósforo Total	0,38	mg/g muestra seca
Densidad	0,30	gramos/ml
Materia orgánica	0,37	gramos/gramos
Humedad	58,61	%
Amonio	0,47	mg/g muestra seca
Nitrato	0,065	mg/g muestra
pH	5,13	Unidades de Ph
Carbono Orgánico	35,43	% base seca

## 1.6 Cogeneración de energía térmica y eléctrica.

El biogás puede ser utilizado para producir energía térmica y eléctrica. Un metro cúbico de biogás con un contenido de 60% de metano, tiene un poder calorífico de aproximadamente 5.500 Kcal., esta cantidad de biogás totalmente quemada puede alcanzar para:

- Generar 1,25 kw/h de electricidad.
- Generar 6 horas de luz equivalentes a un bombillo de 60 vatios.
- El funcionamiento de un refrigerador de un metro cúbico de capacidad durante una hora.
- Hacer funcionar una incubadora de un metro cúbico de capacidad durante 30 minutos.
- Hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas.

En sistemas de cogeneración el biogás puede generar energía térmica y eléctrica a la vez, evitando pérdidas de energía. Esto, explicándolo de forma sencilla, implica quemar la totalidad del Biogás producido (el metano capturado) en un motor que mueve un alternador y recuperando el calor que este produce durante su funcionamiento para “volcarlo” en otros procesos que lo requieran. De esta forma, se produce electricidad y calor, ahorrando por consiguiente en los consumos energéticos de la planta (energía eléctrica y térmica).

El sistema de cogeneración que se propone comprende un equipo que produce energía eléctrica y térmica al mismo tiempo, consiste en un equipo optimizado en su funcionamiento para lograr el máximo aprovechamiento del valor energético del combustible empleado, y en el cual sumando la energía eléctrica y térmica producidas se tiene un rendimiento de más del 80%. En relación a esto último, a continuación se muestran los rendimientos típicos a nivel europeo para un motor, considerando un rendimiento de la caldera de recuperación de un 65% y del intercambiador de calor de un 98%.

**Tabla 8: Rendimientos típicos para un motor.**

Rendimiento	Motor Combustión Interna
Eléctrico	39,5%
Térmico (gases)	23,4%
Térmico (refrigeración)	21,6%

Fuente: Elaboración propia

La transformación del biogás en energía aprovechable se lleva a cabo con elevada eficiencia en centrales de cogeneración, mediante motores de combustión interna para la producción combinada de energía térmica y eléctrica, las cuales son destinadas al autoconsumo de la explotación agrícola o para la exportación a la red eléctrica pública. Los motores de combustión interna se fabrican en un rango de potencia que va desde las decenas de kW hasta 20 MW, pudiendo alcanzar rendimientos globales (térmico y eléctrico) que varían entre un 70% y poco más del 80%. La transformación de la energía del combustible en energía eléctrica varía entre un 30% y 40% a través de un eje acoplado al motor. El calor recuperable está constituido por intercambiadores de calor que se instalan en el sistema de refrigeración del motor, que representa alrededor del 30%, y la recuperación de calor de los gases de escape que representan entre un 25% y 35% de la energía aportada por el combustible al motor.

## **1.7 Biometano**

Entre los distintos portadores energéticos, el biometano resulta un conveniente sustituto de varios energéticos primarios. Como biocombustible para el sector transporte, el biometano tiene un buen desempeño, no es necesario mezclarlo con los derivados del petróleo, y representa una buena opción para la transición hacia el hidrógeno como combustible del futuro.

En contraste a los biocombustibles comunes, el biometano es producido a partir de la biomasa residual generada en el sector agrícola y forestal, con una bajísima o prácticamente nula emisión de carbono, disponiendo entonces de manera inmediata y sostenida de ventajas para controlar las emisiones de gases con efecto invernadero y con ello hacer uso de los mecanismos y metodologías existentes para la emisión de bonos de carbono mediante la implementación de MDL. Por otra parte, el uso de biomasa residual no ocasiona un conflicto con la seguridad alimentaria, ni exige el uso intensivo del suelo dedicado a sólo ciertos tipos de cultivos agrícolas o de plantaciones forestales.

El biogás crudo contiene metano entre un 50 a 70%, dependiendo de la materia prima introducida al biodigestor. El resto está compuesto principalmente de carbono y trazas de azufre, nitrógeno y oxígeno juntos. Este proceso consiste en transformar el biogás en biometano puro. Esto puede hacerse en la planta de biogás o en el lugar donde se ubique el usuario de la energía. Esto da la posibilidad de crear pequeñas centrales en forma descentralizada.

**Tabla 9: Principales diferencias entre biogas y biometano**

<b>Principales diferencias entre biogás y biometano</b>		
<b>Sustancia</b>	<b>Biogás</b>	<b>Biometano</b>
Metano	50-70%	93-98%
Dióxido de carbono	25-40%	1%
Nitrógeno	< 3%	1%
Oxígeno	< 2%	-
Hidrógeno	trazas	-
Sulfuro de hidrógeno	Hasta 4000 ppm	-
Amoníaco	trazas	-
Etano	-	< 3%
Propano	-	< 2%
Siloxano	trazas	-

Fuente: Thrän 2005.

## 1.8 Fertilizantes orgánicos.

Durante el proceso de fermentación queda como efluente del biodigestor una mezcla de material orgánico difícil de degradar, por ejemplo la lignina y elementos inorgánicos tales como arena u otros minerales que son considerados como desechos. Se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K)) contenidos en la materia prima. Este residuo puede ser transformado en un valioso abono orgánico.

El bioabono es un líquido espeso casi negro, que no tiene olor, no posee agentes causantes de enfermedades, tiene cerca de 90% de contenido de agua y un pH cercano a 7,5 (ligeramente alcalino). La composición del bioabono que se utiliza en los cultivos tiene en promedio un 8,5% de materia orgánica, 2,6% de nitrógeno, 1,5% de fósforo y 1,0% de potasio. El biofertilizante puede competir o complementarse con los fertilizantes químicos, lo que origina elementos más fácilmente asimilables.

Respecto a su aplicación en cultivos se han hallado notorios resultados positivos, según los análisis de laboratorios: Su aplicación durante varios años permite un mejoramiento en la estructura del suelo, aumenta la proporción de materia orgánica y permite almacenar más agua. La utilización de biodigestores ofrece, por lo tanto, grandes ventajas para el tratamiento de los residuos orgánicos de las explotaciones agropecuarias, pues además de disminuir la carga contaminante de las mismas, extrae gran parte de la energía contenida en el material. Su uso ha sido probado en varios países y en diferentes cultivos, reportando incrementos en las cosechas y mejoramiento en las propiedades del suelo, a diferencia de los fertilizantes químicos que reducen la productividad de la tierra.

El uso del biofertilizante permite implementar ciclos cerrados de producción y recuperar suelos degradados mediante prácticas sustentables en el tiempo, donde los biofertilizantes restablecen el ciclo natural de la materia orgánica; otras de las potenciales ventajas del uso del biofertilizante son: no deja tóxicos en el suelo, aumenta el contenido del humus del suelo, el cual mejora la estructura y la textura del terreno, facilita la aireación, la tasa de formación de depósitos de nutrientes, y la capacidad de retención e infiltración del agua.

El efluente lleva parte de sus nutrientes en forma no disponible de manera inmediata para las plantas, es decir los libera paulatinamente mediante ciertos procesos de descomposición de materia orgánica, siendo la nutrición lenta, pero continuada.

Los biofertilizantes permiten su utilización en diferentes estados, tales como líquido, compostado o seco:

- Efluente líquido: Presenta ventajas como la alta disponibilidad de nutrientes y la buena absorción por parte de las plantas, puede aplicarse inmediatamente después de salir del biodigestor, o almacenarse en tanques tapados por un periodo no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno.
- Efluente compostado: Otra manera de manejar el efluente es agregándole material verde (por ejemplo los desechos de forraje de establo) y compostándolo, este método produce pérdidas de nitrógeno del 30% al 70%, pero tiene la ventaja de que el producto final es compacto, en forma de tierra negra, lo que facilita el transporte y aplicación.
- Efluente seco: El resultado del secado es una pérdida casi total de nitrógeno orgánico (cerca del 90%), lo que equivale al 5% del nitrógeno total. Las producciones observadas en cultivos al utilizar el efluente seco son las mismas que al usar estiércol seco o estiércol almacenado, este procedimiento se recomienda cuando la fertilización se va a realizar en grandes áreas, o cuando la distancia a la zona de cultivo sea larga o se presenten dificultades de acceso.

Un metro cúbico de bioabono productivo y aplicado diariamente, puede fertilizar más de dos hectáreas de tierra por año.

## **2 Identificación y evaluación de alternativas técnicas para la producción de biogás y obtención de energía eléctrica y térmica.**

### **2.1 Alternativas técnicas – Planta de Biogás**

#### **2.1.1 El fermentador**

El fermentador es la parte esencial de cualquier planta de biogás donde tenga lugar el proceso de generación de biogás. En el fermentador cuatrillones de bacterias descomponen los elementos orgánicos de la sustancia de entrada (substrato), liberando así el biogás. Como sustratos principalmente se usan sustancias orgánicas (de carbono) como los purines, el estiércol, residuos de cultivos, pastos y lodos.

Estos componentes que son fácilmente degradables, generalmente son los responsables del lado desagradable del sustrato no tratado: El mal olor generado por las emisiones de dióxido de carbono y amoníaco, así como de la alta pérdida de oxígeno en el suelo o en las aguas.

El diseño del fermentador pone el nombre de la planta de biogás. Existe una amplia gama de tipos de fermentadores y sistemas de digestión. No todos los tipos de fermentadores han dado buenos resultados durante su funcionamiento continuo y por lo tanto tampoco tienen relevancia en la práctica.

Se pueden clasificar las plantas de biogás según sus formas de funcionamiento (condición de relaciones) en plantas individuales, plantas comunes o plantas comunales/industriales de mayor escala.

Tabla 10: Sistemas discontinuos y continuos

<u>Sistemas Discontinuos</u>	<u>Sistemas Continuos</u>
<p>Los Sistemas Discontinuos vienen sin una tecnología de entrada especial para los sustratos y sin tecnología de mezclado especial para la mezcla de los contenidos del fermentador, lo que los hace ser técnicamente muy sencillos y baratos.</p> <p><b>Importantes Formas Constructivas de Fermentador:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fermentador por Percolación</li> <li>• Fermentador por Coagulación</li> <li>• Fermentador de Silo</li> </ul>	<p>El sistema de corriente de coagulación, un sistema continuo se caracteriza por su gran uniformidad en la producción de biogás. Sin embargo, el alto grado de automatización lleva a altos costos de inversión.</p> <p><b>Importantes Formas Constructivas de Fermentador:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fermentador por Percolación</li> <li>• Fermentador por Flotación</li> <li>• Fermentador por Acumulación</li> </ul>

En la actualidad es posible construir y poner en marcha fermentadores con volúmenes de hasta 4.000m<sup>3</sup> (y en casos especiales aún más). El fermentador funciona generalmente en el rango mesófilo (35-30°C) o termófilo (55-60°C). Estas temperaturas requieren de un sistema de calefacción en buenas condiciones de funcionamiento. Ni siquiera la difusión repetitiva del sustrato en el fermentador genera las condiciones íntegramente adecuadas para el funcionamiento de los grupos de bacterias (hidrólisis y metanogénesis).

Periodos de permanencia comparativamente largos compensan estas condiciones subóptimas. Los largos periodos de permanencia generan un efecto de dilución del sustrato en el fermentador. Además se opina que los grupos de materiales del sustrato tienen periodos de descomposición distintas, por lo cual no se puede realizar una separación precisa entre hidrólisis y metano génesis.

En relación a la temperatura de proceso, los fermentadores se dividen básicamente en tres distintos rangos de temperatura, a las cuales se puede producir la fermentación.

- Rango de Temperatura inferior (psychrophil < 25°C)
- Rango de Temperatura media ( mesophil 32-42°C)
- Rango de Temperatura Superior ( thermophil 50-57°C)

En dependencia del rango de temperatura se producen distintos tiempos de permanencia de los sustratos en el fermentador.

Mientras más sustrato haya disponible, es necesario más volumen de fermentador. Desde una determinada cantidad, se justifica operar más cantidad de fermentadores en línea, uno detrás de otro, para obtener una mayor cantidad de biogás.

División de Espacios de las Etapas de fermentación

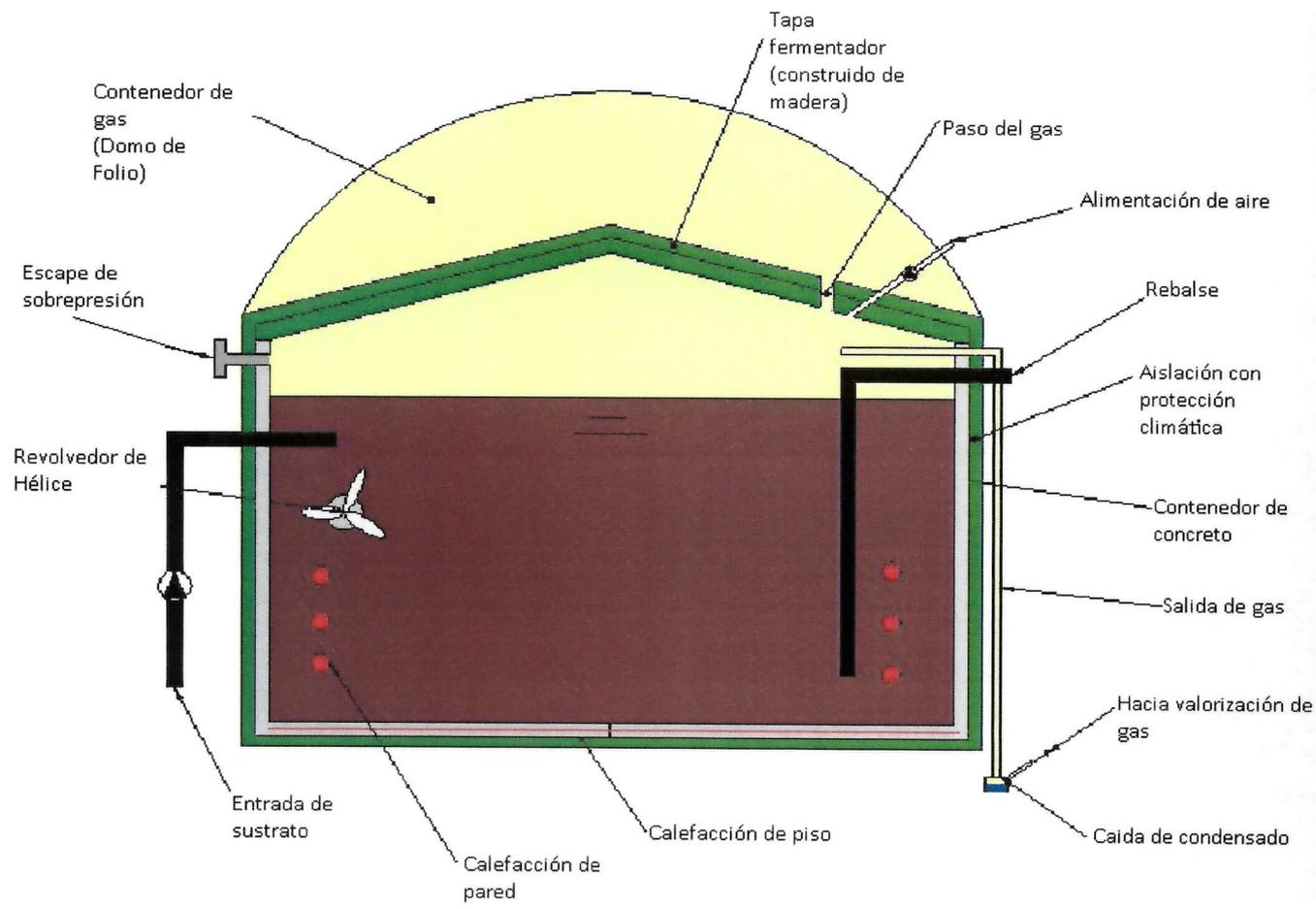
Monofásica: La fase de hidrólisis y formación de metano se realiza en una contenedor común.

Multifásica: La fase de hidrólisis es separada espacialmente de la formación de metano.

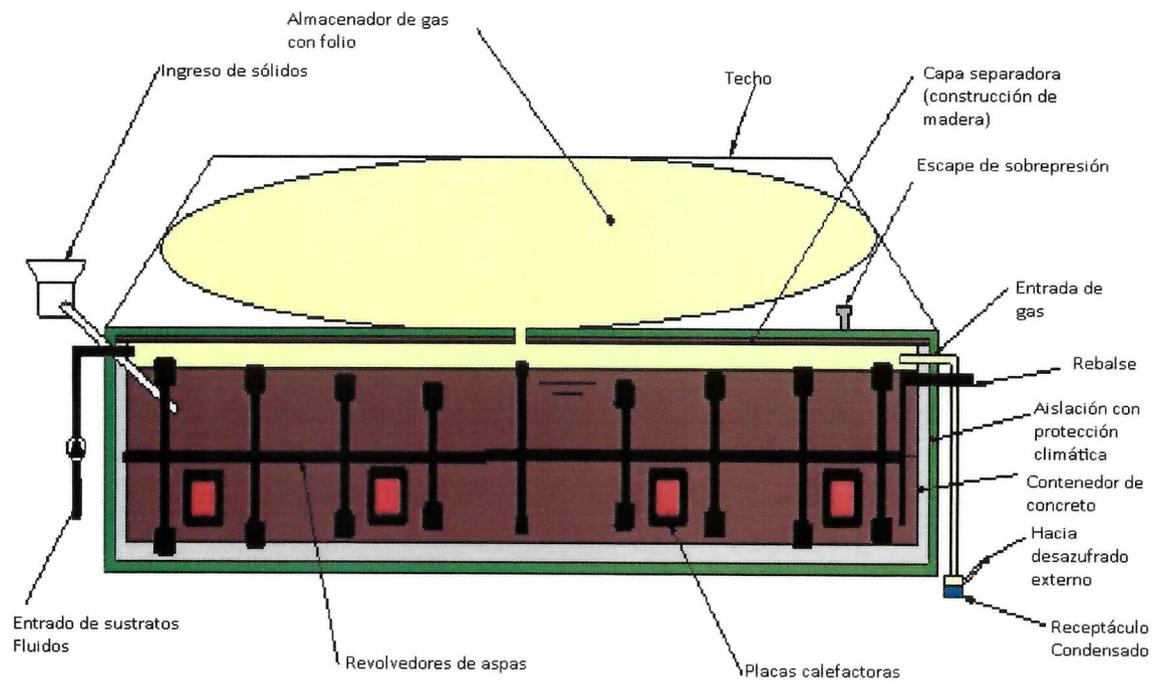
### Elementos y Ejemplos de Fermentador:

- Contenedores instalados sobre tierra: mayormente de acero o concreto
- Calefacción: sirve para el calentamiento y mantención de la temperatura del sustrato con placas calefactoras internas, calefacción de piso o de pared, a veces también con intercambiadores de calor externos (por regla, la cantidad de calor necesaria es aportada por el calor producido por la BHKW y siempre hay disponible la cantidad suficiente.
- Aislación: Aislamiento térmico de espuma densa o lana mineral. Debiera mantenerse claramente un valor bajo K de 0,4
- Revestimiento
- Técnica de Revolvimiento: generalmente revolvedores de aspas de funcionamiento lento, revolvedores de hélices o revolvedor de gas
- Tapa del contenedor de gas antifuga (Almacenamiento del gas)
- Almacenamiento de gas: Folio EPDM (1 capa), Techo de Folio (1 o 2 capas), Saco de Gas en contenedor/edificio
- Circuitos de Sustrato y de Gas
- Extracción de las capas sedimentarias Control de Temperatura Control de Temperatura
- Desazufrado biológico
- Tecnología de medición y regulación, como también de seguridad
- Control de Filtración

Ilustración 4: Ejemplo de fermentador



**Ilustración 5: Ejemplo de un fermentador acostado a la izquierda, con desazufrado externo y disposición hacia el contenedor de gas.**



### **Fosa Anterior**

En plantas de biogás diseñadas especialmente, los sustratos de base son puestos a disposición en una Fosa Anterior, en la cual es vaciado el estiércol líquido para poder ser almacenado. Esta fosa se ubica antes de los fermentadores y se conecta con ellos mediante cañerías. Desde aquí es bombeado el estiércol líquido hacia los fermentadores. Antiguamente, era frecuente en plantas de biogás pequeñas, mezclar aquí los co-sustratos que se agregaban, dado que mediante componentes técnicos adicionales se podía impedir su solidificación. Para mantener la dilución de acuerdo a la capacidad de la bomba (Materia seca < 12 % - 16 %) de las grandes cantidades que se originan en los co-sustratos, ligado a ello se incrementa el esfuerzo de la bomba y el desarrollo de olores llevaron a que en las plantas modernas y grandes este sistema sea utilizado escasamente. Tampoco hay que subestimar el costo de construcción. Al llenar la fosa con 6 toneladas de estiércol líquido de vacuno y 3 toneladas de silo de maíz hay que agregarle aproximadamente 3 toneladas de restos de fermentado a la fosa para hacer que la mezcla sea adecuada para bombear. Se debe tener un tiempo de reposo de 20 días, por lo que por cada tonelada de maíz se necesitan 20 m<sup>3</sup> adicionales de espacio para fermento. (MITTERLEITNER 2003).

#### **2.1.2 Sistema de transporte**

Para el transporte de medios líquidos, como por ejemplo estiércol líquido o desecho de fermento y poder mover las corrientes de material, son necesarias cañerías, bombas y estructuras. Los sólidos sin embargo se pueden fluidificar tanto en fosas como también en determinados equipos y llevados directamente al fermentador.

### **2.1.3 Técnica de alimentación**

Las oscilaciones de temperatura en el fermentador un las cargas del sistema de corto tiempo por la entrega de grandes cantidades de material orgánico en forma de golpes perjudica el proceso de biogás, con lo que aparecen oscilaciones en el contenido de metano. Además, lo anterior lleva a una formación irregular de gas, que como consecuencia acarrea una alta concentración de sulfuro de hidrógeno, dado que la cantidad de aire necesaria para la desulfuración por regla no es ajustada a la cantidad de gas que se ha formado. Por este motivo los intervalos de alimentación debieran mantenerse tan cortos como sea posible. Determinadas técnicas de alimentación (pozo de descarga, tornillo alimentador con embudo) exigen del empresario una gran inversión de tiempo. Especialmente en grandes plantas de biogás prefieren, por ese motivo, sistemas que permiten mantener un determinado acopio y con ello se permite automatizar la alimentación. Las soluciones técnicas pasan por el tiempo y sistemas de accionamiento masivos para la captura de material sólido y las correspondientes bombas motorizadas.

### **2.1.4 Admisión Directa**

Ciertos excrementos animales que ingresan a determinados sistemas de retención pueden, a por medio de un sistema de transporte de excremento instalado con cierto desnivel, ser sacados del pozo bajo el piso de hendiduras directamente hacia el fermentador.

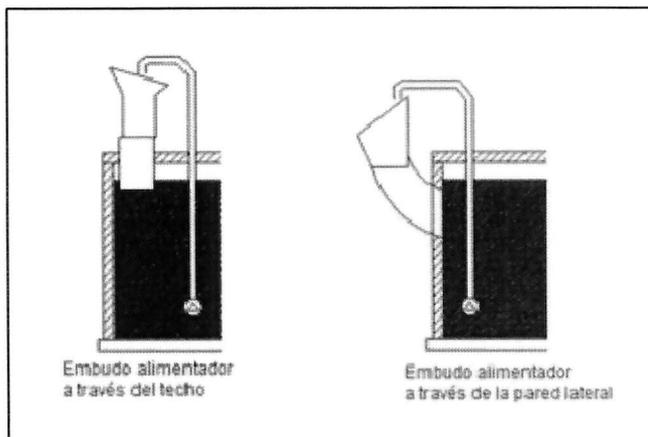
Este sistema ofrece la ventaja de una alimentación continua de pequeñas cantidades de material orgánico, si que el fermentador sufra cargas de impacto u oscilaciones de temperatura. Estiércol líquido rico en material sólido pueden producir daño por taponeo de las cañerías.

Por este motivo el sistema de cañerías debe pasar por una bomba que pueda ser lavado. Las plantas con entrada directa tardía de co-sustratos sólidos deben estar dotadas con determinadas técnicas para la alimentación de materias primas..

### 2.1.5 Pozo de lavado

La tecnología para la acumulación de material sólido mediante un pozo de lavado, era utilizada antiguamente en pequeñas plantas de biogas, dado que técnica y financieramente es más barata su instalación. Con el mismo principio de función existen diversas disposiciones posibles en el fermentador.

Ilustración 6: Tipos de embudos



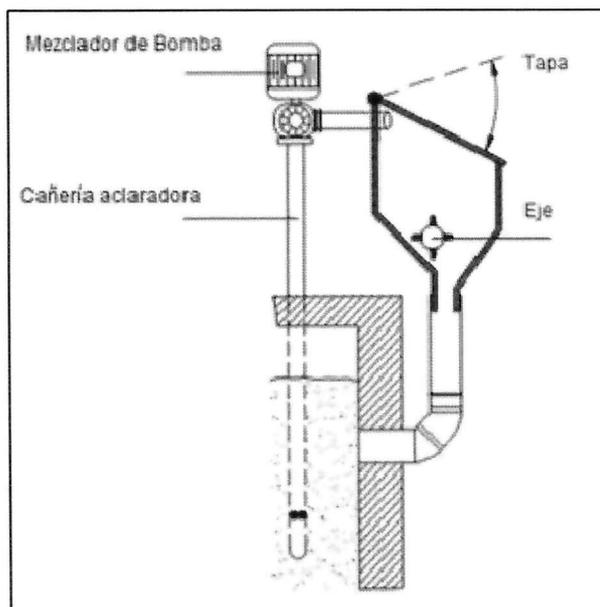
El material sólido a ingresar es llevado mediante un cargador de ruedas o cargador frontal hacia el embudo, y mediante un transporte de bomba con estiércol líquido (extraído desde el fondo del fermentador) y sacado desde el pozo por la parte inferior del embudo que está asentada en el pozo hacia el fermentador.

Dada la gran cantidad de trabajo que demanda, por regla el fermentador es alimentado sólo 2 veces al día con material sólido, aquí corresponde la inclusión de grandes cantidades de material orgánico en poco tiempo en el fermentador. Por ello, especialmente en invierno, se producen oscilaciones de temperatura en el fermentador y alta carga del proceso en corto tiempo.

La formación discontinua de Gas producto de lo anterior motiva oscilaciones en los contenidos de metano y sulfuro de hidrógeno del biogás. Asoman como problemáticas además, debido a la alimentación entrecortada, las emisiones de olores en los pozos receptores abierto, los que en el pasado eran un problema para la vecindad por los malos olores.

Estos problemas se pueden evitar con la instalación de pozos modificados con tapa y apisonadores (ilustración 8). Para plantas de biogás más grandes con una sala de pudrición a plena ocupación este sistema no ha resultado ser adecuado. Los motivos para esto es el gran consumo de tiempo para la alimentación y las consecuentes cargas por impacto, las que se desarrollan especialmente en sistemas altamente sobrecargados sin sustrato base. En plantas de biogás modernas prácticamente ya no se incluye la instalación de sistemas de descarga

**Ilustración 7: Pozos modificados con tapa y apisonadores**



### 2.1.6 Embudo de Alimentación

Transportes de tornillo con embudos de alimentación son adecuados para fermentadores en pie o acostados. Son instalados en primera línea para plantas de biogás pequeñas, dado que no es posible instalar el mecanismo alimentador como contenedor de reserva y se origina un gran consumo de tiempo cuando se deben alimentar grandes cantidades de material sólido (Ilustración 9). Dada la forma de embudo del contenedor de admisión se puede llegar a la formación de puente en la alimentación en el fermentador. Si lo anterior no es notado a tiempo y removido manualmente, no se produce una alimentación continua.

**Ilustración 8: Embudo de alimentación.**



Fuente: „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“

Si el dispositivo se encuentra en la tapa del depósito de estiércol, el sustrato es sacado directamente por medio de un tornillo, que va desde la base del embudo hasta alcanzar debajo del espejo de fluido del fermentador.

Si el embudo está instalado en el piso, el sustrato es sacado mediante un tornillo inclinado hacia arriba y desde ahí es traspasado a través de la pared o tapa del fermentador por medio de un tornillo sumergible. Para la motorización de un tornillo de alimentación de 500 mm de diámetro debiera ser suficiente un electromotor de 4 kW (Mitterleitner 2003).

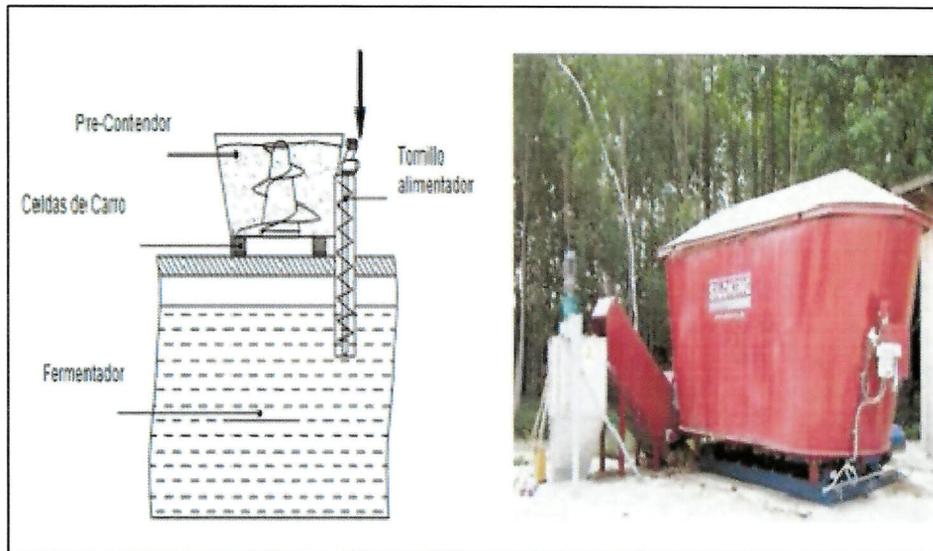
### **2.1.7 Estaciones de dosificación**

La ventaja de tener estaciones de dosificación en vez de los sistemas de alimentación utilizados anteriormente es la de tener la posibilidad de almacenar el equipo de llenado. A través de las estaciones de dosificación el sustrato puede ser ingresado al fermentador en pequeñas cantidades según tiempo y peso muchas veces al día, sin que se produzca un gasto elevado de trabajo. No se producen oscilaciones de temperatura y tampoco altas sobrecargas del proceso de fermentación.

Por lo anterior se produce una fermentación pareja, lo que lleva una producción continua de gas con una composición constante del gas.

Las estaciones de dosificación son carros de mezcla de forrajes modificados o equipos fabricados especialmente para este propósito (por ejemplo prensas de material sólido, en tamaños que pueden contener volúmenes desde 10 m<sup>3</sup> hasta 70 m<sup>3</sup>). Según, la cantidad y tipo del sustrato disponible se debe seleccionar para cada concepto de planta un sistema adecuado. Los carros de mezcla de forrajes verticales u horizontales son adecuados para la alimentación de sustratos de fibra larga, dado que tienen la posibilidad de achicar el material (ilustración 10).

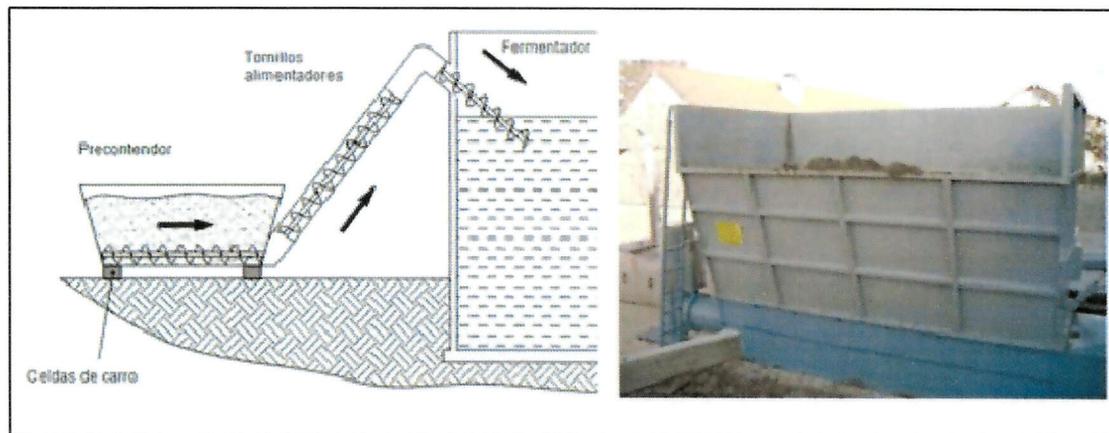
**Ilustración 9: Estación de docificación**



Fuente: <sup>1</sup>

Los dosificadores de material sólido con tornillos de alimentación, transportes de banda, pisos empujadores o rascadores eran adecuados para la alimentación de materiales sólidos previamente achicados (por ejemplo silo de maíz), se muestran, debido a la baja potencia eléctrica de conexión, como carros mezcladores de forraje (ilustración 10).

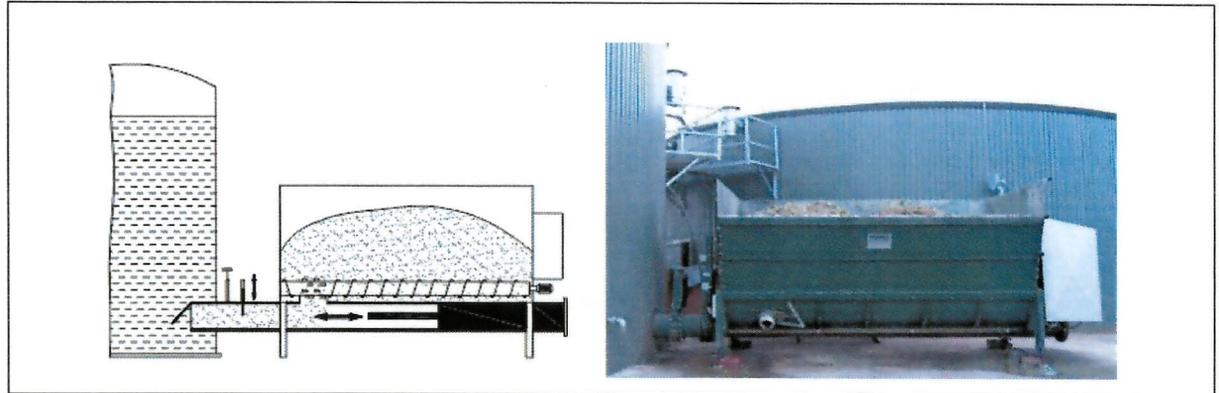
**Ilustración 10: Carros mezcladores de forraje**



Fuente: <sup>2</sup>

Es sustrato debe traspasarse desde el transporte de tornillo hacia el tornillo sumergible. Esto eleva tanto los costos de construcción como también los de conservación, dado que para la motorización de cada uno de los tornillos es necesario instalar varios motores. Para sortear lo anterior, se puede implementar un procedimiento, con el que el material sólido sea llevado hacia la parte baja del fermentador. Con ello el material es llevado hacia el bunker de alimentación mediante un tornillo con un cilindro acostado, el que está enclavado con el contenedor. El sustrato es llevado hacia el fermentador mediante un pistón de presión y previo a ello mediante un desparramado con un cuchillo en cruz integrado en el cilindro (ilustración 11).

**Ilustración 11: Ejemplo de sustrato llevado hacia un fermentador mediante un pistón de presión.**



Fuente <sup>3</sup>

### 2.1.8 Conductos

Conductos presurizados, a través de los medios líquidos son transportados con el auxilio de una bomba, son por regla de acero y montados mediante flanches o uniones soldadas. Para mantener baja la pérdida de presión, el diámetro de la cañería debiera ser de 100 mm, pero sería mejor de 125 mm, para distancias más largas, de 150 mm.

<sup>3</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.2.5, página 50, ilustración. 38, Julio 2007

Las cañerías plásticas son pegadas o soldadas y sólo pueden ser instaladas cuando ese material puede resistir la máxima presión de la bomba. Las cañerías de derrame, como por ejemplo desde el fermentador hacia el contenedor post-fermentación o desde el establo hacia el pozo de acumulación, no tienen presión de bomba y por lo tanto pueden ser plásticas (PVC o Polipropileno con uniones de encaje y empaquetadura de goma).

Para evitar los atascos, para sustratos de fluido liviano, tal como excremento de cerdo se debe instalar una cañería de 200 mm, para sustrato de fluido grueso, tal como excremento vacuno, el diámetro debe ser de 300 mm. Si se incluyen materiales de fibra larga o ricos en sustancia sólida, el diámetro debe ser aún mayor. Las cañerías debieran ser en lo posible instaladas en lugares donde no sufran congelamiento, de lo contrario deben tener aislante y además con un pequeño porcentaje de inclinación (1 - 2 % hacia la salida), para que cuando la bomba se detiene puedan vaciarse solas (evita la formación de sedimento). Del foso acumulador el sustrato debiera llevarse hacia el fermentador sobre el espejo de estiércol líquido. De esta forma aparecerán sólo escasamente corrientes en cortocircuito y, en caso de una falla en la válvula de retención, el retroceso del medio de fermento es contrarrestado en el pozo de acumulación.

### 2.1.9 Bombas

Ilustración 12: Bombas centrífugas/ bombas purgadoras sumergibles



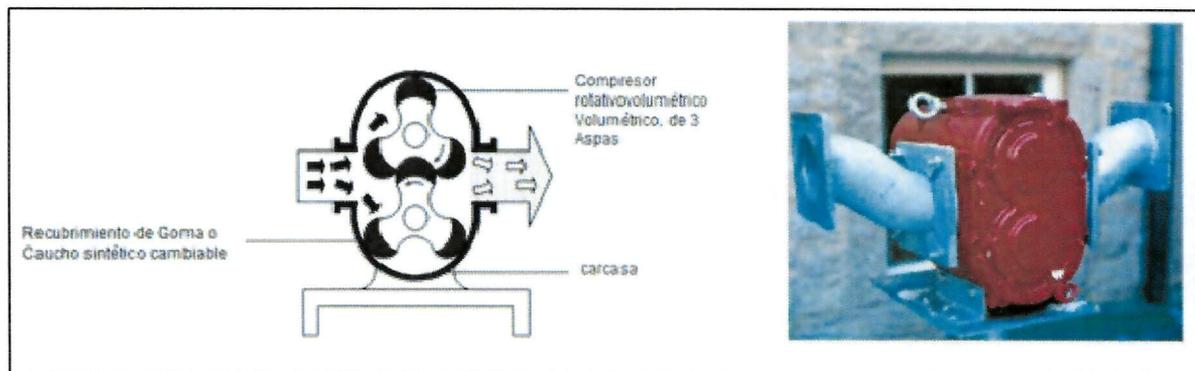
#### ➤ Bombas de Empuje

Para sustratos con mayores contenidos de TM se utilizan bombas de empuje auto-succionadoras, cuya capacidad de transporte es menos dependiente de la altura. Las bombas de los tornillos excéntricos succionan desde una profundidad de hasta 8,5 m y generan una presión de hasta 24 bar (ilustración 13).

Son vulnerables a los atascos cuando hay materiales de fibra larga. La potencia de avance es menor que la de las bombas centrífugas.

Las bombas de compresor rotativo logran, a presiones máximas de 2 – 10 bar y una potencia de 7,5 – 55 kW, una capacidad de avance de 0,5 - 4 m<sup>3</sup>/min (ilustración 13).

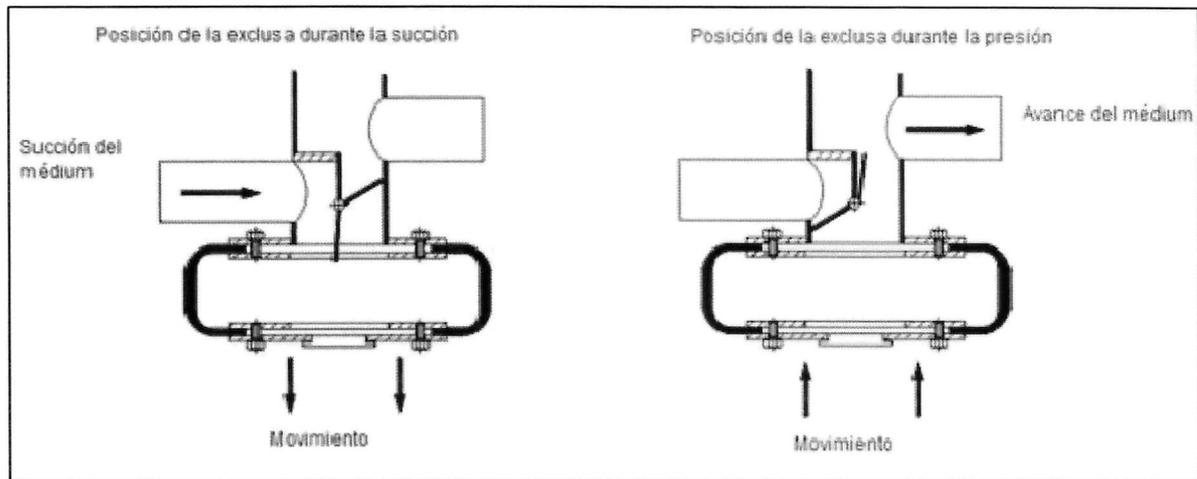
**Ilustración 13: Bomba de compresor rotativo**



En comparación con las bombas de tornillo excéntrico, son menos delicadas si hay materiales de fibra larga en el medio a transportar y por este motivo son frecuentemente instaladas, cuando se agregan silos de maíz, de pasto o estiércol seco al estiércol líquido. La alta potencia de avance de este tipo de bombas lleva a que en poco tiempo se introduzcan cada vez más cantidades de material fresco en el fermentador.

Debido a que esta situación perjudica el proceso de bio-gasificación (disminución de temperatura, corto tiempo de carga alta), por lo anterior se deben configurar los intervalos de alimentación y los tiempos de funcionamiento o regular las bombas en base a la regulación de sus revoluciones. de las bombas de empuje. Otra alternativa es el cambio de los tornillos excéntricos que son lentos o de las bombas de greña, por una alimentación continua (ilustración 14).

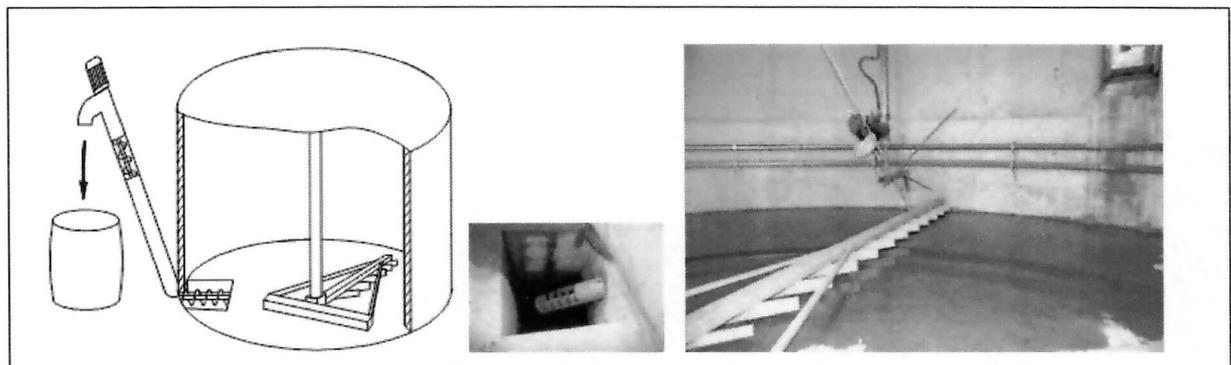
#### Ilustración 14: Alimentación continua



#### 2.1.10 Retiro de material sólido

En dependencia del tipo de sustrato entregado caen más o menos grandes cantidades de materiales de sedimentación, por ejemplo arena. Si no se toman precauciones para la eliminación de los sedimentos en los fosos, baja el volumen del fermento y con ello la capacidad de carga del sistema. Para eliminar trabajo o medidas de alto costo para hacer el trabajo, se puede, ya en la planificación, pensar en incluir algún equipo para la extracción de material sólido sumergido. En contenedores de concreto verticales se instalan fosos en el piso, cuya aplicación está limitada al diámetro del contenedor de a lo menos a aproximadamente 14 m, dada la estabilidad del equipo en diámetros más grandes no se puede garantizar (WIMMER, 2004) (ilustración 15).

Ilustración 15: Ejemplo de un equipo para la extracción de material sólidos sumergidos.



Fuente<sup>4</sup>

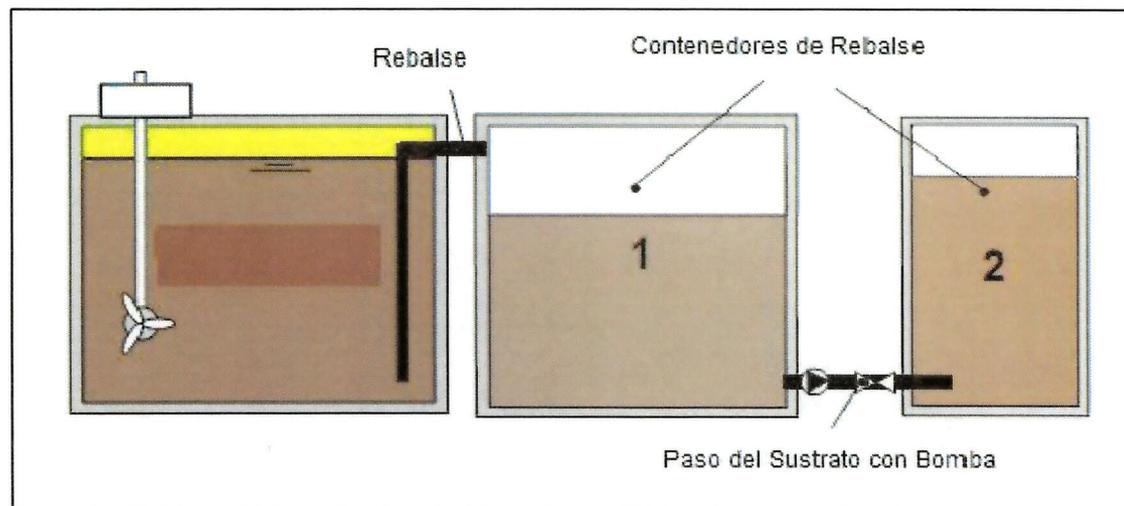
<sup>4</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.5, página 52, Ilustración 43, Julio 2007

El eje motriz está ubicado central- y verticalmente en el fermentador, donde el motor-reductor es instalado fuera del fermentador. A este eje en el piso del fermentador se le coloca un brazo de evacuación con un ángulo de desvío integrado, el que lleva el material sedimentado hacia el borde del contenedor. Desde el lodo se retira el sedimento con la ayuda de un tornillo, que tiene que alcanzar sobre el nivel del líquido en el fermentador, y acopiado en un contenedor. Por la sollicitación mecánica del brazo de evacuación cuando hay una gran cantidad de sedimento, puede llegar a presentar fallas. De ello resulta la reparación de un evacuador muy esforzada y costosa, dado que para ello se debe evacuar el material existente dentro del fermentador. Los sedimentos pueden ser removidos mediante una geometría especial del fermentador. Ahí el piso del fermentador es inclinado en un 5% y se lleva hacia un embudo, que en promedio tendría un diámetro de 2 m y una profundidad de 1 m. Mediante el movimiento del líquido por medio del revolvedor, el lodo sedimentado es movido hacia el piso de ese contenedor. Desde aquí es retirado en forma similar a como se hace en los contenedores de piso mediante un tornillo. En el intertanto se realizan aperturas en las tapas de los contenedores, las que son adecuadas para el retiro de las capas hundidas con pequeñas palas.

#### **2.1.11 Retiro de restos fermentados**

Para la extracción de los sustratos fermentados en el fermentador se utilizan como regla general las mismas cañerías que se utilizan en el resto del sistema de encauzamiento del sustrato. Con ello el contenido del fermentador es bombeado por medio de cañería ya sea al retro-almacenamiento, frecuentemente también existe un sistema llamado de rebalse, en el cual el sustrato a un determinado nivel de llenado del fermentador automáticamente se desvía hacia el contenedor de almacenamiento (ver ilustración 16).

Ilustración 16: Esquema retiro de restos fermentados



En el sistema de rebalse resulta ventajoso que la curva de la tubería esté ordenada hacia arriba, dado que, por lo tanto, es ejercida una presión hidrostática permanente por parte de los medios de fermentos hacia la curva de la cañería, y con ello se puede evitar que se produzca un daño. Los que tienen suficientes cañerías provistas de bomba hacia el acopio del retroceso de fermento debe ser posible que mantengan la presión al máximo.

### 2.1.12 Calefacción

Una condición para que exista un proceso de fermentación parejo es que el sustrato tenga una temperatura constante. La cantidad de calor es entregada por regla general en las plantas de biogás por el calentamiento del BHKW y es entregado en la cantidad necesaria. Para calentamiento externo (fuera del fermentador) el sustrato es bombeado contracorriente hacia el agua caliente a través de un intercambiador de calor, donde se utilizan especialmente intercambiadores de calor de doble cañería y en espiral. Finalmente, el medio calefactor también el estiércol caliente. Dado que en este proceso no sólo se tiene que bombear agua caliente sino que también el estiércol a través de las cañerías, se debe considerar también un mayor gasto de bomba y en sustratos de fibra larga se genera el peligro de obstrucciones/atascos. Los procesos termo-dinámicamente muy eficientes aparecen como de muy alto costo y por ese motivo son instalados principalmente en plantas de gran tamaño.

En contenedores verticales se instalan calefacciones ya sea en la losa del piso o en las paredes. En las calefacciones de losa de piso se instalan en el piso del fermentador espirales calefactoras de plástico y la alimentación y retorno pasan por un distribuidor paralelo, para mantener baja la resistencia de las corrientes.

Se deben hacer pruebas estáticas para la seguridad de la placa de piso. Las capas sedimentarias llevan a un deterioro de la transferencia de calor. Por lo anterior deben ser revueltas o retiradas con un extractor de sedimentos. Las más utilizadas son las calefacciones en las paredes, para las cuales existen dos variantes. Las cañerías plásticas calefactoras son instaladas en forma similar a la calefacción de la losa de piso dentro del muro de la pared. Aquí también se deben hacer pruebas estáticas. Una mejor transferencia de calor es entregada con alguna separación de la pared de concreto cañerías de acero o de plástico en dos o más circuitos calefactores. Una condicionante para una transferencia de temperatura efectiva es el rodear las cañerías con sustrato. Las cañerías debieran instalarse con una separación mínima de 2 a 50 cm de la pared lateral y afirmados con dispositivos de sujeción estables. Con ello se evita un daño por sumersión del indicador de nivel de fluido por la curvatura eventual de la tapa flotante (ver ejemplo en Figura 46 derecha). Los calefactores en revolvedores entregan una muy buena transferencia de calor en los fermentadores horizontales. En la entrada del sustrato se encuentra en vez de una paleta revolvedora un revolvedor de aspas con un lazo de cañería de acero con muchas partes, que es llenado con agua caliente. Debido a la buena transferencia de calor con el revolvedor activo se necesita sólo poca superficie de transferencia, donde para la mantención de la temperatura necesaria se debe evitar tiempos de detención muy largos, pues con ello se desmejora la entrada de calor.

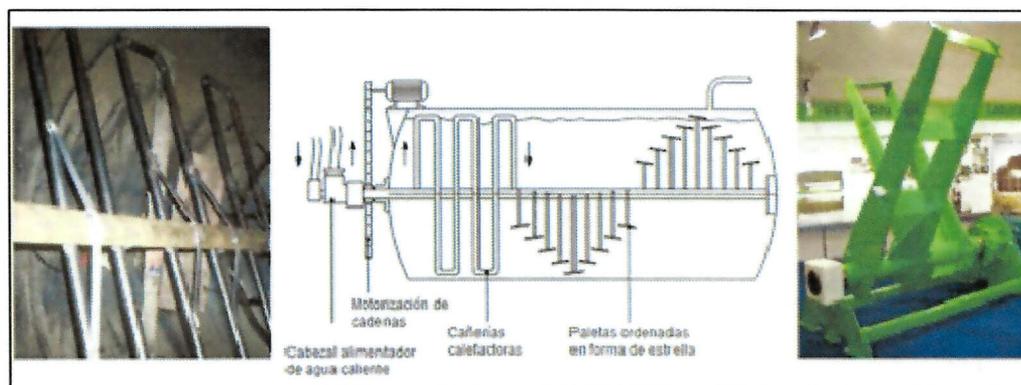
### 2.1.13 Homogenización

Los fermentadores y los contenedores posteriores deben ser dotados de equipos revolventes, para alimentar el material ingresado con la suficiente cantidad de bacterias y una distribución de temperatura pareja. Además una tecnología revolventora efectiva evita la formación de capas flotantes y sedimentarias y crean un ambiente positivo para el intercambio de materia de las bacterias, dado que las ampollas de gas son expulsadas y se incorporan nutrientes frescos. Los intervalos de revolver son dependientes del tipo de revolventor, del tipo de sustrato y por ello deben ser adecuados a cada planta en forma individual.

#### ➤ Revolvedores de Aspas

Estos son revolventores de funcionamiento lento, se instalan para el mezclado de fermentadores horizontales y trabajan transversalmente a la dirección del flujo (ver Capítulo 1.5.3.1). Los brazos revolventes, en el ámbito de la alimentación del sustrato, pueden ser utilizados como calefactores (óptima distribución de la temperatura). Los brazos revolventes en la parte media y posterior del fermentador debieran estar dispuestos en forma espiral (disminución del momento de giro en la formación de capas de sedimentarias) y en el extremo debieran estar equipados con paletas. Los revolventores de aspas, comparativamente, tienen una baja potencia de conexión, deben funcionar a una revolución de aproximadamente 4 revoluciones min-1 6 a 12 veces al día por 5 a 10 minutos y sirven también en sustratos de hasta 20% TM con un muy buen efecto de homogenización (ilustración 17).

Ilustración 17: Revolvedores de aspas.



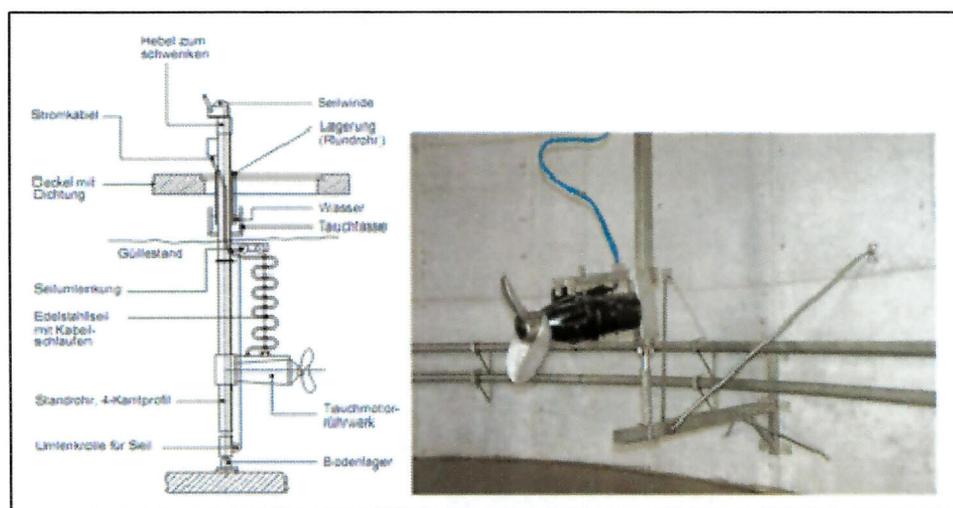
Fuente<sup>5</sup>

<sup>5</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, página 54, Ilustración. 45, Julio 2007

### ➤ Revolvedores de Hélices Sumergidas

Son revolvedores de alta velocidad (380 revoluciones min<sup>-1</sup>) y vienen para ser instalados en contenedores verticales. Modelos sin motorización alcanzan hasta las 1.500 revoluciones min<sup>-1</sup>, pero no son utilizados en la producción de Biogás. Los revolvedores de hélices sumergidas generalmente son instalados en la tapa del fermentador y están provistos de una tapa para servicio y se pueden ajustar en altura y en la horizontal (ilustración 18).

**Ilustración 18: Revolvedores de Hélices Sumergidas.**



Fuente<sup>6</sup>

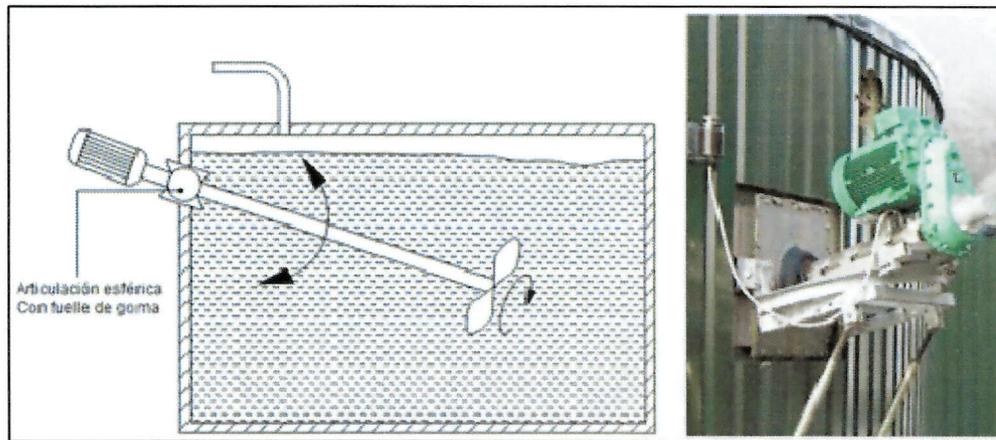
Por regla se instalan con potencias de conexión entre 7 y 22 kW, donde el diámetro de las hélices varía entre 50 y 70 cm. Para disminuir las revoluciones, en la actualidad se ofrecen hélices de hasta 1,80 m de diámetro. Los revolvedores de hélices sumergidas son adecuados para la mezcla de contenidos del fermentador con un contenido de TM de hasta un 12%, donde para la mezcla efectiva de un contenedor con un volumen de 1000 m<sup>3</sup> se deben instalar dos revolvedores. Como desventaja puede producirse una disminución de la población de bacterias, que sucede cuando se revuelve a muy altas revoluciones. Estas llevan también a una elevada sollicitación mecánica de los revolvedores, donde también puede soltarse el anclaje de la cañería fija. El uso de motores hidráulicos garantiza una estanqueidad suficiente y estabilidad de la temperatura de los motores de inmersión

<sup>6</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, página 55, Ilustración 46, Julio 2007

### ➤ Mezclador de Varilla

Son revolvedores de funcionamiento rápido (380 hasta máx. 1000 revoluciones min-1) con un motor que está fuera de él, el que impulsa una hélice con un diámetro de hasta 60 cm por medio de un eje largo (ilustración 19). También son posibles motorizaciones por motores de aceite o el eje pivotante de un tractor.

Ilustración 19: Mezclador de varilla.



Fuente<sup>7</sup>

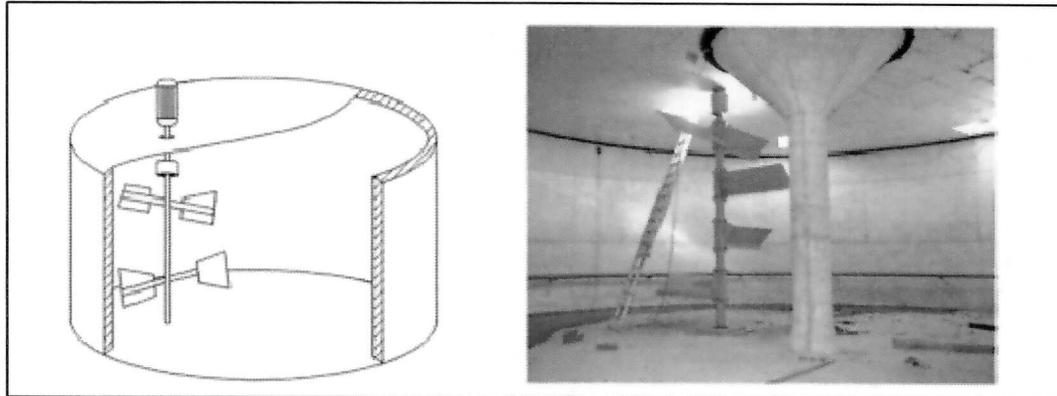
Son pasados por la tapa, pero por regla general son pasados a través de la pared del fermentador y tienen una conexión eléctrica de una potencia hasta 15 kW. Al ser instalados a través de la tapa es también posible pasar la motorización a través del eje pivotante. Para evitar los daños del eje revolvedor debidos a las fuerzas de empuje y tiro, éste es asentado en una cañería externa que tiene muchos cojinetes y con ello se incrementa la vida útil de la junta en el paso hacia el fermentador debido al asiento de la cañería exterior. La carga hidrostática debiera mantenerse baja, en la cual la máxima resistencia del fluido en el fermentador no debiera sobrepasar un metro sobre la junta. Los revolvedores de varilla debieran ser, en lo posible, oscilantes tanto en la vertical como en la horizontal para que las capas flotantes y los sedimentos puedan ser efectivamente eliminados. Pueden servir también de herramienta de corte, cuando sus aspas son implementadas con dientes o se les instalan cuchillos especiales de corte en el eje motriz además de sus aspas.

### ➤ Revolvedores Axiales

<sup>7</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband „– Capítulo 1.5.3.8, página 56, Ilustración 47, Julio 2007

Estos son revolvedores lentos, que son instalados eventualmente en contenedores verticales (ilustración 20).

**Ilustración 20: Revolvedores axiales.**



Fuente<sup>8</sup>

En contenedores de diámetros hasta 14 m se instalan en medio, en contenedores de más diámetro se ordenan en forma descentralizada, dado que algunos fermentadores regularmente son provistos con un pilar central. Los revolvedores axiales tienen una potencia conectada de 15 - 18 kW e indican un diámetro de 3 a 4 m. Dependiendo del largo del ala revoladora las revoluciones fluctúan entre 12 y 25 revoluciones min<sup>-1</sup>. Las revoluciones más bajas operan positivamente en la vida útil de los revolvedores (bajas sollicitaciones mecánicas) y cuidan la población de bacterias. Las capas flotantes y sedimentarias no son removidas en forma tan efectiva como con los revolvedores más rápidos, y que permiten la posibilidad de modificar su posición

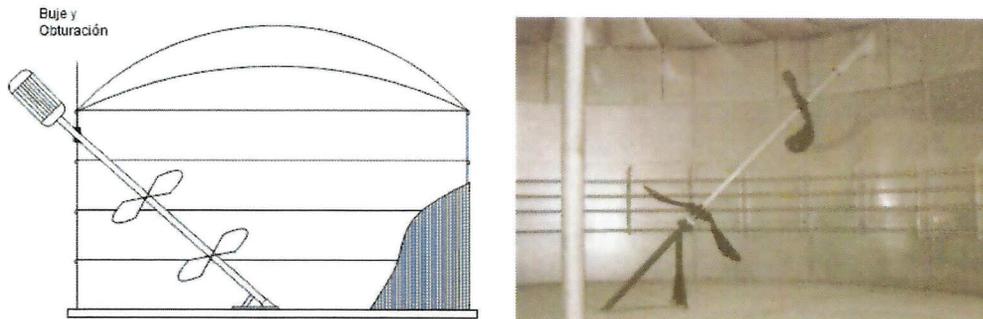
#### ➤ **Revolvedores de Eje Largo**

Estos revolvedores son de giro lento, que se instalan transversalmente a través de la pared del fermentador (ilustración 21) Son válidos como una forma especial de mezcladores de varilla.

---

<sup>8</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, página 56, Ilustración 48, Julio 2007

### Ilustración 21: Revolvedores de eje largo.



Fuente<sup>9</sup>

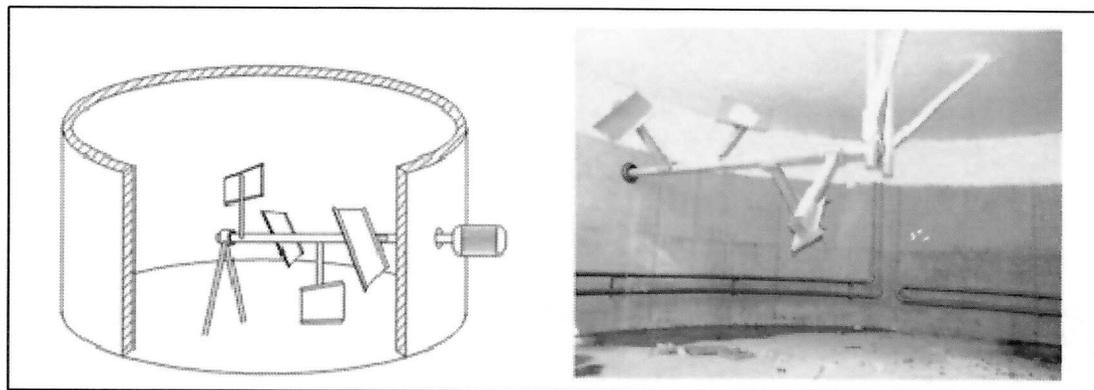
El motor de accionamiento (15 kW) del eje revolvedor se encuentra ubicado fuera del fermentador y mueve dos aletas revolvedoras de entre 0,7 m hasta 2,5 m de largo, las que giran a una velocidad desde 15 a 40 revoluciones min<sup>-1</sup> (en casos excepcionales hasta 200 revoluciones min<sup>-1</sup>). Si tienen integrado convertidor de frecuencia, se puede adecuar la potencia necesaria al consumo de corriente. Los revolvedores son sujetos fuera del fermentador en un zócalo y dentro de él se afirma en el piso del fermentador. Por la forma de construcción masiva en conexión con las bajas revoluciones se posibilita un funcionamiento de mucha vida útil y poca frecuencia de reparaciones. El ordenamiento de las alas revolvedoras permite una mezcla tanto vertical como horizontal, con lo que es posible deshacer las capas flotantes y las sedimentarias.

#### ➤ **Revolvedores de Paleta**

Estos son revolvedores de funcionamiento lento, cuyos ejes horizontales son instalados desde los lados de fermentadores verticales y las paletas revolvedoras están ordenadas tal que permiten cambios. Dentro del fermentador el eje revolvedor es anclado ya sea al andamio de la tapa o al piso (ilustración 22).

<sup>9</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, Página 57, Ilustración 49, Julio 2007

## Ilustración 22: Revolvedores de Paleta



Fuente<sup>10</sup>

Con ello varían tanto las revoluciones (8 - 14 revoluciones min<sup>-1</sup>) como también la altura del centro del buje (1,9 m- 3,5 m) a un largo de paleta revolvedora (1,45 m hasta 1,95 m). El revolvedor tiene una potencia de conexión de 15 Kw y posibilita por su construcción una mezcla efectiva, incluso cuando en el fermentador hay altos contenidos de TM. Por las bajas revoluciones son económicos y protegen la población de bacterias, debido a las bajas sollicitaciones mecánicas son relativamente poco susceptibles a desgaste.

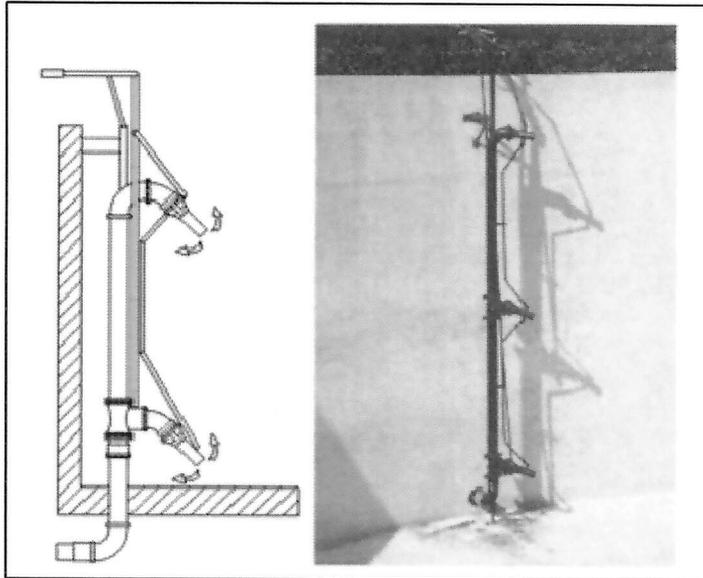
El elemento central del fermentador es el agitador de aspa axial. Esta característica del agitador determina la dirección de flujo del sustrato. En la práctica existen distintas opiniones sobre el número óptimo de revoluciones, pero se puede contar con una velocidad promedio de una a cuatro rotaciones por minuto.

### ➤ Revolvedores Hidráulicos

La mezcla con los revolvedores hidráulicos se logra por aspiración y retorno del contenido del fermentador (ilustración 23).

<sup>10</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, página 57, Ilustración 50, Julio 2007

Ilustración 23: Revolvedores hidráulicos.

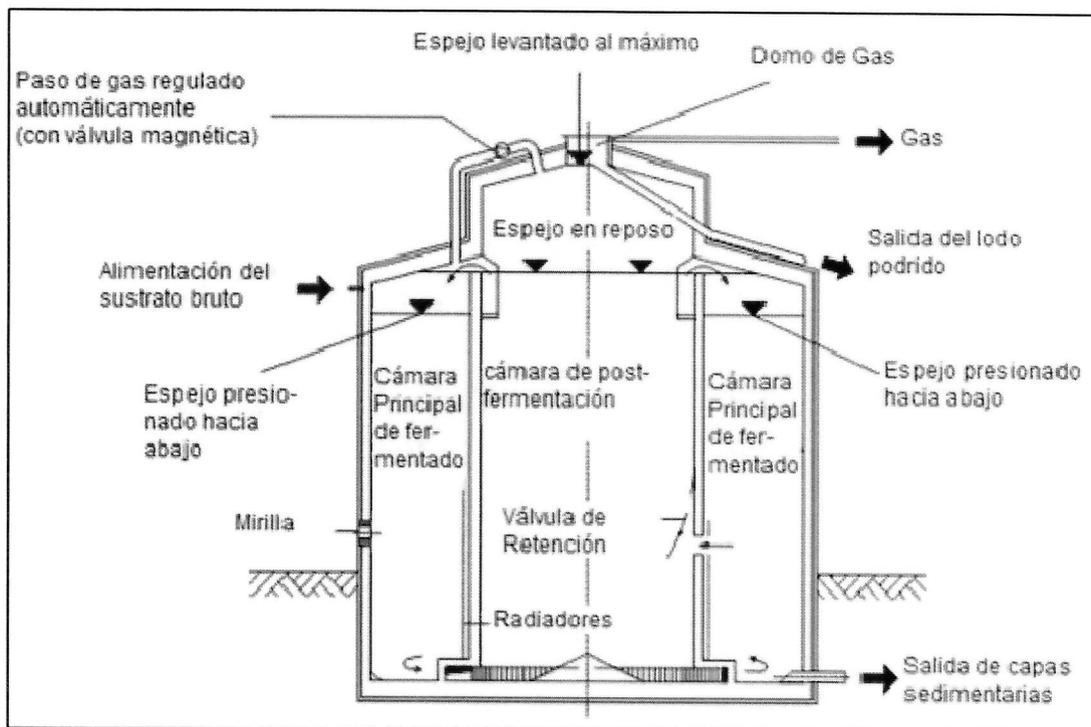


Fuente<sup>11</sup>

La bomba de la potencia adecuada generalmente es también utilizada para la alimentación del fermentador y el carguío de los carros del estanque de estiércol, donde los distintos campos de aplicación están comandados por una compuerta bloqueadora. Para el proceso revolver el contenido del fermentador es aspirado y pasa por dos o más toberas horizontales o verticales de vuelta al fermentador. Como ventaja se puede decir que están fuera del fermentador y son partes mecánicas accesibles en caso de desgaste. El procedimiento patentado de Presión de Gas-Proceso de Mezcla sirve a la presión de gas, que se origina cuando se cierra la unión del fermentador hacia el estanque de gas (ilustración 24).

<sup>11</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, página 58, Il. 51, Julio 2007

Ilustración 24: Procedimiento presión de gas - proceso de Mezcla



Fuente<sup>12</sup>

El sistema se compone de una cámara principal externa de fermentado y una cámara post-fermentado en el centro del contenedor. Por la fuerza de los gases comprimidos el sustrato en la cámara de fermentado principal es presionado hacia abajo y sube lentamente el nivel de fluido en el estiércol líquido hacia la cámara de post-fermentado. Es abierta nuevamente la unión hacia el estanque de gas, fluye el estiércol golpeada- y lentamente de vuelta hacia la cámara principal de fermentado, donde se logra un efecto de mezclado. En este procedimiento no intervienen partes mecánicas y no se necesita energía eléctrica. Aparece como desventaja, por las relativamente altas presiones, el costo constructivo del fermentador.

<sup>12</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.3.8, página 58, Il. 52, Julio 2007

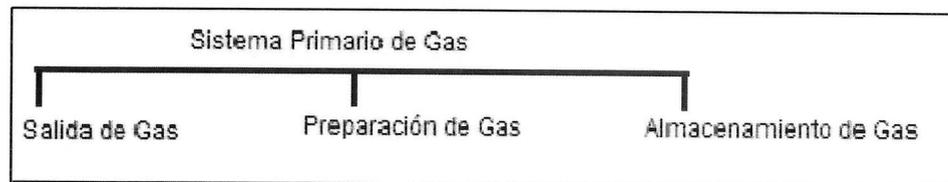
### ➤ Revolvedores Neumáticos

Aquí, el biogás que se genera es presionado mediante un compresor hacia las salidas de la cañería de gas desde abajo a través del sustrato. El gas que sube provoca una mezcla en sentido vertical. Dado que en el sentido horizontal no se produce un efecto revoledor, no se produce, como en los fermentadores con mezclado general, hacia las esclusas de paso del material no fermentado. En especial se produce este efecto con la instalación de paredes intermedias, las que exigen similares comportamientos de las corrientes, tal como son en los fermentadores horizontales. Para sustratos flotantes inclinados este sistema es menos adecuado, dado que éstos no pueden ser eliminados. También aquí se genera un mayor costo constructivo para el contenedor, dado que se debe contar con altas cargas de presión.

#### 2.1.14 Sistema Conductor de Biogas

El sistema conductor de gas desde los fermentadores de las plantas de biogas se ha simplificado, la preparación del gas y su consiguiente almacenamiento son compartidos (ilustración 25). Después de los estanques de gas vienen más cañerías hasta el

Ilustración 25: Esquema sistema conductor de biogás

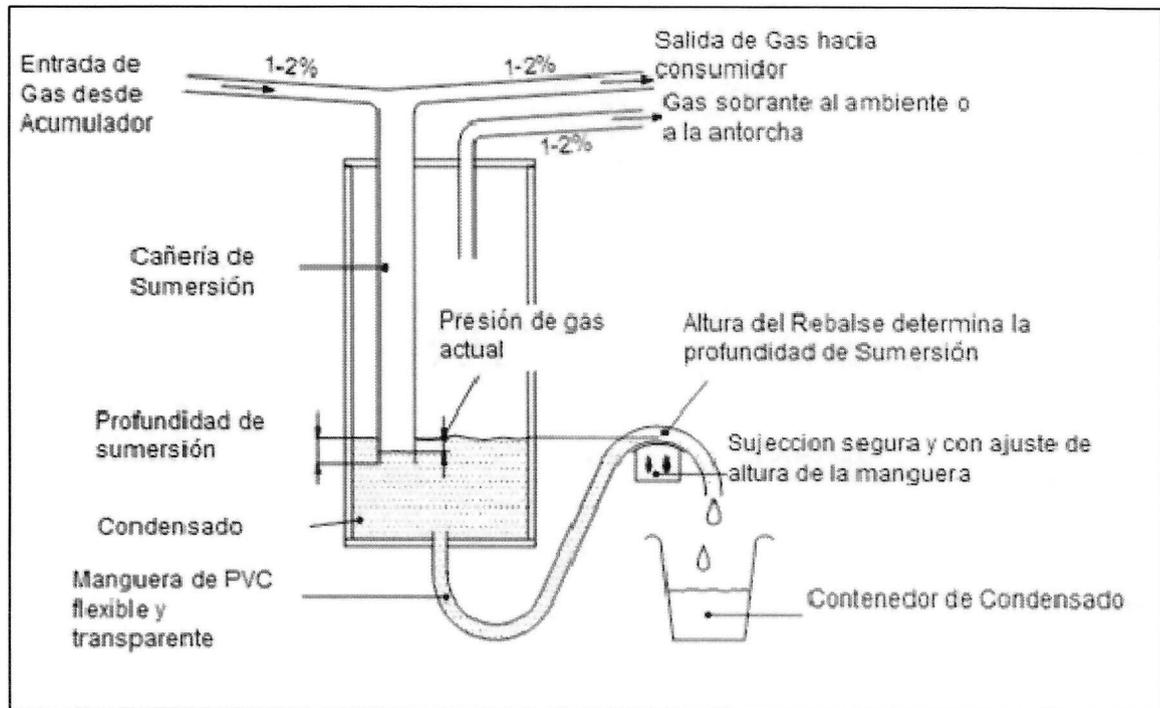


##### 2.1.14.1 Salida del gas

Para el secado del biogás se debe instalar una trampa de condensado en una zona libre de congelamiento

Esta puede ser al mismo tiempo instalada como una protección de sobrepresión, que sirve para que el esfuerzo del tipo ejercido en la tapa del contenedor desde dentro del fermentador no sobrepase valores entre 10 a 20 mm WS . El principio de funcionamiento simplificado para tal protección de sobrepresión es presentado esquemáticamente en la ilustración 26.

Ilustración 26: Esquema principio de funcionamiento simplificado para la protección de sobrepresión.



Fuente<sup>13</sup>

Se debe poner atención, que el rebalse, que regula la profundidad de sumersión de la cañería de gas en el patrón de agua sea fijado muy precisamente, para evitar daños al fermentador.

Además el nivel de agua del patrón de agua debe ser controlado regularmente, dado que en caso de una disminución puede producirse un escape involuntario de gas. Como alternativa se puede instalar una válvula mecánica de sobrepresión entre el estanque de gas y el consumidor. Este debe ser probado regularmente respecto de su eficiencia. Se deben cumplir con todos los reglamentos que rigen a las plantas de biogás (ver Capítulo 2.2.5).

<sup>13</sup> „Biogashandbuch Bayern – Materialienband“ – Capítulo 1.5.4.1, página 65, il. 54, Julio 2007

#### 2.1.14.2 Preparación del gas

Además de los componentes principales metano y dióxido de carbono el biogás tiene trazas de otros gases (Tab.7). Especialmente relevante entre los otros gases es el sulfuro de hidrógeno. La concentración de  $H_2S$  es fuertemente dependiente del sustrato y varía en un rango entre 0,02 bis 0,5 Vol %. En casos extremos pueden aparecer concentraciones de hasta 1,5 %. El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, y es dañino tanto para el hombre como para el medio ambiente, al igual que para los motores de combustión. Para el hombre el  $H_2S$  es altamente tóxico. Irrita la mucosa de los ojos y la vía aérea. En concentraciones mayores que 150 ppm se pierde el olfato, y a concentraciones de 250 ppm se pueden producir edemas pulmonares y es mortal en corto tiempo a concentraciones desde 1000 ppm. Es fuertemente corrosivo en motores de combustión y otros equipos el  $H_2S$ .

#### 2.1.14.3 Acumulador de gas

El acumulador de gas sirve como órgano tampón entre la formación del gas y su utilización. Mientras mejor sea la regulación entre estos dos componentes, se puede seleccionar un acumulador de gas más pequeño. Dependiendo de la escala de presión, es diferenciado en compactación baja, media o alta, donde, en estos momentos, el monopolio del caudal del biogás, lo tiene la primera variante. Las compactaciones media y alta podrían ganar en significación, cuando existan más formas de compactación del gas, como por ejemplo, el envío de gas hacia la red de gas natural o si el gas es aprovechado como combustible para vehículos motorizados, lo que lo haría económicamente interesante.

En la práctica se utilizan predominantemente acumuladores de gas de determinados tipos de plásticos reforzados. Con esto la acumulación de gas puede estar ya sea integrada al fermentador o separada. Además la acumulación de gas puede ser en fermentador con tapa de concreto. Sin embargo aquí hay grandes exigencias respecto de la calidad y la forma de trabajar el concreto. Basado en las bajas presiones que se originan en el acumulador de gas, hay disponibles para el uso en motores de gas condensadores, los motores de combustión por chispa son, por el contrario, auto-succionadores.

Ilustración 27: Acumulador de gas.

Etapa de Presión	Presión de Trabajo			Tamaño Frecuente m3	Equipamiento
	mbar	mm WS	bar		
Baja Presión	20 - 50 0,05 - 0,5	200 - 500 0,5 - 5		5 - 200 10 - 2000	Gasómetro tipo taza de agua con manivela de folio - almacenador
Media Presión			5 - 20	1 - 100	Contenedor de presión de acero
Alta Presión			200 - 300	0,1 - 0,5	Botellas de Acero

#### 2.1.14.4 Salidas del acumulador del gas

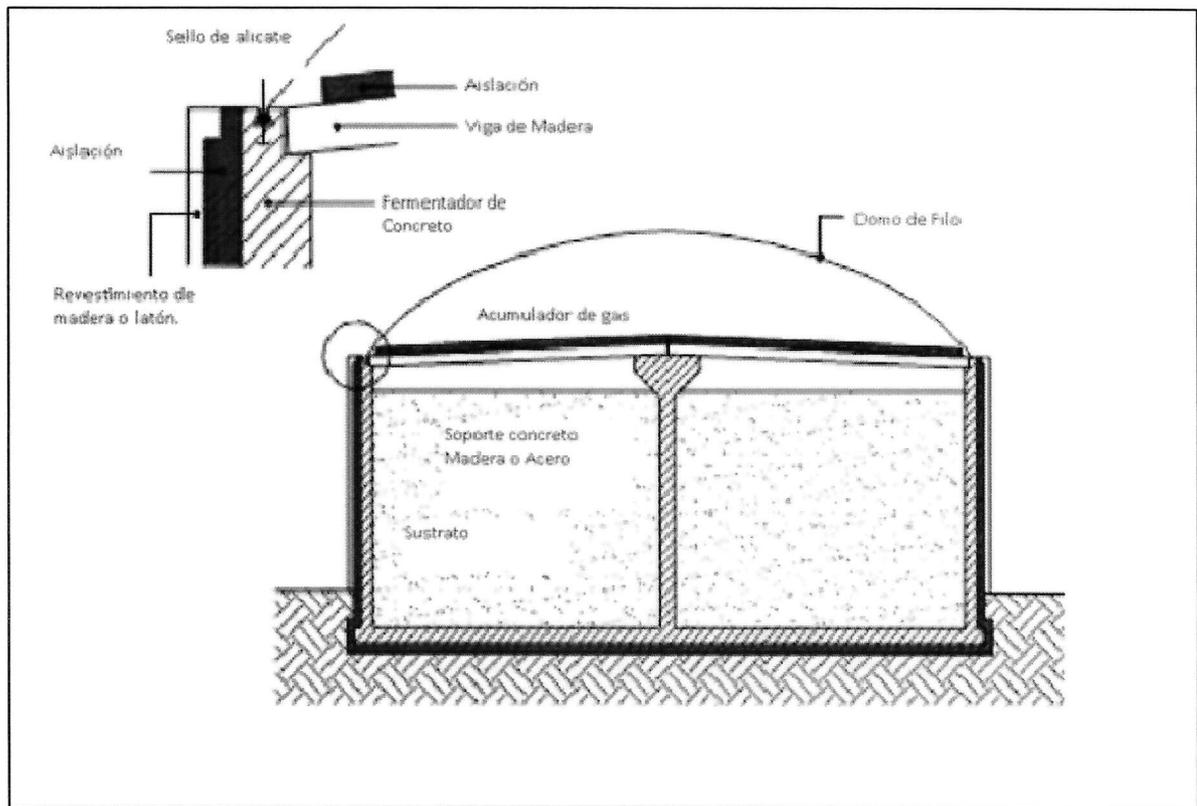
##### ➤ Acumulador de gas interno

En muchos casos se produce la acumulación de gas directamente en el correspondiente fermentador, por lo que no sería necesaria la instalación de un acumulador de gas adicional. En plantas donde hay un acumuladores de paso puede utilizarse el fermentador variable, eventualmente la bodega de fermento, como acumulador de gas, donde los fermentadores tienen que estar provistos de tapas de concreto. Las plantas de biogás vienen reforzadas con cubiertas de folio, con lo que, por un lado, se prescinde de las tapas de concreto caras y por otro posibilita la acumulación de un mayor volumen de gas. En las tapas de folio vienen las siguientes variantes a ser utilizadas:

##### ➤ Carcasa de lámina

El uso energético del biogás producido puede ser de distintas formas. En la mayoría de los casos el gas producido es canalizado y enviado a la red, para lograr un retorno monetario. La necesidad propia de energía de la planta de biogás puede ser cubierta ya sea a través de la red de energía o directamente del BHKW. Una parte del calor de los equipos canalizadores es utilizada para la mantención de los procesos de degradación. El resto del calor producido queda a disposición de otros usos. Los desarrollos técnicos para la preparación del biogás posibilitan, hoy en día, también una alimentación del biogás a las redes de gas. Una visión esquemática se puede observar en la siguiente ilustración.

**Ilustración 28: Esquema carcasa de lámina.**

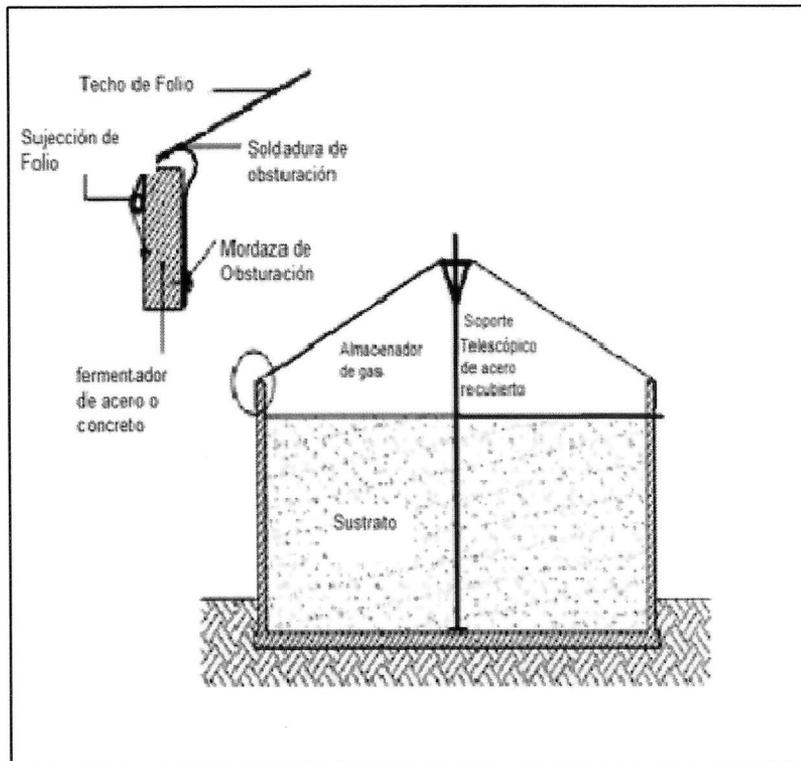


Fuente: „Biogashandbuch Bayern“ (2007)

### ➤ **Techo de folio**

El techo de folio es colocado en contra de la carcasa de folio con un soporte medio. Este puede ser un soporte telescópico y con ello puede variar en altura. La adaptación del folio se produce por medio de una sujeción especial. El techo de folio puede colocarse como una capa o dos capas. Con la colocación de un soporte medio, estos techos de folio son adecuados para soportar grandes tensiones (ilustración 29).

Ilustración 29: Esquema techo de de folio

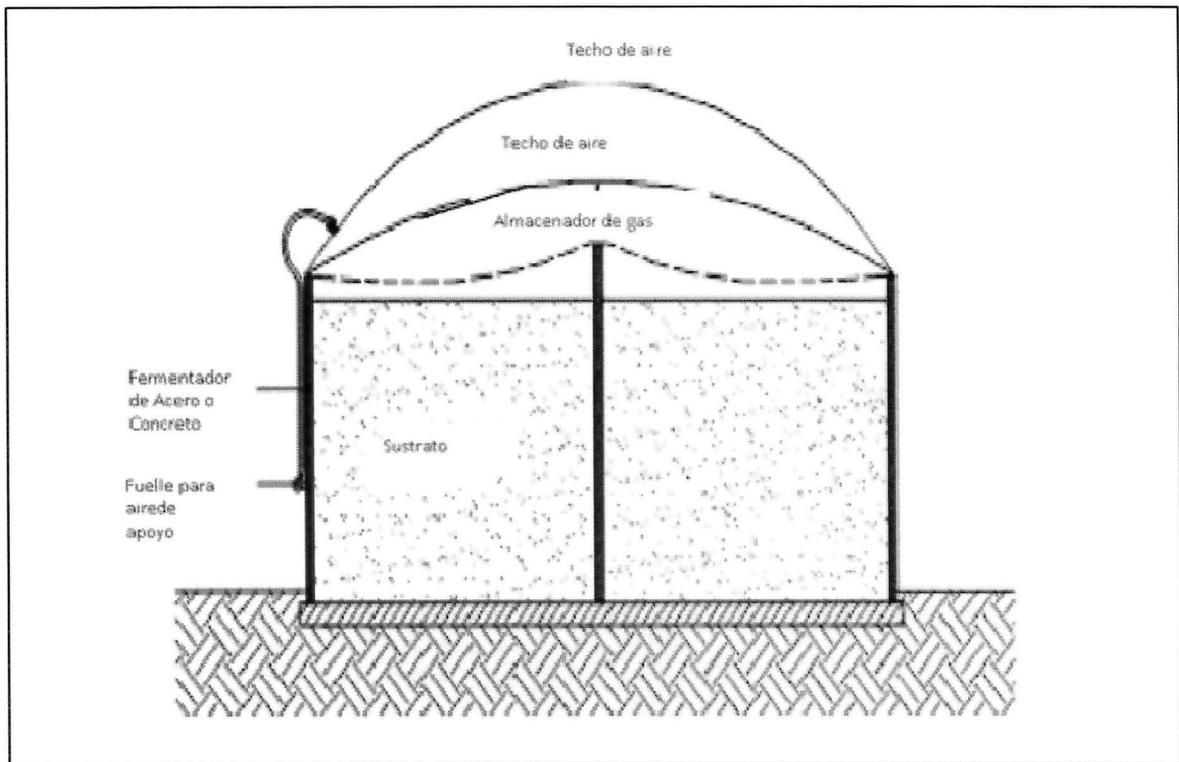


Fuente: „Biogashandbuch Bayern“ (2007)

- **Techo neumático**

Otra variante es un techo neumático. Aquí se trata de dos folios, que son colocados sobre el fermentador. Aquí, el folio interior es la membrana de gas y el folio exterior es el folio protector. Entre ambos folios se sopla aire como soporte. La caída de la membrana de gas sobre el espejo de sustrato es evitada mediante un soporte medio o un andamio de cuerdas (ilustración 30).

Ilustración 30 Esquema techo



Fuente: „Biogashandbuch Bayern“ (2007)

➤ **Acumuladores de gas por folios, separados**

Otra posibilidad más es la instalación de acumuladores de gas externos de folios. Estos son especialmente instalados don no hay posibilidad de acumular gas en el fermentador (como por ejemplo en fermentadores horizontales con domo de gas sin post-fermentador). Los acumuladores de gas por folio externos son, ya sea recubiertos con carcasa o son rigidizados y protegidos en el exterior.

### 2.1.15 Utilización del gas

Por décadas la obtención de calor del biogás fue prácticamente el único camino posible para darle valor agregado al biogás. Últimamente esta posibilidad de agregarle valor al biogás fue desplazada por la conexión de calor por fuerza. La utilización del biogás para la generación limpia de calor es una variante económicamente interesante, ya que todos los otros tipos de utilización del biogás tanto en la preparación de los equipos técnicos como también por los altos costos de producción son mucho más caros. No es sensato almacenar el biogás por mucho tiempo. El biogás es excelente para cubrir las altas producciones y también se puede cubrir una carga básica.

Otra posibilidad para la utilización del biogás es la creación de un sistema de transporte del biogás hacia usuarios individuales. Debido a problemas técnicos de pequeños quemadores de gas, esta posibilidad por el momento no se realiza. Si el biogás es llevado para ser utilizado como calefactor, se necesitan quemadores de gas especiales (quemadores de biogás sin soplete, quemadores de biogás con soplete). La instalación depende primeramente de la potencia disponible, básicamente se implementan sopletes que funcionan en combinación con gas natural.

En las plantas de conversión de energía se distinguen 3 tipos de procesos:

- *Proceso de Calefacción*
- *Proceso de Potencia Térmica*
- *Proceso unido de Potencia y Calefacción*

En el proceso de calefacción se produce como energía primaria en la caldera vapor o agua caliente. El grado de utilización de la energía es relativamente alto y la media anual está en aproximadamente 88%; el resto sería pérdida en el humo, que sale por la chimenea y se diluye en el entorno. La energía útil generada es calor en forma de agua caliente o vapor de baja presión y puede ser utilizada para la calefacción de salas o como calor de proceso en los procesos industriales.

Desde el punto de vista termodinámico tiene una baja valorización, o expresado de otra forma, su contenido exergético es poco. (La exergía muestra la parte del total de energía

de un sistema o corriente de un material, que puede ejecutar un trabajo, cuando es llevado a un balance termodinámico (térmica, mecánica y química) con su entorno.)

En los procesos limpios de potencia se origina en la caldera como energía primaria vapor a alta presión, en la turbina es reducido y transformado en energía mecánica y luego transformado en energía eléctrica. El vapor sale de la turbina a una presión bajo la atmosférica y a temperatura ambiente.

Eventualmente es condensado en el condensador y entrega su calor latente al agua de enfriamiento. El grado de utilización de la energía es, comparado con los procesos de calefacción puros, más bajo, en grandes generadoras está cercano al 40%.

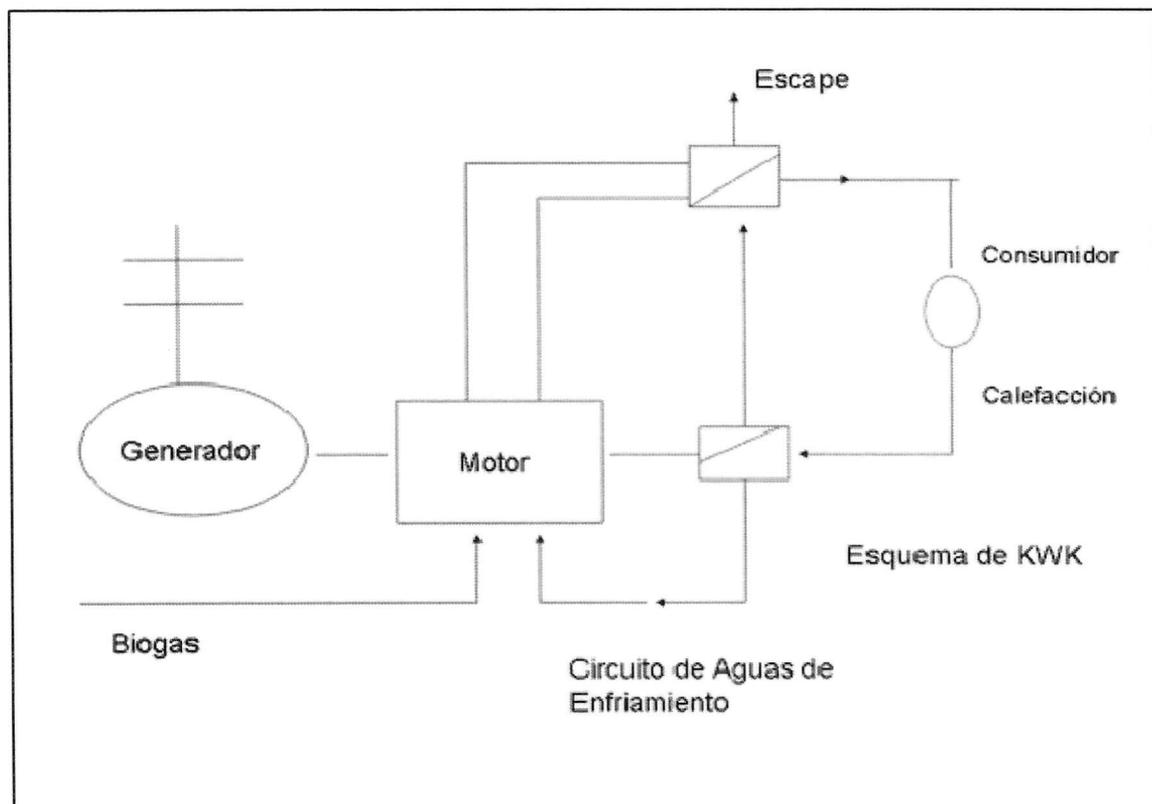
La energía utilizable producida tiene eso sí una gran valencia. Está compuesta en un 100% de exergía y puede ser modificada a cualquier otra forma de energía. Además de las pérdidas por la chimenea hay grandes pérdidas hacia el entorno por el agua de enfriamiento del condensador.

En la generación conjunta de energía eléctrica y calor o co-generación el vapor a alta presión no es llevado desde la turbina hasta la presión del condensador, sino que a una presión un poco más alta se desacopla de la turbina.

Su calor latente y sensible es utilizado como calor útil en forma de vapor de proceso o agua caliente y no se pierde en el entorno. Por la alta presión del desacoplamiento en comparación con la presión de condensación se evita por sobretodo una determinada pérdida de energía. La energía del combustible es transformada ya sea en energía con mayor valor (electricidad), como también con menor valor (calor). El grado de utilización de la energía está al igual que en el proceso de calefacción en un 88%, eventualmente podría ser levemente menor.

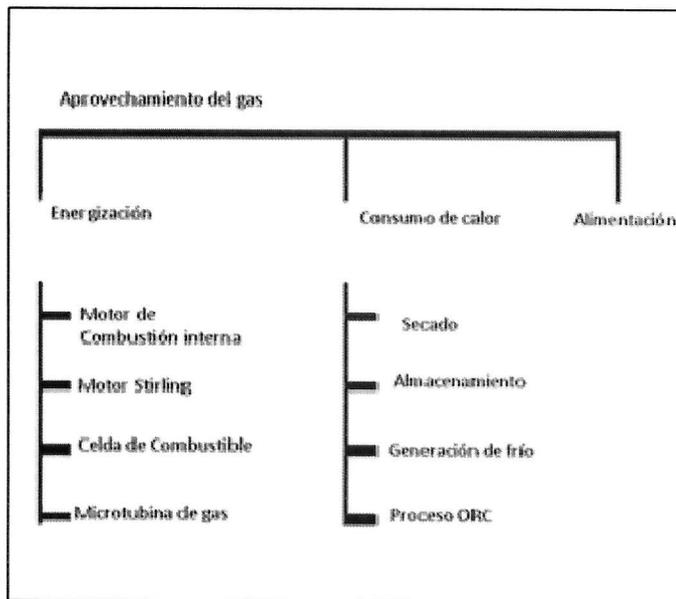
Generación de electricidad con el producto adicional calor. Generalmente en esta relación se utiliza también el término Generador de Calor de Bloque (BHKW). En esta central de energía se ingresa el biogás en un motor de combustión y es modificado a formas de energía utilizables. Para poder operar una planta de biogás moderna en forma comercial, es de especial importancia una buena utilización del calor, idealmente todo el año. Para la canalización del biogás con la utilización de calor existen, dependiendo del tamaño de la planta, distintos tipos de motores y procesos de combustión (bencina, diesel o motores de combustión interna) disponibles, los que se diferencian claramente en relación a rendimiento, vida útil y en los costos de inversión. Ver el esquema en la ilustración siguiente. En la utilización del calor producido por el motor se usa agua fría como también el gas caliente del escape. El motor de combustión pone en movimiento un generador conectado, el que sirve para la producción de electricidad. Para la generación de electricidad se instalan generadores asíncronos, que se caracterizan por su robusta forma constructiva. En el ámbito del acoplamiento Fuerza-Calor se puede lograr la mayor eficiencia en la transformación de energía del biogás. El rendimiento general está en aproximadamente 85 a 90% de la energía reintegrada.

Ilustración 31: Esquema Generador de Calor de Bloque (BHKW)



El uso energético del biogás producido puede ser de distintas formas. En la mayoría de los casos el gas producido es canalizado y enviado a la red, para lograr un retorno monetario. La necesidad propia de energía de la planta de biogás puede ser cubierta ya sea a través de la red de energía o directamente del BHKW. Una parte del calor de los equipos canalizadores es utilizada para la mantención de los procesos de degradación. El resto del calor producido queda a disposición de otros usos. Los desarrollos técnicos para la preparación del biogás posibilitan, hoy en día, también una alimentación del biogás a las redes de gas. Una visión esquemática se puede observar en la ilustración 32.

**Ilustración 32: Visión esquemática de las distintas formas de uso energético del biogás.**



Para la obtención de energía desde el biogás existen distintas posibilidades. La forma más utilizada para la producción de energía es por medio de la combustión del biogás en un motor de encendido o "Gas-Otto", al cual es acoplado un generador para la generación de corriente. La corriente así producida es traspasada hacia la red pública de energía y según la ley bonificada en el por ser energía renovable (EEG). Actualmente se está probando, para la producción de electricidad, celdas de combustible y microturbinas a gas. Ellas entregan algunas ventajas, pero por el bajo estado de desarrollo aún no están disponibles en el mercado.

### 2.1.15.1 Motores de combustión interna

Existen distintas formas constructivas para los motores de BHKW y procedimientos de combustión (ver Tabla). En los motores a bencina se trata de motores PKW, los que en una planta de gas son transformados. Debido a su poca potencia, por regla son utilizados en pequeñas plantas de Biogás. Dadas sus altas revoluciones (aproximadamente 3000 RPM) son indicados como de alta velocidad.

**Tabla 11: Formas constructivas para los motores BHKW y sus procedimientos de combustión.**

Característica	Tipo de Motor y Sistema de Encendido		
	Motor Bencinero Sistema Gas-Otto	Motor de Gas Sistema Gas-Otto	Motor Diesel Sistema de Combustión Interna
Precio	bajo	muy alto	alto
Rendimiento	20 - 25%	30 - 40%	33 - 42 %
Vida Útil	bajo	medio-alto	medio
Ruido	medio	fuerte	media
Hollín en el Escape	no hay	no hay	existe
Mantenimiento	alto	poco	medio
Consumo de Aceite de Encendido	no hay	no hay	> 3%
Combustible de reemplazo en caso falle el biogas	Gas fluido (bencina)	Gas licuado (Propano/Butano)	Aceite Térmico, Aceite Diesel (Aceite de Plantas)

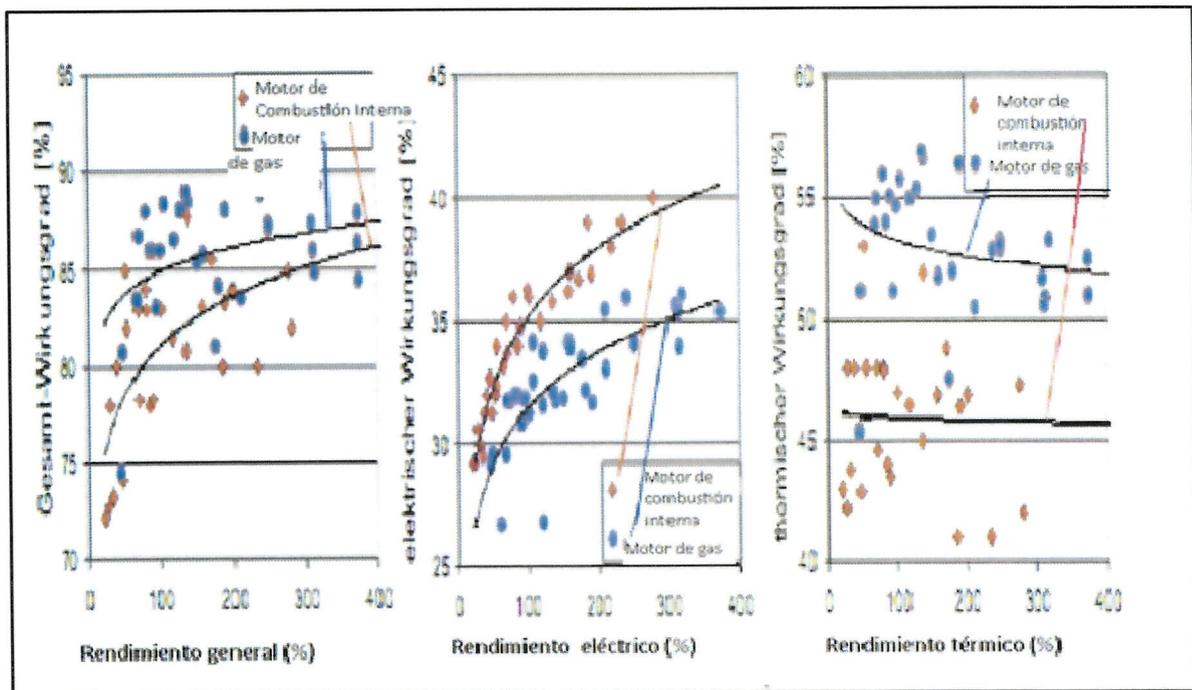
Fuente: „Biogashandbuch Bayern“ (2007)

En plantas de biogás más grandes son instalados equipos Diesel. Aquí se trata de, ya sea, de motores Diesel transformados a uno de tipo Gas-Otto (motor de gas), que tienen un mezclador de gas y un encendido a distancia, o motores diesel seriados (motores de combustión interna), en los cuales la condensación de la mezcla de gas es agregada en poca cantidad por medio de toberas hacia el combustible.

El encendido de la mezcla de gas se produce por condensación. La armazón base de estos BHKW son modelos de distintos fabricantes de motores, los que son modificados por los fabricantes de los BHKW para trabajar en plantas de biogás.

La ventaja de la BHKW por combustión es la potencia que alcanza entre 30kW hasta 300 kW, contrariamente a las BHKW con motor de gas, que tienen un bajo precio y mayor eficiencia eléctrica. Además, en caso de una caída en la producción de gas, la planta puede seguir funcionando rápidamente con aceite térmico. El motor a gas tiene, en comparación con el motor de combustión interna, un mayor rendimiento general y térmico y lleva a tiempos de reposo más largos (ilustración 33).

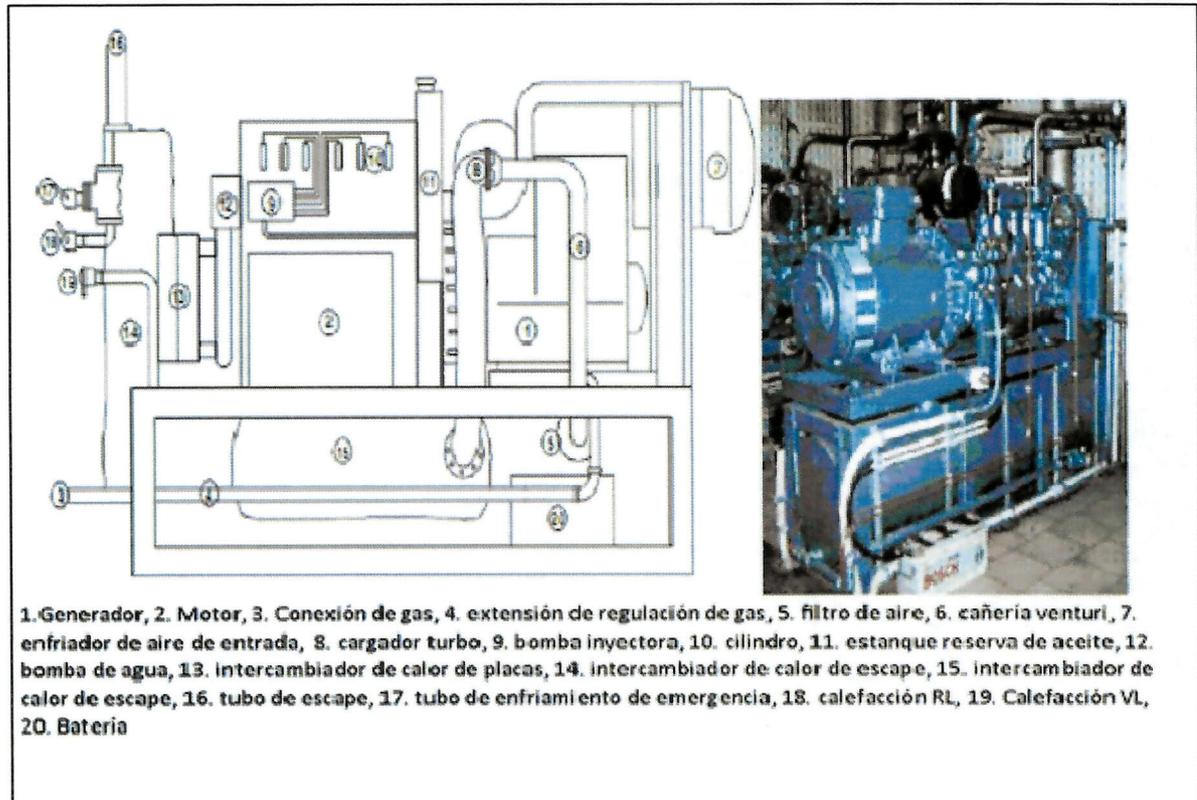
**Ilustración 33: Comparación entre motor a gas y motor de combustión interna**



Fuente: "Biogashandbuch Bayern" (2007)

El encendido de la mezcla de gas se produce por condensación. La armazón base de estos BHKW son modelos de distintos fabricantes de motores, los que son modificados por los fabricantes de los BHKW para trabajar en plantas de biogás

Ilustración 34: Armazón base de motores para BHKW



Fuente: "Biogashandbuch Bayern" (2007)

Para la combustión en una BHKW el gas debe cumplir con determinadas exigencias (Tabla 12). En general pueden cumplirse estas exigencias mínimas. En todo caso, para no acortar la vida útil de estas generadoras, el contenido de  $H_2S$  en el biogás no debe sobrepasar valores de entre 150 hasta 200 ppm. Otros componentes problemáticos del gas se originan especialmente durante la co-fermentación de biomasa industrial. Aquí pueden originarse uniones de siloxano y fósforo, los que producen problemas en la cámara del motor y en el gas residual (Herdin 2002).

La entrada de aire necesaria para el proceso de combustión se fija según el valor Lambda (valor  $\lambda$ ). El valor para el encendido estequiométrico están en  $\lambda = 1$ , esto quiere decir que se entrega la misma cantidad de oxígeno, como la que sea necesaria para la completa oxidación del combustible. En la combustión del biogás no es posible funcionar con un  $\lambda$  de 1, dado que en ese ámbito los valores de emisión para  $NO_x$  y  $CO$  serían demasiado altos.

**Tabla 12: Características mínimas para motores a gas (Preschne, Golish U. Wichmann, 2000)**

Característica	Unidad
Valor de calor inferior	> 4 kW /m <sup>3</sup>
Contenido de Metano	> 40 Vol - %
Azufre total	< 2.300 mg/m <sup>3</sup> nCH <sub>4</sub>
Cloro	< 100 mg/m <sup>3</sup> nCH <sub>4</sub>
Fluor	< 50 mg/m <sup>3</sup> nCH <sub>4</sub>
Suma de Cloro y Fluor	< 100 mg/m <sup>3</sup> nCH <sub>4</sub>
Silicio	< 10 mg/m <sup>3</sup> nCH <sub>4</sub>
Parte sólida (tamaño de parte < 1µm)	< 30 mg/m <sup>3</sup> nCH <sub>4</sub>
Sulfuro de Hidrógeno	< 0,15 Vol. - %

El manejo de los gases de escape es posible de hacer mediante un catalizador de oxidación orientado a las emisiones de CO, pero porque hay una falta de investigación técnica de largo plazo no es aún posible de lograr. Esto fue demostrado en investigaciones realizadas por la Oficina para el Medio Ambiente del estado federado de Baviera (Sklorz et Al. 2004). Por ello las BHKW de biogás son ajustadas y operadas según motores especiales („Magermotors”), para poder mantener, en lo posible, los valores de emisión de NO<sub>x</sub> y CO lo más bajo.

Un desplazamiento en la combustión en el ámbito magro está sobretodo ligado a las pérdidas de potencia, dada la gran cantidad de aire en la mezcla del motor, entrega menos energía para la combustión. Un incremento de la densidad de la energía se logra mediante la compresión y enfriamiento de la mezcla con la inclusión de un turbo-alimentador del escape con enfriamiento del aire entrante. Para poder mantener durante toda la vida útil de BHKW los valores de escape indicados, se debe realizar un recurrente control de los valores de los gases de escape durante el mantenimiento y la regulación del motor (ver Cáp. 1.6). Para la producción de Energía Eléctrica se deben distinguir dos tipos de generadores, el generador sincronizado y el generador no sincronizado. El generador sincronizado necesita una fuente de corriente continua para la excitación, esto quiere decir, que puede instalarse incluso cuando no hay disponible una conexión a la red fija y la necesidad de energía puede ser mantenida por el BHKW (proceso isla). Un equipo sincronizado se adecua a la frecuencia y fase al abastecimiento de la red eléctrica.

Con el generador no sincronizado la red eléctrica toma la frecuencia, para que concuerde la energía con la frecuencia y la fase. Este sistema es más sencillo y barato que el generador sincronizado, pero, sin embargo, posee un rendimiento menor (Gütling y Kamm, 2001). El enlace con la red aparece hasta 1MW por sobre la red de bajo voltaje.

En las generadoras de calor por bloques con motores de combustión interna “BHKW” (combustion engine CHP- unit, frecuentemente también llamadas packaged CHP-unit) un motor de combustión interna mueve el generador en y fuera de los gases de escape y el agua fría es al mismo tiempo generado calor útil. En su mayoría son utilizados para el suministro de calor a pequeñas y medianas redes de calor, e instaladas en plantas clarificadoras. El médium calefactor es agua que circula a una temperatura de 85 a 90°C. Los BHKW tienen una potencia eléctrica promedio cercana a los 500 kW, plantas más grandes alcanzan potencias de hasta 10MW. Los combustibles son, en primera línea, gas natural, biogases, Diesel y gas depurado.

Las BHKW son entregadas de fábrica como unidades de Módulos completas con motor, generador, intercambiador de calor y armario de distribución. Igualmente se ofrecen plantas completas, con llave, en una forma constructiva tipo contenedor.

Tabla 13: Características y presentaciones de los BHKW motorizados para Biogás.

	Motor Gas-Otto	Motor de Combustión Interna
<b>Ambito de Rendimiento</b>	hasta 2 MWel	hasta 540 kWel
	Escasamente bajo 100kWel	hasta 10% de Fuel Oil para el encendido
<b>Rendimiento</b>	Eléctrico 30-41%	Eléctrico 35-45%
	Térmico 34-56%	Térmico 40-43%
<b>Parada</b>	60000 horas de trabajo	350000 horas de trabajo
<b>Mínimo contenido de Metano necesario</b>	45%	suprimir
<b>Costos Específicos</b>	Mayores que motor de combustión interna	Menor que motor Gas-Otto
<b>Biogas- BHKW</b>	A la misma potencia	A igual potencia
<b>Ventajas</b>	Construido especialmente para valorización de Gas	En el último nivel de rendimiento
	Se mantienen los niveles límite	Mayor rendimiento eléctrico que

	de emisión	los
		Gas-Otto
<b>Desventajas</b>	En el último nivel de rendimiento	Adición de un combustible adicional (10% de consumo de fuel Oil del contenido energético del Biogás),
	Menor rendimiento eléctrico que los	La emisión de contaminante frecuentemente sobrepasa los valores límites permitidos según TA.
	Motores de combustión interna.	
<b>Particularidades</b>	Es posible la regulación de potencia en dependencia de la calidad del gas	
	Para el caso de sobrecalentamiento es necesario tener en cuenta un enfriador de emergencia.	
<b>Combustibles de Reemplazo, eventualmente Aceite Térmico</b>	Gas Licuado	Aceite térmico, Diesel (aceite vegetal) según las normas EEG que rigen desde 2007 para las plantas nuevas
	Gas Natural (inusual)	Según las normas EEG desde 2007 que dice que se puede utilizar sólo combustibles biogénicos y aceites combustibles como combustibles de reemplazo

Fuente<sup>14</sup>

#### 2.1.15.2 Celda de Combustible

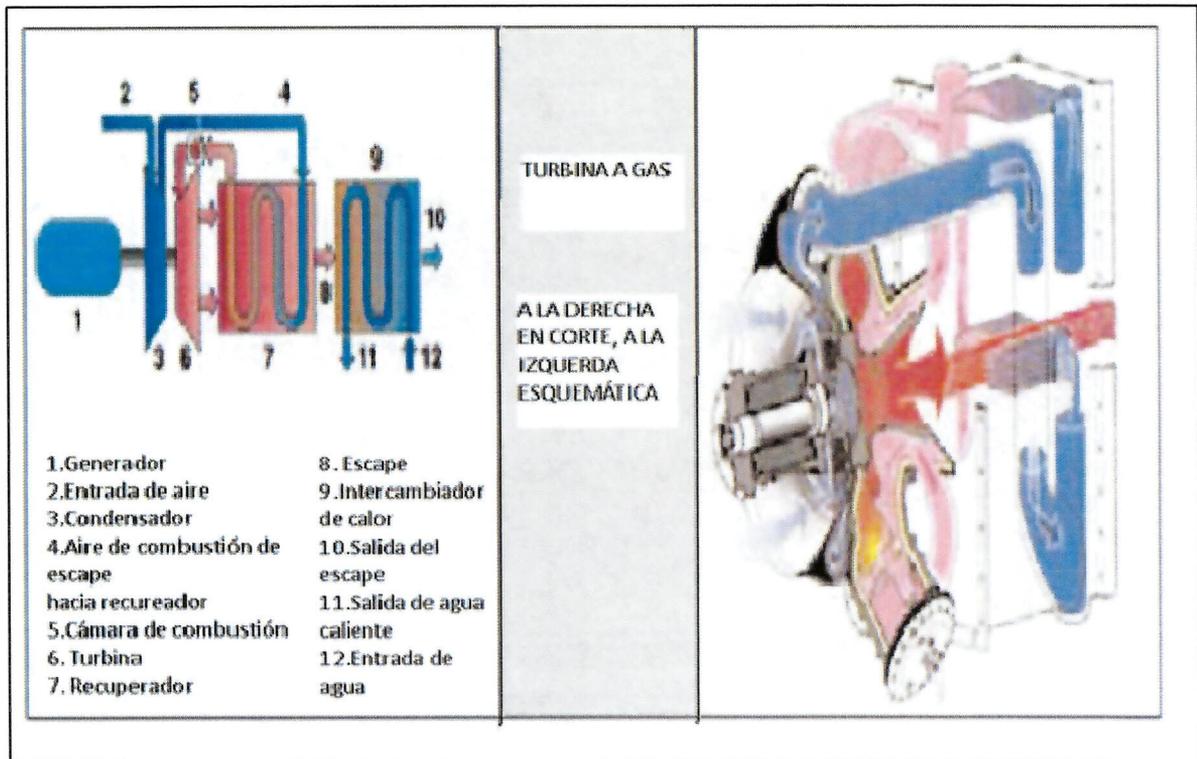
Las celdas de combustible producen desde los elementos oxígeno e hidrógeno energía eléctrica y calor. Como producto de la reacción de la reacción electroquímica se origina sólo vapor de agua. Sobre todo el hidrógeno debe prepararse en primera instancia, para ello se añaden combustibles fósiles o alternativamente biogás originado de procesos anaerobios. Hay una gran cantidad de tipos de celdas de combustible, las que se distinguen según la temperatura de proceso y el tipo de membrana. La potencia eléctrica varía entre 1 kWel. y hasta 250 kWel. en procesos estacionarios. Por ahora las celdas de combustible son operadas principalmente con gas natural de origen fósil, algunas investigaciones se ocupan también del uso de biogás limpio. Se han instalado celdas de combustible en plantas en las cuales se requiere un alto rendimiento electro/mecánico (generación de electricidad/motorización de vehículos)

<sup>14</sup> „KTBL – Faustzahlen Biogas VII; Modellanlagen und Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen“ Página 78/79

### 2.1.15.3 Microturbina de gas

En las Micro Turbinas de Gas se trata de turbinas de gas pequeñas y de funcionamiento rápido con bajas presiones y temperatura en la cámara de combustión. Se desarrollaron desde la tecnología de los turbo-alimentadores y de los motores auxiliares de la industria de la aviación y son utilizadas especialmente como plantas de acoplamiento de Fuerza-Calor en la producción de energía de las de-centrales en el ámbito de potencia bajo 200. Las Microturbinas de gas se caracterizan por sus muy bajas emisiones, baja producción de ruido y muy bajos costos de mantenimiento. Como combustibles se puede utilizar gas natural, biogás, gas licuado, gases de antorcha y aceite térmico. Para la inclusión de biogás se ofrece por parte de la empresa "Pro 2 Anlagentechnik GMBH" una turbina de gas con 95 kWel y por parte de la empresa "Gas Energietechnologie GMBH" una turbina de gas con 28 kWel.

Ilustración 35: Turbina a gas.



Fuente: "Biogashandbuch Bayern" (2007)

#### 2.1.15.4 Preparación del biometano

Junto con la generación de calor limpio y electricidad el biogás producido también puede ser utilizado en otras instancias. Entre los distintos portadores energéticos, el biometano resulta un conveniente sustituto de varios energéticos primarios. Como biocombustible para el sector transporte, el biometano tiene un buen desempeño, no es necesario mezclarlo con los derivados del petróleo, y representa una buena opción para la transición hacia el hidrógeno como combustible del futuro.

En contraste a los biocombustibles comunes, el biometano es producido a partir de la biomasa residual generada en el sector agrícola y forestal, con una bajísima o prácticamente nula emisión de carbono, disponiendo entonces de manera inmediata y sostenida de ventajas para controlar las emisiones de gases con efecto invernadero y con ello hacer uso de los mecanismos y metodologías existentes para la emisión de bonos de carbono mediante la implementación de MDL. Por otra parte, el uso de biomasa residual no ocasiona un conflicto con la seguridad alimentaria, ni exige el uso intensivo del suelo dedicado a sólo ciertos tipos de cultivos agrícolas o de plantaciones forestales.

La presencia de amoníaco y ácido sulfhídrico resultan negativos para la utilización del biogás. Por esto siempre es necesario realizar una limpieza y recuperación, lo cual se realiza en un proceso que consta de cuatro etapas.

a) Primera etapa: Desazufrado

Existen distintas posibilidades en donde son necesarias varias etapas, tal como la de un desazufrado grueso y un desazufrado fino.

1. Después de la producción de gas se requiere una limpieza por medio de un filtro de desazufrado. El gas es conducido hacia un material de filtro que contiene fierro. El material de filtro debe ser cambiado cuando el material se satura.
2. Limpieza de la cámara de gas mediante la incorporación de oxígeno. El  $H_2S$  (sulfuro de hidrógeno) es descompuesto a azufre elemental. El azufre es colocado en la cámara de gas. Hasta ahora, este es el método más utilizado, pero tiene una desventaja porque el azufre no puede salir de la planta de biogás, por lo que este procedimiento es adecuado sólo para concentraciones de sulfuro de hidrógeno muy bajas.
3. Cuando la materia prima de sustrato presenta un alto contenido proteico, las concentraciones de sulfuro de hidrógeno pueden llegar a elevarse hasta 20.000 ppm en el contenedor de descomposición, entonces cada filtro se sobrecarga. Con la adición de iones de hierro se impide la formación de sulfuro de hidrógeno debido a su gran afinidad con el hierro. El hierro se une con el azufre y juntos forman sulfuro ferroso ( $FeS$ ) insoluble. El sulfuro ferroso permanece como sustancia sólida en el desecho orgánico. Se debe notar aquí la interrupción del efecto del sulfuro de hidrógeno disuelto en el desecho orgánico. Si sólo se respeta la desulfurización del gas (los puntos 1 y 2 anteriores) y se descuida la desulfurización recién descrita, una determinada concentración de  $H_2S$  desfavorece la formación de metano debido al envenenamiento de las bacterias que terminan desapareciendo.

b) Segunda etapa: Condensación

La condensación de biogás es generalmente necesaria cuando el biogás, después de su preparación, va a ser alimentado a la red de gas natural. Especialmente para la utilización como combustible es necesario comprimirlo a una presión sobre los 200 bar para lograr mantener una condensación energética suficiente. Esas presiones tan elevadas son posibles de lograr mediante condensaciones en varias etapas.

c) Tercera etapa: Secado

El biogás es secado mediante el enfriamiento de la tierra o por compresión. La disminución de la temperatura correspondiente al punto de condensación del vapor de agua, permite que el agua se condense, es decir, que pase de la forma gaseosa a la líquida. Entonces, el agua puede ser colectada en la base de las cañerías del biogás y posteriormente retirada. Con dispositivos de refrigeración, el agua puede extraerse del biogás, pudiendo ser juntada y retirada.

d) Cuarta etapa: Separación del CO<sub>2</sub>

La preparación del biogás conlleva además de los procesos mencionados para la desulfurización y para la reducción de las partes de amoníaco, también la reducción de las partes de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Así el proceso de enriquecimiento del metano mediante la separación de CO<sub>2</sub> consiste en lavadores de gas, como por ejemplo, el lavado con agua a presión (proceso de absorción con agua o procedimiento de lavado especial) y mediante la absorción por intercambio de presión (proceso de absorción con carbón activado).

El biogás crudo contiene metano entre un 50 a 70%, dependiendo de la materia prima introducida al biodigestor. El resto está compuesto principalmente de carbono y trazas de azufre, nitrógeno y oxígeno juntos. Este proceso consiste en transformar el biogás en biometano puro. Esto puede hacerse en la planta de biogás o en el lugar donde se ubique el usuario de la energía. Esto da la posibilidad de crear pequeñas centrales en forma descentralizada.

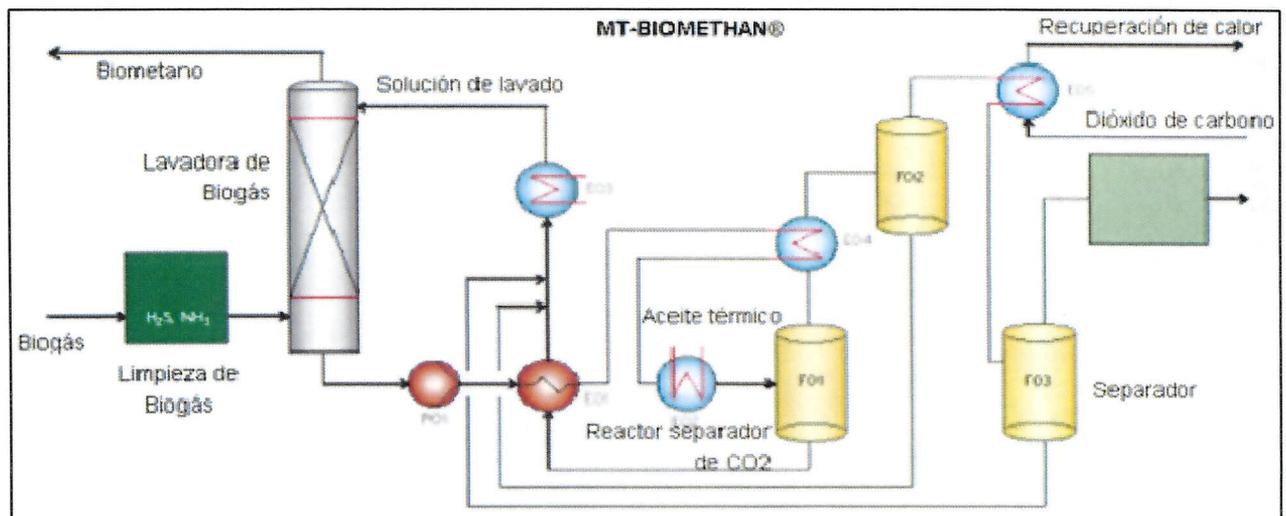
**Tabla 14: Principales diferencias entre biogás y biometano**

Sustancia	Biogás	Biometano
Metano	50-70%	93-98%
Dióxido de carbono	25-40%	1%
Nitrógeno	< 3%	1%
Oxígeno	< 2%	-
Hidrógeno	trazas	-
Sulfuro de hidrógeno	Hasta 4000 ppm	-
Amoníaco	trazas	-
Etano	-	< 3%
Propano	-	< 2%
Siloxano	trazas	-

Fuente: Thrän 2005.

En especial para la extracción del CO<sub>2</sub> existe un proceso innovador que pertenece a la empresa MT-Energie GmbH & Co. Kg. A continuación, en la Ilustración 36 se presenta un resumen esquemático de este proceso.

**Ilustración 36: Esquema de la tecnología de obtención de biometano a partir de biogás.**



Fuente: MT-Energie GmbH & Co. Kg.

La "limpieza con aminas sin presión" comprende ciertos pasos necesarios para llevar el biogás con desechos (y otras materias primas que aparecen) a biometano, energéticamente rico y con calidad equivalente a la del gas natural. El biogás es separado del sulfuro de hidrógeno. El gas prelimpio se trabaja sin presión en la lavadora de biogás con una solución de aminas. Aquí es retirado prácticamente la totalidad del CO<sub>2</sub> contenido (<0,5 Vol. %). La solución cargada con CO<sub>2</sub> se pasa por un enfriador y luego es devuelta al proceso. Entre los productos adicionales que aparecen de la solución cargada con CO<sub>2</sub> se obtienen trazas de vapor de agua y también se recupera el calor.

#### 2.1.15.5 Alimentación a la red de gas

En la alimentación del biogás a la red de gas natural se debe tener presente que además de los productores de gas natural también se debe pensar en la calidad y los componentes del biogás – en relación a la calidad oscilante del biogás se presenta un problema técnico. La limpieza del gas es hasta el momento el mayor problema técnico para la alimentación de biogás a la red pública de gas. Se están desarrollando trabajos de investigación relativos al tema (por ejemplo en TU de Viena), se están desarrollando en Europa otros proyectos de investigación,

Por la creciente liberación del mercado del gas austriaco y por la ley alimentación de gas resultante de ello, se han presentado las exigencias legales y económicas. La alimentación de biogás a la red de gas natural y una combustión/valorización conjunta en grandes plantas posibilita una utilización más eficiente del biogás en grandes plantas KWK, donde son posibles altos rendimientos eléctricos (> 50%).

#### 2.1.15.6 Utilización del combustible

Básicamente el biogás es adecuado como combustible para motores con encendido lejano, sin que se tengan que realizar modificaciones técnicas en los motores. En otros motores (motores Diesel) o plantas electroquímicas (por ejemplo celdas de combustible) son necesarias modificaciones técnicas. La utilización del gas como combustible asoma en este momento como económica pero no sensata, dado que el biogás debido a su baja densidad energética en grandes cantidades sólo puede transportarse en contenedores de alta presión. Determinadas plantas piloto, en las cuales se ha optimizado y desarrollado la tecnología y la economía, faltan en Austria. Aparece como interesante en el ámbito del combustible biogás el paso intermedio biogás/producción de metanol. El metanol es fácil de almacenar, no más peligroso que la bencina o el Diesel y puede utilizarse en los motores prácticamente en forma universal.

#### 2.1.15.7 Formación de de CO<sub>2</sub>

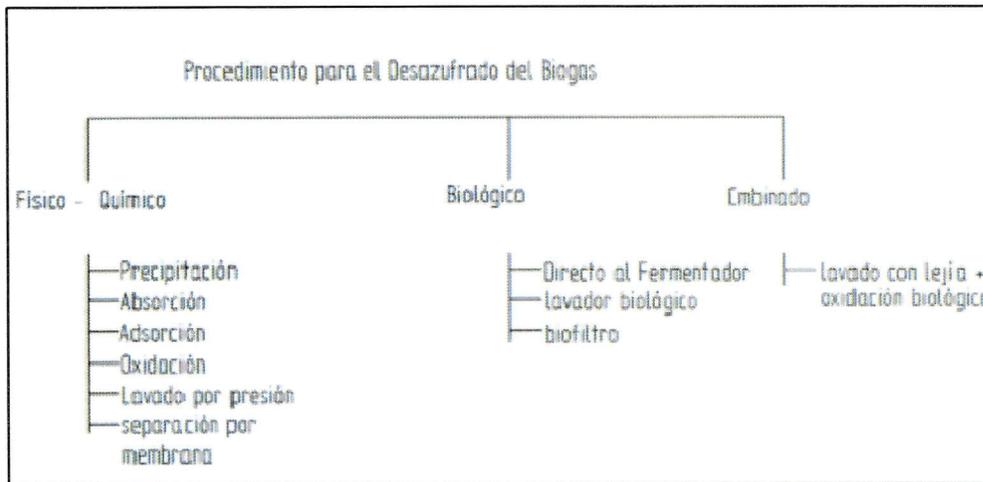
Numerosas empresas e instituciones de investigación, especialmente de Alemania, están ocupadas en la investigación para el desarrollo de sistemas que produzcan metano muy limpio y CO<sub>2</sub> puro. El CO<sub>2</sub> limpio puede ser utilizado en silos agrícolas o en invernaderos y con ello reemplazar el CO<sub>2</sub> fósil. El CO<sub>2</sub> adicionado como abono posibilita aproximadamente un 20% más soporte y un menor tiempo de vegetación en las plantas. A una determinada más alta limpieza el CO<sub>2</sub> podría ser utilizado en productos químicos, como por ejemplo, policarbonato. La peletización de hielos secos y el cuidado de las superficies por arenado con CO<sub>2</sub> son otros campos de utilización.

Valorización del sobrante de calor en las plantas de biogás producido en plantas que aprovechan productos de desechos agrícolas.

#### 2.1.16 Procedimientos para el Desazufrado del Biogás

Básicamente se diferencian entre procesos físico-químicos, biológicos y procesos combinados (ilustración 37).

Ilustración 37: Procedimiento para el desazufrado del biogás.



#### 2.1.16.1 Proceso Biológico

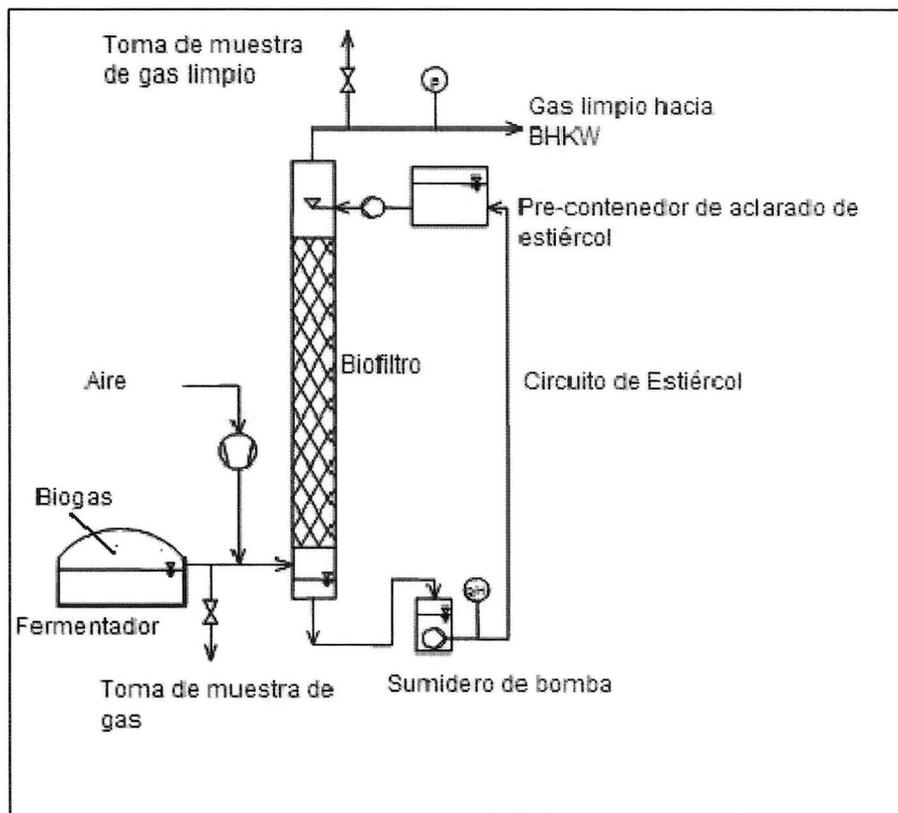
El desazufrado biológico se produce mediante microorganismos (llamadas bacterias de azufre incoloras), las que utilizan  $H_2S$  en su proceso metabólico como fuente de energía y con ello producen azufre y también sulfato. Estas bacterias están presentes en el sustrato de fermentación, el oxígeno debe ser igual introducido al proceso. En el desazufrado directo en la sala de gas del fermentador se regula la cantidad de oxígeno, por medio de la estaquimetría de las reacciones de descomposición, según el rango de producción de gas y de la concentración de  $H_2S$ . En la práctica se informa de un requerimiento de aire de entre 3 y 5% del rango de producción de gas. Determinante para la eficiencia del desazufrado directo en el contenedor de gas es el tener una gran superficie de colonización para las bacterias, para poder también determinar la “ruptura de los peaks de azufre” en el biogás. Este asentamiento de debiera ser recubierta con estiércol o agua fermentada, para así asegurar el abastecimiento de alimento y agua a las bacterias.

#### 2.1.16.2 Biodepuradores

En el desazufrado del biogás en biodepuradores no conmutadas, eventualmente filtros, surgen los mismos procesos de descomposición microbiológicos y físico-químicos. La principal diferencia asoma en la separación espacial de la producción de biogás y el desazufrado. Lo último se produce en un reactor separado, el que se encuentra ubicado entre el contenedor de fermento y el estanque de gas.

En el desazufrado en biodepuradores - filtros se cultivan los microorganismos que consumen el material, son los llamados cuerpo de llenado, y se forman en las superficies de biofilm. El biogás a ser limpiado fluye a través del filtro de abajo hacia arriba, donde el  $H_2S$  es absorbido por el biofilm y queda a disposición de las bacterias. La típica forma de un biodepurador con filtros para el desazufrado biológico se muestra en una figura en SCHNEIDER ET AL., 2002 (Ilustración 38).

**Ilustración 38: Típica forma de un biodepurador con filtros para el desazufrado biológico**



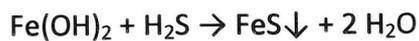
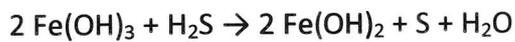
Fuente: "Biogashandbuch Bayern" (2007)

El fluido aclarado, que por un lado provee de nutrientes a los microorganismos y por el otro lado elimina el azufre elemental fuera de la colonia, es bombeado al circuito a través de un precontenedor. Por medio de un temporizador se pueden fijar distintos intervalos de aclarado (Schneider et al. 2002). En el transcurso del tiempo el fluido aclarado (mezcla de estiércol líquido y soda alcalina para la estabilización del pH) debe renovarse, para retirar el azufre elemental del sistema; este puede ser utilizado como abono rico en azufre. Este procedimiento también se ha mostrado similar al desazufrado directo en el fermentador, que desencadenan variadas oscilaciones en el tipo de decantación en la producción de gas al igual que oscilaciones en la decantación en el contenido de H<sub>2</sub>S en el biogás. Con los biodepuradores con filtro, dependiendo de una determinada disposición, se pueden lograr concentraciones de sulfuro de hidrógeno menores que 200 ppm. Este proceso de desazufrado presenta sin embargo un costo inflado, por lo que sería adecuado para grandes plantas de biogás. Dado su acoplamiento del fermentador puede ser universalmente instalado.

#### 2.1.16.3 Hidróxido de Hierro para la unión de Sulfuro de Hidrógeno

Tal como descrito, para la degradación del sulfuro de hidrógeno en fermentos fluidos son especialmente adecuadas las uniones basadas en hierro. El hidróxido de hierro o mejor aún el hidróxido de hierro (III) se produce como compuesto adicional en muchos procesos en la preparación del agua de pozo. Muchas empresas de agua que toman agua de pozos profundos deben eliminar el hierro y el manganeso en una de las etapas de preparación del agua. En estos pasos el agua de pozo es aireada, lo que lleva a una oxidación de los iones de Fe(II) a hidróxido de Fe(III) que es café rojizo e insoluble. Esta unión es separada mediante filtración. Los filtros del agua aclarada tienen hidróxido de hierro en una concentración entre 0,5 y 3%. Mediante los procesos siguientes del aclarado mediante capas secas, centrífugas o prensas de filtro por cámaras se obtienen lodos muy ricos en hierro. La inclusión de estos productos de la purificación del agua se produce en lugares determinados basados en una relación de entrega entre la generadora de agua como proveedora y la planta de biogás como consumidora. Lo problemático aquí es que se deben retirar camiones llenos, que deben ser almacenados por el explotador de la planta de biogás de forma adecuada para ser aportados a los sustratos de fermentado.

Como alternativa a esto la empresa "HeGo Biotec GMBH", de Berlin bajo la marca "FerroSorp® DG" ofrece un medio de reacción sobre la base de hidróxido de hierro, el que es incorporado por una gran cantidad de plantas de biogás con mucho éxito para la reducción del sulfuro de hidrógeno presente en el biogás. El contenido de hierro del producto alcanza por lo menos el 40% (en comparación: solución FeCl<sub>2</sub> contiene aproximadamente 8,7 % Fe). La reacción con sulfuro de hidrógeno se produce según las siguientes fórmulas:



En un primer paso bajo un ambiente anaerobio se reduce el hierro (III) a hierro (II). Como asociado a la reacción se observa, entre otros, sulfuro de hidrógeno, lo que llevaría a la formación de azufre elemental. Recién el hierro (II) está en disposición de degradar el sulfuro de hidrógeno formando sulfato de hierro, negro y finamente disperso. Este sulfato de hierro es extraído del bioreactor junto con los restos de fermentado. En el caso de utilización del los restos de fermentado como abono aparece, bajo la influencia de oxígeno sobre la superficie del terreno utilizado, una oxidación del sulfuro de hierro bajo la formación de azufre o sulfato respectivamente, el que puede ser utilizado por las plantas.

La eventual pregunta que se hace respecto de una fijación del fósforo debido a la aparición de hidróxido de hierro puede ser respondida en el sentido que dada la baja cantidad en la dosificación de preparados de hierro en las plantas de biogás y el comportamiento del Fe:P en los restos de fermentado, en la práctica no se observa una carencia en las plantas.

Una especial ventaja de la inclusión de hidróxido de hierro para el desazufrado interno en las plantas de biogás, aparte de la gran eficiencia de los preparados utilizados, especialmente debido a que no es problemática ni peligrosa la manipulación del hidróxido de hierro.

La inclusión de este medio se produce ya sea en algunos de los procesos del fermentado en el pozo de mezclado, en la cual frecuentemente se realiza la degradación anaeróbica debido a la hidrólisis o por la inclusión del medio en el tornillo de material sólido en conjunto con el sustrato, directamente en el fermentador. El hidróxido de hierro tiene un valor de pH de 7 – 8. Por ello no se debe temer por variaciones del valor de pH al ingresar grandes cantidades (grandes concentraciones de sulfuro de hidrogeno).

Una eventual inhibición de los formadores de metano puede ser suspendida. Por la purificación del hidróxido de azufre aparecen disponibles trazas de otros elementos muy mejoradas, en especial en plantas de NawaRo. En dependencia de la necesidad de una planta de biogás, el producto puede ser traído ya sea en sacos, en bolsas grandes, o a granel para ser extraído mediante equipos de transporte de salida desde silos a granel. Resumiendo se puede decir, que para los procesos de degradación anaerobia (en las plantas de biogás) de uniones azufradas tanto orgánicas como inorgánicas del sulfuro de hidrógeno no deseado es posible de eliminarlo ya sea por medios biológicos o por equipos especializados.

Una posibilidad que se presenta como económica para la reducción del contenido de sulfuro de hidrógeno es la dosificación de preparados de hidróxido de hierro. Esto representa una alternativa altamente efectiva, ecológica y también económica frente a otros procesos de desazufrado.

Tabla 15: Resumen respecto de las sales de hierro más utilizadas para desazufrar.

	<b>Cloruro de Hierro (II)</b>	<b>Cloruro de Hierro (III)</b>	<b>Hidróxido de Hierro</b>	<b>Sulfato de Hierro</b>
<b>Fórmula Química</b>	FeCl <sub>2</sub>	FeCl <sub>3</sub>	Fe(OH) <sub>3</sub>	FeSO <sub>4</sub>
<b>Concentración</b>	Solución al 20 % ó al 25 %	Solución al 40 %	-	-
<b>Embalaje</b>	Contenedor de 1000 lt.	Contenedor de 1000 lt	Saco 30 kg 800 kg BigBag	Saco 50 kg
<b>Contenido de Hierro</b>	aprox. 8,7 % hasta 10 %	Aprox. 12,3 %	mínimo 36 %	aprox. 17,6 %
<b>Dosificaciones</b>	Factor 4,1 más alto que hidróxi- do de hierro	Factor 2,9 más alto que hidróxi- do de hierro	0,2 – 1 kg / t sustrato fermentado	Factor 2,1 más alto que hidróxi- do de hierro
<b>Densidad</b>	Aprox. 1,36 kg / litr.	aprox. 1,43 kg / litr.	-	-
<b>Peligrosidad</b>	Peligroso Corrosivo	Peligroso Corrosivo	No peligroso	No peligroso

#### 2.1.16.4 Filtro de Carbón Activado

Otra posibilidad para sacar el sulfuro de hidrógeno del biogás consiste en la inclusión de filtros de carbón activado. Con la introducción de carbones activados especiales es posible sacar el sulfuro de hidrógeno del biogás. La problemática al introducir carbón activado es la generación de altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno que consumen masas de adsorción, lo que lleva a altos costos de producción.

Todos los procesos de desazufado externo son, en conjunto, para sacar el sulfuro de hidrógeno del biogás, cuando éste recién sale de la fase fluida del sustrato. Con ello no se consigue un desazufado externo, los posibles procesos de contención biológicos sobre la base de guardar ya sea el sulfuro de hidrógeno o los restos de trazas de otros en el sustrato.

## 2.2 Técnicas de Medición y Regulación (MRT)

Vistos los tamaños que han ido adquiriendo las plantas, la gran cantidad de distintos sustratos, al igual que la gran significación económica de la producción de biogás como una rama de la producción agrícola, suben las exigencias respecto del control y regulación de las plantas de biogás. Para ello es imprescindible dotar a las plantas con técnicas de medición y regulación. Sin embargo, por parte del empresariado existen aún reservas respecto de invertir en determinados componentes. El daño financiero que se puede producir por una supervisión deficiente en una parte de la planta es, sin embargo, mucho mayor que los costos de implementación de tecnología de medición. Existen datos respecto de la tecnología necesaria y con sentido para plantas de biogás.

Tabla 16: Tecnologías necesarias y con sentido para plantas de biogás.

Magnitud de Medida	Aprovechamiento	Valoración
Dimensiones de los Sustratos	Estimación de los rangos de producción de biogás, estimación de los tiempos de detención, comando de la carga de cámara.	Importante
Paso de los sustratos fluidos/Suspensión de Fermentos	Estimación de los rangos de producción de biogás, estimación de los tiempos de detención, comando de la carga de cámara y de las corrientes de recirculación.	Importante
Toma de corriente de los equipos revolventes	Control de la carga del fermentador (Contenido de TM)	Opcional
Horas de trabajo de los	Estimación de la necesidad de electricidad	Opcional

equipos principales		
Conexión de electricidad de la planta de biogas	Información y minimización de las necesidades propias de electricidad	Importante
Cantidades de calefacción	Información de las necesidades de calor de la planta, eventualmente el potencial de calor para otros usos.	Opcional
Presión de Gas en Fermentador	Regulación de la potencia de motor, seguridad de la sobrepresión	Opcional

<b>Magnitud de Medida</b>	<b>Aprovechamiento</b>	<b>Valoración</b>
Cantidad de Gas	Control de la estabilidad del proceso, regulación de la alimentación, estimación de la calidad del gas.	Importante
Temperatura del Gas	Dependiente de la cantidad de gas	Opcional
Presión del Gas	Dependiente de la cantidad de gas	Opcional
Contenido de Metano en el Biogas	Control de la estabilidad del proceso, estimación del rendimiento del motor (en combinación con la cantidad de gas y producción de electricidad)	Importante
Contenido de Sulfuro de Hidrógeno en el Biogas	Control de la estabilidad del proceso, regulación del desazufrado, protección del motor	Importante
Contenido de Oxígeno en el Biogas	Regulación del desazufrado	Importante
Contenido de Agua en el Biogas	Control de la estabilidad del proceso, regulación de la alimentación; restringido por la inclusión de aire	Eventualmente opcional
Contenido de Anhídrido Carbónico en el Biogas	Control de la estabilidad del proceso, magnitud del control de la plausibilidad de los valores medidos.	opcional

### 2.2.1 Datos de cada uno de los Parámetros de Operación

#### ➤ Cantidad de los sustratos

Para manejar la carga de la sala de podredumbre de una planta de biogás, se debe tomar una cantidad de sustrato de entrada (comparar tabla). Los sustratos sólidos debieran ser para ello pesados al ser ingresados al dispositivo de entrada, eventualmente sobre el mismo dispositivo de entrada. Sólo un registro volumétrico de la cantidad de sustrato sólido es poco precisa y difícilmente se puede asociar con los valores de análisis, dado que la densidad del material en el silo y en la entrada normalmente no es conocida. En caso necesario se puede realizar un pesaje de prueba de las palas cargadoras, el que en todo caso también lleva a imprecisiones relativamente grandes. Los sustratos fluidos son medidos en su cantidad en forma más precisa por un medidor de flujo adecuado durante el bombeo hacia el fermentador. Esto incluye la toma de las corrientes de recirculación. El cálculo de la cantidad de flujo por el tiempo de funcionamiento de la bomba también lleva a imprecisiones. Con la existencia de un pre-contenedor se puede hacer también una determinación de volumen por medio de un sensor de llenado.

Magnitud de Medida	Técnica de Medición	Evaluación
Dimensiones de los Sustratos sólidos	Pesaje en la alimentación: pesa móvil, pesa de carga, sistema de pesaje dinámico en el cargador	Buena precisión, pero con un esfuerzo de trabajo algo grande
	Celdas de pesaje en el equipo de entrada	Buena precisión, es posible alimentar automáticamente
Flujo de los sustratos líquidos desde el pre-contenedor hacia el fermentador	Medidor de flujo inductivo magnético. El flujo es inducido hacia un campo magnético a una tensión proporcionalmente medible	Proceso de alto costo pero muy preciso y prácticamente libre de mantenimiento; las imprecisiones se producen por la formación de ampollas en la corriente del sustrato
	Resultados por medio del tiempo de funcionamiento de la bomba y la cantidad nominal transportada	Procedimiento de bajo costo, pero impreciso, dado que es dependiente de la cantidad de médium ingresada y del desgaste de la bomba

Medición del nivel en el pre-contenedor	Boquilla para la medición de la presión hidrostática de los cables de fluidos	Método relativamente preciso y con un método de poco mantenimiento
	Sonda acústica	Método relativamente preciso y con un método de poco mantenimiento
	Flotador	

➤ **Cantidad de gas**

La cantidad de gas producida y aprovechada otorga información respecto de la estabilidad y eficiencia del proceso de fermentación y entrega conclusiones respecto de la calidad del gas y el rendimiento del BHKW. Sirve también como base de medición para la cantidad de aire a soplar para el desazufrado biológico. Basado en el contenido de humedad y en las características corrosivas el biogás presenta grandes exigencias a la tecnología de medición utilizada (Tabla 13). En la práctica se han acreditado tanto medidores de flujo mecánicos como de masa, los que trabajan sin partes móviles. Finalmente la cantidad de gas medido es llevada hacia el BHKW. Aquí la medición es realizada por medio de un corte transverso del ducto y el nivel de presión más alto al igual que el dato, indican que el gas está listo. Se genera una medición de volumen, así hay disponible en el lugar una compensación de la temperatura para el informe del volumen en norma (eventualmente de la presión). Al medir directamente la corriente de la masa puede calcularse la corriente de volumen normado por medio de la norma de densidad del biogás. Esta es dependiente de la unión del biogás.

**Tabla 17: Tecnología utilizada en la medición de biogás**

Magnitud de Medida	Técnica de Medición	Evaluación
Volumen de Gas acumulativo	Contador de gas por compresor rotativo volumétrico: La motorización del compresor se realiza por llenado/vaciado de las cámaras.	No conveniente para biogás, sólo muy condicionado: no es preciso en las extensiones de entrada y salida
	Contador de gas por greñas: deformación mecánica de las membranas de la cámara.	No conveniente para biogás, sólo muy condicionado: no es preciso en las extensiones de entrada y salida
	Contador por ruedas de turbinas:	No es conveniente para

	mide la velocidad del flujo a través de las ruedas de las turbinas	biogás debido a la corrosión, requiere mucho mantenimiento (Lubricación); preciso en la entrada y salida
Volumen del Flujo	Medición del paso del flujo por remolino: se mide la frecuencia de remolino detrás de un cuerpo atascado ("Kármánsche Wirbelstraße")	Tremendamente caro; no tiene parte móviles, no hay desgaste, libre de mantenimiento; gran precisión; es posible la compensación de temperatura integrada (eventualmente también presión) Extensión de entrada larga.
	Medidor de flujo estriado: frecuencia del movimiento de rotación después de un cuerpo de entrada semejante a una turbina	Tremendamente caro; no tiene parte móviles, no hay desgaste, libre de mantenimiento; gran precisión; es posible la compensación de temperatura integrada (eventualmente también presión) Extensión de entrada corta.
	Medidor de flujo por diferencia de presión: Diferencia de presión por modificación de la velocidad de flujo en un cuerpo atascado (atascamiento de la energía en cañerías cerradas)	Relativamente caro; pérdida de presión; no tiene partes móviles, poco mantenimiento
	Medición de flujo por cuerpo inclinado: medición de la altura de un cuerpo inclinado vertical móvil en una extensión por la que atraviesa el flujo	Resultado de la medición dependiente de la densidad; es instalado no para biogás sino que para la medición del aire para el desazufrado

Magnitud de Medida	Técnica de Medición	Evaluación
Dimensión de la corriente	Contador de gas por compresor rotativo volumétrico: La motorización del compresor se realiza por llenado/vaciado de las cámaras.	Tremendamente caro; no tiene parte móviles, no hay desgaste, poco mantenimiento; gran precisión; Extensión de entrada larga.
	Contador de gas por greñas: de-	Tremendamente caro;

	formación mecánica de las membranas de la cámara.	gran precisión; No es necesaria Extensión de entrada y salida
--	---	---

➤ **Análisis de gas**

La medición del conjunto de gases entrega información respecto de la estabilidad del proceso de fermentado y posibilita, en combinación con los datos de cantidad de gas, un informe de eficiencia de la transformación del Gas en BHKW. Los valores importantes aquí son contenido de Metano ( $CH_4$ ), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). El contenido de metano en el biogás determina su contenido de energía y es un muy buen indicador de la condición del proceso de fermentación. La medición del sulfuro de hidrógeno es el control de los procedimientos de desazufado y es muy importante para la controlar la eficacia de los motores. Con el contenido de oxígeno se regula el desazufado biológico mediante el paso de aire. En forma opcional también se puede medir el contenido de hidrógeno ( $H_2$ ) en el biogás, el que es un buen indicador para el grado de carga de la biología del fermentador. Sobre todo el valor de medición se ve desvirtuado con la inclusión de aire en el desazufado biológico. La medición del contenido de Anhídrido Carbónico ( $CO_2$ ) puede ser opcional para la prueba de plausibilidad.

En el intertanto son ofrecidos por parte de muchos fabricantes sistemas técnicamente mejorados para los análisis de biogás. Para medición de contenidos de metano y anhídrido carbónico se han instalado sensores infra-rojos o térmicos. El sulfuro de hidrógeno, el oxígeno y el hidrógeno son medidos con sensores electro-químicos. Los sistemas automáticos de medición de gases son aún muy costosos, sin embargo posibilitan un control continuo de la calidad del gas y, en algunos casos es posible enclavarlos con los sistemas de seguimiento de procesos.

➤ **Determinación de los valores de ph**

El valor de pH es un valor muy fácil de medir para verificar el estado del proceso de fermentación. Con valores de  $pH < 6,5$  existe el peligro de una acidificación del proceso.

Especialmente en las mezclas de fermentado con alta capacidad de tampón (excremento de ganado vacuno como sustrato) se produce un desplazamiento de los valores de pH con un claro retardo, con lo que la acidificación inicial no es reconocida a tiempo.

El valor de pH solo no es un parámetro adecuado para el control de la estabilidad del proceso en plantas de biogás con desechos agrícolas.

Aun con el estado actual de la técnica de purificación de aguas de desecho, esto no es suficiente hasta ahora en las plantas de biogás, dado que no es posible medir continuamente el valor de pH en el fermentador, lo que no es posible de hacer desde el punto de vista de la recopilación de datos de los sensores respecto de la mezcla de fermentado. En la práctica es en general suficiente medir el valor de pH regularmente mediante la toma de muestra de material fresco mediante un aparato electrónico o por medio de cintas medidoras de pH, con una resolución especialmente buena en medio neutro.

➤ **Regulación de temperatura**

Los fermentadores de plantas de biogás de productos agrícolas son calefaccionado por medio de agua caliente. El agua del circuito de calefacción es pasada sobre agua fría y un intercambiador de calor por el escape del BHKW y así calefaccionada. El comando de la temperatura del fermentador es regulado mediante sistemas de medición y regulación muy baratos, tales como los de los hogares, los que se disponen según una regla exacta. Para obtener una visión respecto del consumo de calor de la planta al igual que para otras necesidades, se pueden instalar contadores de cantidad de calor en los distintos circuitos de calefacción.

➤ **Consumo de Fuel Oil**

Si el biogás es quemado en un motor, que necesita una combustión de apoyo, en ese caso se justifica un control de la cantidad de fuel oil consumido. El consumo de fuel oil debiera ser, por razones ambientales y protección climática, en lo posible mantenerse bajo. El fuel oil es responsable de las emisiones particuladas (hollín) de la chispa del BHKW, las que con el quemado del biogás limpio prácticamente no aparecen. El consumo de fuel oil debiera ser un complemento para el indicador de nivel en el estanque de fuel oil y capturado con un sensor de flujo de aceite caliente (ver también Cáp. 2.2.2.2.6).

➤ **Producción y consumo de energía**

Una vez que el producto valorado a cumplido todo el proceso, se debe medir la energía producida. Para ello sirven los contadores de corriente con suficiente dimensionamiento, tal como los que hay disponibles para el uso en el hogar. Generalmente se mide la corriente entregada por del BHKW al igual que la que alimenta la red pública. Si se toma la energía necesaria para el funcionamiento de la planta de biogás desde la red pública, entonces debe instalarse un medidor separado para el consumo de la planta, para poder llevar la estadística de la necesidad propia de energía. En este caso se obtiene como resultado por la resta de la energía neta que se entrega a la red y la energía que se utiliza para el consumo propio de la planta de biogás.

La medición de la toma de corriente permite sacar conclusiones respecto de la carga de los revolvedores en dependencia del contenido de masa seca de la mezcla de fermento. Estos equipos medidores son ahora, por lo general, parte de los sistemas de control de proceso. Para evitar puntas de potencia caras, los tiempos de funcionamiento de los principales consumidores de corriente de la planta debieran ser fijados correlativamente, esto quiere decir, por ejemplo, fijar un cambiador de tiempo para el funcionamiento de los revolvedores en distintos estanques de fermento.

## **2.3 Posibilidades de utilización de Calor**

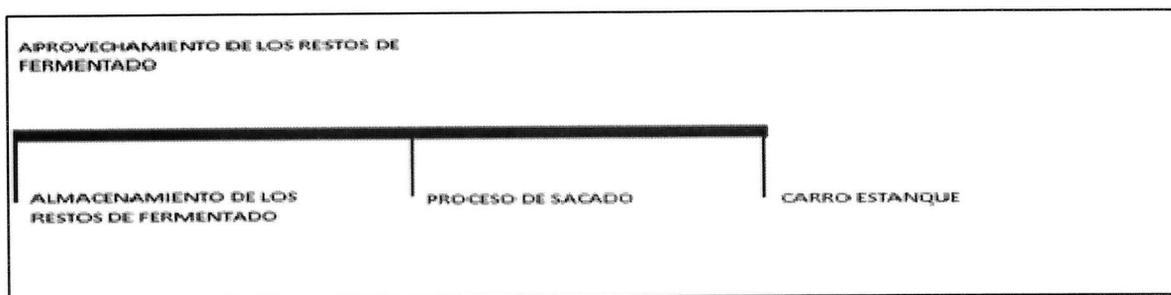
Una mirada a las principales opciones industriales que pueden realizarse

- Plantas de secado
- Calefacción de invernaderos
- Cultivos acuáticos
- Transporte de calor latente
- Generación de frío
- Preparación térmica de los restos fermentados
- Entrega de calor para lavanderías
- Producción de jugos de frutas y verduras
- Valorización de la leche

## 2.4 Aprovechamiento de los restos de fermentado

El aprovechamiento de los restos de fermentado involucra el ámbito del almacenaje, inclusive el aspecto de las capacidades de almacenamiento y medidas respecto de la disminución de las emisiones, como de repartir el abono para abonar plantas.

Ilustración 39: Esquema aprovechamiento de los restos de fermentado.



### 2.4.1 Almacenamiento de los restos de fermentado

Los desechos de fermentado desde una planta de biogás contienen microorganismos que generan metano, los que también en contenedores no calefaccionados – aunque fuertemente enlentecidos – realizan la degradación las sustancias orgánicas restantes y enlazado con ello provocan una liberación de biogás. Cuando no se produce la suficiente pudrición de los restos de fermentado en un contenedor abierto lleva a una pérdida relevante de biogás utilizable, Metano. Contrariamente, el alto contenido de amonio – nitrógeno en estiércol líquido no manejado implica también altas emisiones de amoniaco en almacenamiento abierto.

El contenedor de restos de fermentado puede ser construido como un contenedor enterrado (abierto o con una cubierta móvil) o elevado – eventualmente en forma cilíndrica. Aquí rigen los mismos ordenamientos que para los contenedores de estiércol líquido, es decir, los contenedores deben ser sólidos y deben cumplir con las indicaciones estatales (ver Cáp. 2). El resto de fermentado debe fluir libremente hacia el contenedor con una inclinación libre. Un desborde del contenedor se debe evitar mediante medidas técnico-constructivas.

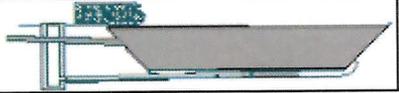
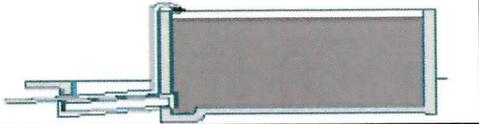
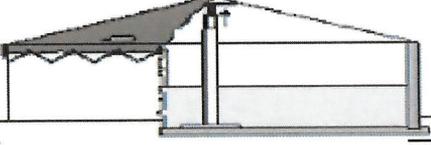
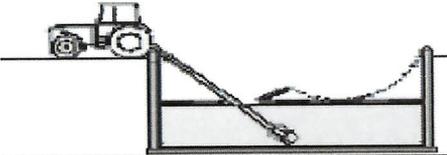
El contenedor debiera disponer de un revolvedor, para homogenizar el contenido antes de la entrada. Aquí podrían instalarse, dependiendo del tipo de construcción del contenedor, mezcladores de árbol en la pared del contenedor, revolvedores propulsados en el borde del contenedor o apoyo central o boquerales.

Para revolver y por la formación de olas, es básico considerar en el cálculo un borde suficiente (mínimo 20 cm). Dado que el estiércol tiene una consistencia fluida, se produce, especialmente en comparación con el estiércol líquido de vacunos, un rápido mezclado de los remanentes sólidos. En contenedores sin una cubierta fuede, se debe tener en cuenta el agua condensada en el cálculo de la capacidad del contenedor (ver Cáp. 2). Especialmente fuerte es el superávit de condensado en invierno, cuando al mismo tiempo existe la mayor capacidad de almacenamiento. Aparte de los factores meteorológicos y los indicadores de nivel en la disposición del estiércol en el diámetro de los contenedores influyen las emisiones en el almacenamiento abierto.

Existe la tendencia al aumento de las emisiones mientras más grande sea el diámetro del contenedor y disminución del borde libre. Las capas flotantes artificiales de paja u otros materiales livianos llevan a una disminución de las emisiones de amoniaco en los contenedores abiertos, pueden, eso si, incrementar las emisiones de metano y gas hilarante. Para una suficiente homogenización del fermentado, antes de la extracción deben removerse las capas flotantes. Como materiales livianos se integra perlita o bolitas de pluma- vit; por ello, en el intertanto también se ofrecen elementos flotantes como plástico regenerado, los restos de fermentado principalmente con baja formación de capas flotantes entregan un buen resultado en la disminución de los olores y con ello a una disminución en la emisión del amoniaco. Bolitas de poliestireno expandido o placas de espuma dura flotantes no son recomendables. La disminución general de la emisión lleva a la baja del valor del pH del fermento. Las cubiertas de folios flotantes (“cubiertas simples” según VDI 3471) bajan las emisiones de cada uno de los gases mencionados. En su instalación debiera garantizarse que el agua precipitada sea eliminada, el gas de fermentación que se forma sea aprovechado y que el folio en las paredes del contenedor esté ajustado. Para “contenedores cerrados”, en el sentido de VDI 3471 se colocan techos tipo carpa, techos fijos de placas de fibrocemento o construcción de techo plástico reforzado con fibra de vidrio (GFK) o techos de concreto armado. Los materiales utilizados deben ser resistentes a los embates climáticos y estables a la radiación UV y debido a los componentes agresivos del biogás que se forman debajo de la tapa, también debe ser resistente a la corrosión. Si se conecta la sala de gas al sistema de gas de la planta de biogás, se puede atrapar el biogás y ser aprovechado.

Los techos tipo carpa pueden estar colgados (planos cónicos truncados), con apoyos pendulares o con construcción desde abajo (con o sin soporte medio). Los techos con una construcción desde abajo firme fatigan menos los planos, sin embargo producen una mayor carga sobre la pared del contenedor. Las tapas en forma de segmentos son fabricadas en plástico reforzado con fibra de vidrio, acero o concreto, con o sin soporte medio. En contenedores con tapas no flexibles tiene que tenerse en cuenta que para sacar el fermentado debe existir una igualación de la presión. En la tabla se pueden ver distintos tipos de tapas. Los datos fueron obtenidos del almacenamiento comercial de abonos.

**Tabla 18: Tapas para los contenedores de estiércol líquido (Reducción de emisiones de amoníaco) y costos específicos (modificados según KTBL, 2005)**

Contenedor y Tapas		Reducción Emisión Amoníaco		Costos para contenedores de almacenamiento (€/m <sup>3</sup> ), eventualmente tapa (€/m <sup>3</sup> )	
		Vacunos	Cerdos	Inversión	Costos Anuales
	Cubeta abierta sobre tierra 6)			1) 18-24	
	Contenedor abierto (Concreto o Acero)			1) 24 - 52	
	Cubierta (Techo, Techo tipo carpa, Folio)	85 - 95	85 - 95	50	2) 5,3
	Tapa de paja molida	70 - 90	70 - 90		3) <1
	Granulado (ej. Perlita)	k.A.	k.A.	11	4) 2,5
	Elementos flotantes	no es posible	90 - 98	35	5) 3,2
	Folio Flotante	80 - 90	80 - 90	38	4) ,3

1) Entrada: Diámetro 15 m; 2) Tiempo de Duración: 15 años; 3) Tiempo de duración: 0,5 años; 4) Tiempo de Duración: 10 años  
5) Tiempo de Duración: 20 años; 6) Altos costos constructivos y técnicos debido a tapa y aprovechamiento de gases residuales

#### **2.4.2 Procedimiento de distribución**

Para la distribución de los desechos de fermentado tanto líquidos como sólidos básicamente se utilizan las mismas soluciones técnicas que para la distribución de estiércol líquido o sólido. Los desechos sólidos de sustratos fuertemente estructurados de la llamada "Fermentación Seca" prácticamente no llegan. Para la elección de la adecuada técnica de distribución de desechos líquidos se debe tener presente la modificación de las características del estiércol líquido (especialmente por sus altos contenidos de amonio-nitrógeno, bajo contenido de sustancias secas, prácticamente consistencia de agua).

Después de la extracción de los abonos, los equipos para la extracción de los mismos deben cumplir con todas las regulaciones reconocidas y se debe realizar una medición de la cantidad tanto por distribución como para garantizar una extracción sin muchas pérdidas. La meta para un abonado con abonos orgánicos debe producirse mediante la adecuada combinación de camiones estanque, repartidores dosificadores en el ancho y sistema de regulación para la distribución en la extensión (ver más abajo).

El procedimiento más frecuente es la extracción continua durante el retiro de los restos de fermentado desde el contenedor, el transporte hacia la superficie y el retiro con el mismo camión estanque. Para el retiro de los decantados se carga el estiércol líquido/resto de fermentado hacia un carro estanque o hacia un contenedor para almacenamiento intermedio y desde ahí es cargado hacia el vehículo que lo saca del lugar. Lo que sucede con las grandes superficies utilizadas involucran un creciente esfuerzo de material y de personal. Otra posibilidad para el retiro comercial es llevar los restos del fermentado mediante mangueras/cañerías. Este procedimiento es el más adecuado para el suelo, produce un retiro regulado aunque implica un incremento en los costos.

##### **Carro Estanque**

En la práctica en lo sustancial se instalan carros estanque tipo bombas y compresores. Mediante el compresor se produce una descompresión para el llenado del carro y una sobrepresión para que se produzca la salida.

Los carros repartidores con presión tienen bajos costos de adquisición y el sustrato es continuamente revuelto durante el retiro; una autocarga no es posible.

Los carros con bombas tienen en comparación los más altos costos, pero por otro lado son auto-cargables y basado en la no dependencia de los volúmenes de flujo debidos al nivel del estanque son los más adecuados para el retiro de los materiales.

Los carro repartidores por presión o por compresor también son adecuados pero con ciertas limitaciones

Ya no cumplen con las regulaciones generales conocidas los carros centrifugadores, al igual que tampoco los carros de estiércol con una placa centrífuga atravesada o con repartidor central de rechazo, con los cuales el estiércol sale disparado hacia arriba.

### **Distribución Transversal y a lo Largo**

Es determinante para la distribución transversal de los restos de fermentado en su retiro el sistema distribuidor seleccionado. Para diferenciar, están los llamados distribuidores anchos (cabezales con latas centrífugas, toberas giratorias, viga de toberas, etc.) y distribuidores con forma de banda, tales como mangueras arrastradas (especialmente para cultivos verticales hechos con arado) o mangueras con zapatas distribuidoras (especialmente para campo verde) o equipos de iniciación (inyectores para campo arado, tubo ranurado para campo verde).

La regulación de la distribución a lo largo puede producirse por la velocidad de avance del equipo, el volumen del flujo o por medio de la bomba.; últimamente sólo es posible de realizar mediante carros estanque con bomba. Otras posibilidades se dan con la inclusión de tecnología GPS en la llamada distribución en superficies parciales.

Adicional a la desventaja de la imprecisión en la dosificación los distribuidores anchos para la distribución de restos de fermentado son menos adecuados ya que ellos llevan a incrementar las emisiones de amoníaco. El peligro de ensuciar el forraje es menor en la distribución a lo ancho debido a que su consistencia es menos acuosa que en la distribución de estiércol líquido. En clima cálido y seco los restos de fermentado con su alto contenido de sal llevan a daños por quemadura en las praderas y por ello debe ser diluido con agua.

La distribución de los restos de fermentado con distribuidores exactos posibilita la disminución de las emisiones y un mejor aprovechamiento de las plantas. Los restos de fermentos más fluidos en lo principal no dan problemas de atascamientos con este tipo de distribución, tal como informado en la práctica que sucede con la distribución de estiércol líquido sin manejo. Una información cualitativa respecto de los distintos sistemas de distribución es mostrada en la Tabla 19. Los costos para la distribución son dependientes de una gran cantidad de factores por lo que en la práctica pueden bajar fuertemente. Sobre la base de amplios estudios realizados en Europa se estimaron diferencias de costos con la inclusión del distribuidor exacto comparado con el distribuidor ancho en 2€ por m<sup>3</sup> (en 1000-3000 m<sup>3</sup> de volumen distribuido al año), donde los mayores costos disminuyen su tendencia cuando aumenta el tamaño de la planta.

Tabla 19: Distribución de los restos fermentados.

Criterios de Calificación	Distribuidor / Calificación			
	Distribuidor Ancho	Distribuidor por manguera reptante	Distribuidor por zapata reptante	Inyectores/Equipos deslizantes
<b>Aspectos Técnicos</b>				
Peligro de atasco	++++	+++	+++	+++
Sensible a vientos laterales	++	++++	++++	++++
Conexión	++	++++	++++	++++
Ancho de trabajo	++++	++++	+++	++
Consumo de Potencia de Tracción	++++	++++	+++	+
Adecuado para Tránsito por carretera	++++	+++	+++	+++
<b>Aspectos Ambientales y de Abono</b>				
Lavado de Nitratos	+++	++++	++++	++
Inclusión de Compuesto Aromático	+	++	+++	++++
Liberación de Amoniaco	+	++	+++	++++
Desague de superficies	+	++	+++	++++
Precisión de Distribución	++	++++	++++	++++
Efecto de Abono	++	+++	++++	++++
<b>Aspectos Especiales de Pradera</b>				
Contaminación de Forraje	+	++	+++	++++
Daños por Defloración	+++	++	++	+
Daños por Corrosión	+	++	+++	+++
Daños por huellas de transportes	+++	+++	+++	++
<b>Costos</b>				
Necesidad de Inversión	++++	++	+	+
Costos por cada m3 de Resto de Fermentado	++++	+++	++	+
+ : poca información hasta ++++: mucha información				

### 2.4.3 Preparación Térmica de los restos fermentados.

Para el empresario o planificador de una planta de biogás su meta es en lo posible la optimización de la productividad de la misma (aparte de otras metas, como por ejemplo el incremento de la seguridad del proceso). Para incrementar la productividad también se puede incluir la preparación de los restos de fermentado. Desde la base que en muchos casos son pocas las posibilidades de aprovechar el calor producido en el proceso de las plantas de biogas, aparece como interesante la preparación térmica de los restos de fermentado. La productividad de la planta de biogás puede incrementarse por medio de la preparación de los restos de fermentado, donde por la preparación se puede:

- Producir productos idóneos para el mercado con un buen valor, o
- La reducción de los costos de transporte o almacenamiento por el aprovechamiento de los restos de fermentado

Combinaciones de estas posibilidades para el incremento de la productividad son también posibles. Una mirada respecto de los posibles procesos para la preparación de los restos de fermentado

Cada uno de los procesos no sólo se diferencia por sus principios de funcionamiento, sino que también desde el punto de vista de los productos que de ellos se obtienen. Una primera posibilidad de diferencia (además de la diferencia del principio de su función) se compone de si hay una preparación parcial o completa. De una preparación completa se dice que si como uno de los productos se puede obtener agua limpia libre de nutrientes y sólidos (Hüttner und Weiland 1997). Los distintos procesos también se pueden diferenciar en relación a la composición de las corrientes de masas - nutrientes y sustancias secas.

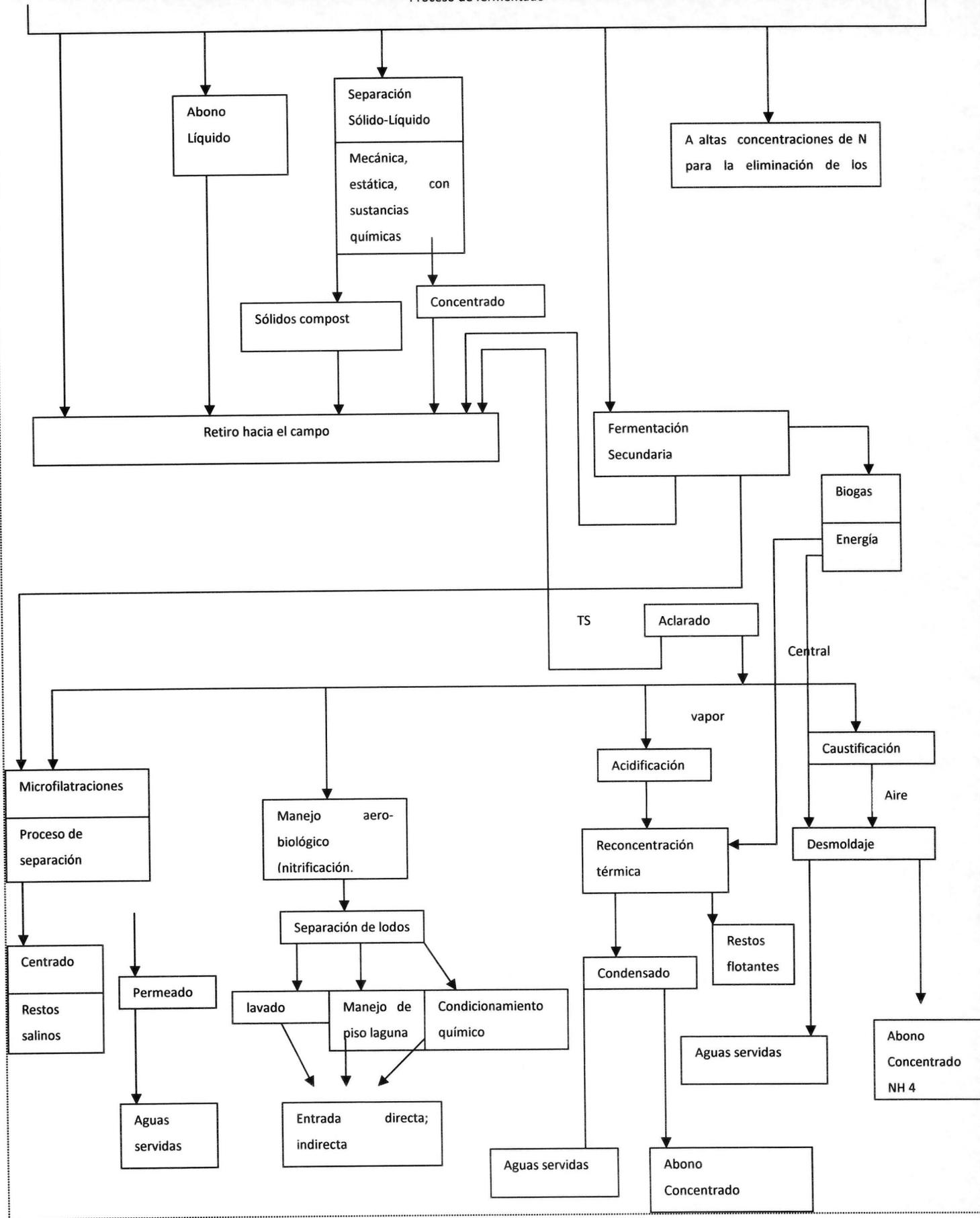


Ilustración 40: Posibles procesos de la preparación de los restos de fermentado (LANGHANS 2003)

➤ **Preparación mediante degradación de amoniaco**

Una posibilidad de la preparación térmica de los restos de fermentado es la degradación del amoniaco desde los restos. Este procedimiento de la preparación fue probado en muchas plantas piloto en los años 90 en Alemania, en el marco de un programa de investigación federal para la preparación de estiércol líquido (Hüttner y Weiland 1997; Jäger 1997). Las plantas piloto investigadas se diferencian entre sí por algunos detalles, como por ejemplo la exacta composición de los restos de fermentado, el rendimiento, la necesidad de energía, etc.

➤ **Preparación por medio de Concentración Térmica**

Otra posibilidad de la preparación térmica es la concentración térmica (vaporización) de los restos de fermentado. También este procedimiento fue probado en el marco de plantas piloto y científicamente valorado (Hassan y Weiland 2006). En una primera mirada se origina una similitud para la extracción del amoniaco, especialmente visto desde el punto

de vista de la tecnología de la planta, sin embargo, los dos procedimientos persiguen metas de preparación totalmente distintas y también se diferencian en sus principios de funcionamiento.

➤ **Valoración de la Preparación Térmica de los Restos de Fermentado**

Por esto el proceso de preparación con eliminación del amoniaco está en el límite de la productividad en uno de los ejemplos y es remarcado por problemas técnicos del proceso. Aquí hay que agregar que este proceso no posibilita una preparación completa y no presenta ventajas en la solución para la eliminación de los remanentes de fósforo y potasio. Especialmente la separación del fósforo del resto de fermentado se puede lograr mediante una separación mecánica bastante barata. También se debe ser escéptico en la comercialización de los productos de la preparación por motivo de la valoración adicional. Por estos distintos motivos aparece como no sustentable la realización de estos procesos de preparación. Algo distinta se presenta la situación para la preparación mediante la sobre-concentración térmica. Este proceso es también dependiente del Bono KWK para su productividad, aunque este procedimiento no está cargado de problemas técnicos básicos, pero aún se debe contar con “enfermedades de niños”.

Este proceso es técnicamente pretencioso y presenta determinadas exigencias en el manejo de la planta. Como proceso completo de preparación puede presentar algunas ventajas especialmente para plantas NaWaRo. Sin embargo, por costos, son utilizables sólo en grandes plantas (Heidler 2006). Heidler (2006) menciona que el tamaño razonablemente mejor sería desde 1 MWel. Dada la alta necesidad de energía calórica para la vaporización el proceso tiene una alta demanda de TS y con ello un alto contenido de energía del sustrato. Es especialmente importante valorar esto, dado que la necesidad energética influye igualmente en dos puntos importantes de los costos del proceso de preparación, es decir sobre el bono de dependencia eléctrica KWK, al igual que sobre la cuota de vaporización, lo que eleva los costos del concentrado, y por ello la comercialización.

La investigación sin embargo también ha mostrado que no es posible entregar una sentencia, esto debido a que hay demasiadas condiciones de borde que determinan la productividad. Por ello es aún necesario realizar una prueba detallada en cada caso, especialmente en cuanto a los costos de la logística en el lugar, como también para la distribución en terreno y también para los transportes de retiro tienen una influencia determinante.

A propósito de la valorización adicional por la comercialización de los productos de la preparación en este punto es difícil. La venta de abonos concentrados en comparación con los abonos minerales es que los primeros tienen menores concentraciones de nutrientes y con ello altos costos de salida.

Los sólidos obtenidos por la separación mecánica no son comerciables sin un tratamiento posterior. Una posibilidad del tratamiento posterior de los sólidos la ofrece la compostación aeróbica. Dado que esta no está ligada al proceso térmico y por ello tampoco a una producción de una preparación térmica, esta posibilidad no se siguió investigando. Si la valorización estuviera dada por la comercialización de los sólidos, en ese caso la compostación sería una posibilidad interesante. Sin embargo es en combinación con una preparación de los restos de fermentados netamente mecánica cuando sería radicalmente más barata de realizar. Se deben investigar aún otras alternativas de preparación individualmente para decidir a favor o en contra de una preparación térmica. Dado que también las metas de preparación para plantas concretas en forma individual pueden ser distintas, es válido encontrar el procedimiento más barato para lograr la meta deseada de la preparación. Así por ejemplo, el fósforo resultaría más barato sacarlo en forma netamente mecánica. Como alternativa a una preparación térmica completa sería además la ultrafiltración y la osmosis inversa, que en el intertanto también fueron utilizadas en las primeras plantas (top agrar 2005).<sup>15</sup>

### ➤ Granulación de Estiércol Líquido

El estiércol se genera como desecho animal en la crianza de vacunos, cerdos y aves y frecuentemente es transformado, dado su alto contenido de nutrientes, en abono para superficies agrícolas.

Para muchos predios de engorda esto es siempre un problema frecuente, ya que no tienen suficiente superficie para la eliminación del estiércol producido. Los remanentes de estiércol llevan, entre otros, a un incremento de la carga de nitrógeno de las aguas subterráneas, con lo que se elevan los costos de la preparación del agua potable.

Realizar una preparación y valoración del estiércol disminuye la situación de los nutrientes y la utilización agrícola se hace impensable. Además, se ofrece la posibilidad de tener la problemática de llegar a fortalecer una gran concentración de vacunos. Una mayor preparación de estiércol es en este momento de alto costo. La meta es, estabilizar la valoración y preparación.

---

<sup>15</sup> Bremer Energie Institut: „Leitfaden Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ capítulo 9

En el estiércol además de los elementos orgánicos, que puede hacerlo valorizar desde el punto de vista energético, contienen especialmente uniones de nitrógeno y fósforo, que pueden ser utilizadas tanto en la industria de los abonos o en la química.

➤ **Procesos para la preparación y valoración**

El estiércol como una mezcla de alta concentración de varios componentes presenta en su manejo altas exigencias en la tecnología del proceso. Para una buena preparación es indispensable la inclusión de combinaciones de procedimientos. Procedimientos convencionales de preparación son en general mecánicos, biológicos y químicos. El primer paso es la separación mecánica de la fracción sólida mediante separadores de estiércol. Los sólidos pueden ser compostados y utilizado como abono inodoro.

Luego viene la etapa biológica como combinación de desnitrificación y nitrificación. Un alto grado de rendimiento de la eliminación del nitrógeno se logra sólo mediante un proceso desarrollado especialmente para ser utilizado en el estiércol.

En dependencia de los valores de desagüe, se introduce un procedimiento adicional de oxidación química, para la reducción de los compuestos que no se descomponen biológicamente. La desventaja de este proceso de preparación convencional es que los nutrientes después de las etapas biológicas ya no sirven como abono para las plantas, las uniones de nitrógeno son, por ejemplo liberadas como nitrógeno elemental en forma de gas. En los nuevos conceptos de solución se plantea la preparación posterior del estiércol mediante la tecnología de membrana (UFI 2006).

Luego se realiza nuevamente una limpieza mecánica para la contención de sólidos gruesos. La retención de los sólidos finos se produce mediante micro-filtración, eventualmente ultrafiltración y la eliminación de los contenidos diluidos y iones mediante el proceso de osmosis inversa. El colado sirve como agua útil y los concentrados ricos en nutrientes como abono. En este momento falta todavía realizar pruebas más largas en el tiempo con esa técnica de preparación. Los costos netos de la preparación total del estiércol son todavía muy altos. En la producción limpia de cerdos los costos específicos por la preparación por partes, sin eliminación del potasio, pueden bajarse significativamente (FAL 2006).

El manejo de estiércol de cerdos y vacunos posee por causas ecológicas y económico una gran significación. La utilización del estiércol para la producción de energía por la fermentación anaeróbica en plantas de biogás se ha ampliado significativamente. El aprovechamiento del biogás se aumenta con la inclusión de sustratos del fermentado ricos en energía. Junto con ello está el recurso de la preparación de los restos de fermentado de estas plantas, pero recién en el inicio. La meta es la completa preparación económica de los restos de fermentado de la agricultura. En esta preparación se produce la separación de los sólidos contenidos en el estiércol y los nutrientes para un abono higiénico y de alto valor de larga duración.

Determinados nutrientes importantes para las plantas quedan después del proceso de fermentado, los nutrientes resultantes de la descomposición de las sustancias orgánicas son mineralizados y con ello se incrementa la disponibilidad para las plantas.

El agua contenida en el estiércol es preparada por la técnica de membrana (ultrafiltración y osmosis inversa), de tal forma que pueda ser vaciada a las aguas superficiales sin contenidos nutrientes.

Con ello se lograría un completo proceso en cadena con la valoración del estiércol y la preparación (IMB 2006, Swissfarmpower 2006). Este camino hacia la valoración del estiércol y preparación en las plantas de biogás debiera ser potenciado bajo los requerimientos de cada lugar.

### 3 Identificación de dificultades técnicas de extracción, manipulación y transporte



Ilustración 41 Fotografía lechería y patio de espera de una lechería

Las lecherías y ganaderías de las regiones del sur de Chile mayormente operan sus ganados en un sistema que permite que estén el tiempo máximo posible en el pastoreo. Los animales para la producción de carne se encuentran hasta un 100 % del tiempo al aire libre. Las vacas de leche en varios casos se encuentran en establos pero en otros casos, en cuando existe suficiente pastoreo alrededor de la lechería, los animales se encuentran en el pastoreo y vuelven a la lechería dos veces a l día para la ordeña. En este caso existe un patio de espera en donde se acumulan los residuos durante aprox. dos horas, dos veces al día. Durante el proceso de ordeña los animales se alimentan con productos adicionales para completar su dieta de pasto. Como la producción de los purines ocurre mayormente durante y después del tiempo de alimentación, la producción de purines no es distribuida pareja durante las horas del día. Análisis específicos en los diferentes casos y la experiencia de los agricultores pueden dar un porcentaje de los purines que pueden ser obtenidos en el patio de ordeña. Los purines de los animales en el pastoreo son más difíciles a obtener. Una posibilidad podría ser la instalación de un área de recepción frente de abrevadero que se encuentra cerca de los animales y en donde se acumula el residuo.

**Ilustración 42: Fotografía de lechería con vacas estabuladas**



En algunas lecherías muy grandes se obtiene los ganados en establos en donde sería mas fácil de recuperar los residuos. En muchos casos estos son mezclados con paja de la cama de los animales. En otros casos se ocupa aserrín para la paja. Como la paja y el aserrín contienen lignina y no se descomponen fácilmente en el proceso de mecanización hay que calcular los volúmenes adicionales para el uso en el fermentador.

En un caso se había cambiado la forma de establecer los animales para optimizar la obtención de los residuos. Este proceso requiere la inversión en establos adicionales y sistemas de colección.

**Ilustración 43: Fotografía establos generados para la mejor obtención de purines**



Para la calculación de la cantidad de los residuos hay que considerar el área de alimentación, el tipo de producción a la cual pertenecen los animales (lechería, ganadería etc.), el tipo de vaca (como no todos los tipos producen la misma cantidad de residuos).

## 4 Identificación de los tratamientos actuales de gestión de residuos agrícolas y ganaderos

El tratamiento actual de los residuos agrícolas y de ganaderos depende de la situación de cada granja. Por general los residuos de la ganadería se colectan en pozos y se los distribuyen en los campos. En las granjas pequeñas y medianas muchas veces no existe un sistema organizada de gestión para el aprovechamiento de los nutrientes de los purines. La forma del tratamiento aparece mas a una deposición y puede causar problemas con la infiltración de las nutrientes a las napas o ríos cercas de las granjas. En varios casos no existe un sistema de seguridad para el caso de que el poso se llena.

Ilustración 44: Fotografías de ejemplos de sistemas de recepción de residuos líquidos de lecherías.



Los residuos sólidos generalmente se dejan a comportar o secar en el campo, que también puede generar efluentes incontroladas.

Ilustración 45. Fotografía de ejemplos de residuos sólidos.

