

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL
DESARROLLO DE UNA INSTALACIÓN TERMOELÉCTRICA DE
160 KW MEDIANTE LA COMBUSTIÓN DE BIOGÁS PARA LA
HACIENDA “TARRAGONA”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

ANDRÉS ALEJANDRO GALLARDO OCAMPO

JORGE ESTEBAN RIOFRÍO ANDRADE

DIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA

CODIRECTOR: ING. FREDDY ORDÓÑEZ

Sangolquí, 2010-05

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto titulado “FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL DESARROLLO DE UNA INSTALACIÓN TERMOELÉCTRICA DE 160 KW MEDIANTE LA COMBUSTIÓN DE BIOGÁS PARA LA HACIENDA TARRAGONA”, realizado por Andrés Alejandro Gallardo Ocampo y Jorge Esteban Riofrío Andrade, ha sido guiado, revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército. El proyecto ha sido realizado como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Guasumba
DIRECTOR

Ing. Freddy Ordóñez
CODIRECTOR

Sangolquí, 2010-05-05

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL DESARROLLO DE
UNA INSTALACIÓN TERMOELÉCTRICA DE 160 KW MEDIANTE LA
COMBUSTIÓN DE BIOGÁS PARA LA HACIENDA TARRAGONA”**

ELABORADO POR:

Andrés A. Gallardo O.
C.I. 171086963-5

Jorge E. Riofrío A.
C.I. 1712196086

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Emilio Tumipamba

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sangolquí, 2010-05

DEDICATORIA

Dedico el proyecto a Dios y a mis padres que con su apoyo y cariño me han ayudado a concretar una de mis metas académicas.

Andrés Alejandro Gallardo Ocampo

Dedico el proyecto a mis padres que han sido eje fundamental en mi desarrollo tanto académico como personal. A mi familia en general, ñaños del alma.

Jorge Esteban Riofrío Andrade

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el desarrollo del proyecto a Dios, por su amor incondicional. A mis padres por su apoyo y cariño constante en todos mis logros y fracasos. Al Director y Codirector del presente proyecto, Ing. José Guasumba e Ing. Freddy Ordóñez respectivamente, por su tiempo, valores y conocimientos impartidos. A mi hermano y amigos que estuvieron conmigo a lo largo de mi carrera.

Andrés Alejandro Gallardo Ocampo

Agradezco a mis padres por su apoyo y comprensión en todos mis proyectos e ideales. A los maestros que me han enseñado su conocimiento para lograr las metas establecidas. Agradezco al Director y Codirector del presente proyecto, Ing. José Guasumba e Ing. Freddy Ordóñez respectivamente, por su tiempo, valores y conocimientos impartidos. A mis hermanos y hermanas del alma, amigos que estuvieron conmigo a lo largo de mi vida.

Jorge Esteban Riofrío Andrade

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN.	xvi

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES.	1
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Definición del problema.	3
1.3 Objetivos.	4
1.3.1 Objetivo general.	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación e Importancia.	4
1.5 Alcance.....	6

CAPÍTULO 2

BIOMASA Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.	7
2.1 Origen y concepto de biomasa	7
2.2 Características que definen a la biomasa.....	12
2.2.1 Contenido de sólidos	13
2.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO)	19
2.2.3 Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	23
2.2.4 Relación carbono - nitrógeno (C:N).....	27
2.2.5 Biodegradabilidad de desechos orgánicos	29
2.3 Producción de biogás	30
2.3.1 Factores que influyen la producción de biogás.....	32
a) Ausencia de oxígeno.....	34
b) Tipo y calidad de la biomasa	34

c) Almacenamiento de la biomasa.....	37
d) Preparación de la biomasa.....	37
e) Clasificación, eliminación de la materia extraña.....	38
f) Higienización.....	38
g) Troceado, trillado de la biomasa.....	39
h) Mezcla y homogeneización.....	39
i) Carga de alimentación.....	40
j) Temperatura del proceso.....	42
k) Tiempo de retención hidráulico (TRH).....	47
l) Acidez.....	50
m) Alcalinidad.....	52
n) Porcentaje de degradación.....	52
o) Nutrientes.....	53
p) Agitación - mezclado.....	54
2.3.2 Factores que inhiben la producción de biogás.....	55
a) Sales alcalinas.....	58
b) Amoníaco.....	59
c) Sulfatos y sulfuros.....	60
d) Metales pesados.....	64
e) Compuestos orgánicos.....	65
f) Desinfectantes y antibióticos.....	66

CAPÍTULO 3

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE DESECHOS ORGÁNICOS.....	69
3.1 La digestión anaeróbica.....	71
3.1.1 Características del proceso.....	72
3.1.2 Estequiometría de la metanogénesis.....	77
a) Fórmula empírica para células microbianas.....	78
b) División del sustrato y rendimiento celular.....	79
c) Producción de energía.....	80
d) Síntesis celular.....	81
e) Reacción general del crecimiento biológico.....	82
3.1.3 Cinética de la digestión anaeróbica.....	83

a) Crecimiento microbiano.....	84
b) Modelo cinético	88
3.1.4 Balances de materia.....	92
3.1.5 Productos del proceso.....	95
a) Biogás	96
b) Bioabono	99
c) Lodos digeridos	105

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	107
4.1 Biodigestor.....	111
4.1.1 Proceso de operación.....	111
4.1.2 Ubicación.....	112
4.1.3 Selección.....	113
a) Digestores de geomembrana HDPE	114
4.1.4 Parámetros de diseño	120
a) Tipo y disponibilidad de biomasa	121
b) Características físico - químicas.....	122
c) Temperatura de la biomasa y del medio ambiente	122
d) Selección del tiempo de retención hidráulico (TRH).....	124
e) Energía requerida.....	126
f) Carga orgánica volumétrica (COV)	127
4.1.5 Dimensionamiento del digestor	128
4.2 Dimensionamiento sistema de producción de biogás.....	130
4.2.1 Tanque de alimentación	130
4.2.2 Tanque de descarga.....	133
4.2.3 Lecho de secado de lodos.....	134
4.2.4 Tanque de almacenamiento de biogás.....	137
4.3 Selección de materiales de construcción	139

CAPÍTULO 5

ESTRUCTURAS Y SISTEMAS AUXILIARES.....	141
5.1 Estructuras auxiliares	141
5.1.1 Tuberías de conducción de sustrato.....	141
5.1.2 Tuberías de captación y conducción de biogás.....	148
5.1.3 Aislamiento del digestor	152
5.1.4 Agitadores	152
5.1.5 Sopladores	157
5.2 Sistemas auxiliares.....	158
5.2.1 Intercambiador de calor para adecuación temperatura de biomasa	158
5.2.2 Sistema de bombeo.....	162
5.2.3 Sistema de control del proceso	165
5.2.4 Tramo de calibración de biogás.....	168
5.2.5 Sistema de generación de energía eléctrica.....	170
a) Aprovechamiento del biogás en motores y generadores	173
b) Sistemas de seguridad.....	179

CAPÍTULO 6

ACONDICIONAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS.	185
6.1 Características del biogás	185
6.2 Acondicionamiento del biogás.....	189
6.3 Purificación de biogás	190
6.3.1 Agresividad del H ₂ S.....	192
6.3.2 Reducción de CO ₂	196
6.3.3 Sistemas de purificación de H ₂ S	197
6.4 Reducción de humedad.....	212

CAPÍTULO 7

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE BIOGÁS.....	215
7.1 Puesta en marcha	217
7.2 Operación.....	220
7.3 Mantenimiento.....	222
7.4 Higiene y salud en la operación de digestores	227

7.5	Reglas de seguridad.....	228
7.6	Remediación de problemas.....	230

CAPÍTULO 8

	ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.	235
8.1	Análisis económico.....	236
8.2	Análisis financiero.....	240

CAPÍTULO 9

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	251
9.1	Conclusiones.....	251
9.2	Recomendaciones.....	255

BIBLIOGRAFÍA

	Bibliografía.	275
--	----------------------------	-----

TABLAS

Tabla	Contenido	Página
2.1	Volumen efluentes.....	12
2.2	Escalas para selección del volumen de muestra.....	25
2.3	Relación carbono – nitrógeno C:N.....	28
2.4	Producción de biogás.....	31
2.5	Componentes y producción de biogás.....	32
2.6	Parámetros físico-químicos para una óptima digestión.....	33
2.7	Contenido de agua (biomasa-MS) de diferentes sustratos.....	41
2.8	Temperaturas, parámetros cinéticos de diferentes cultivos.....	43
2.9	Degradación en relación a la temperatura de proceso y TRH.....	53
2.10	Concentración de nutrientes para crecimiento de las bacterias...54	54
2.11	Concentraciones mínimas para la metanogénesis.....	58
2.12	Cationes comunes, concentraciones inhibitorias y estimulantes. 58	58
2.13	Concentración de amonios inhibidores.....	60
2.14	Concentración de inhibición y toxicidad de metales pesados.....	65
2.15	Compuestos orgánicos que reducen la producción de gas.....	66
3.1	Caracterización del sustrato.....	71
3.2	Bacterias involucradas en la digestión anaerobia.....	76
3.3	Fórmulas empíricas para células bacterianas metanogénicas....78	78
3.4	Constantes cinéticas para la digestión anaerobia.....	91
3.5	Características del biogás.....	96
4.1	Especificaciones de la geomembrana de HDPE.....	116
4.2	Producción de efluentes de la extractora.....	121
4.3	Temperatura ambiental de Sto. Domingo de los Tsáchilas.....	123
4.4	TRH – Temperatura del digestor.....	125
4.5	Energía eléctrica requerida.....	126
4.6	Dimensiones del digestor.....	129
4.7	Características del tanque de alimentación.....	130

4.8	Dimensiones del tanque de alimentación.....	132
4.9	Dimensiones del tanque de descarga.....	134
4.10	Dimensiones del lecho de secado de lodos.....	137
4.11	Características de los tanques de almacenamiento de biogás..	138
4.12	Materiales de construcción.....	140
5.1	Tubería de alimentación de biomasa.....	142
5.2	Resultados de tuberías.....	143
5.3	Resultados de accesorios.....	143
5.4	Resultados de bombas.....	143
5.5	Resultados de nodos.....	143
5.6	Tubería de descarga de biol.....	144
5.7	Resultados de accesorios.....	144
5.8	Resultados de nodos.....	144
5.9	Resultados de tuberías.....	145
5.10	Tubería de extracción de lodos.....	146
5.11	Resultados de nodos.....	146
5.12	Resultados de tuberías.....	147
5.13	Resultados de accesorios.....	147
5.14	Resultados de bombas.....	147
5.15	Tuberías de captación y conducción de biogás.....	150
5.16	Resultados de accesorios.....	150
5.17	Resultados de bombas (sopladores).....	150
5.18	Resultados de tuberías.....	151
5.19	Resultados de nodos.....	151
5.20	Características de motores.....	174
5.21	Zonas de seguridad.....	180
6.1	Composición del biogás.....	185
6.2	Características del biogás en relación con otros gases.....	186
6.3	Contenido de CH ₄ y CO ₂	186
6.4	Características de los componentes del biogás.....	187
6.5	Requerimientos mínimos del biogás para su aprovechamiento.	190
6.6	Gases contaminantes del biogás.....	191
6.7	Concentraciones de H ₂ S y efectos que produce en la salud.....	195
6.8	Comparación entre lechos filtrantes.....	206

6.9	Características de los carbones activados.....	210
7.1	Mantenimiento o control de la planta de biogás.....	230
7.2	Mal funcionamiento de la planta y posibles soluciones.....	231
8.1	Porcentajes anuales depreciación - años de vida del equipo.....	237
8.2	Porcentajes de mantenimiento y reparación.....	239

FIGURAS

Figura	Contenido	Página
2.1	Ciclo de la biomasa.....	8
2.2	División de la biomasa.....	9
2.3	Constitución de la biomasa y su aprovechamiento.....	11
2.4	Sólidos encontrados en el agua.....	14
2.5	Curva típica de la evolución de la DBO.....	24
2.6	Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás.....	46
2.7	Influencia de la temperatura sobre el TRH.....	47
3.1	Proceso de degradación anaeróbica de desechos orgánicos.....	73
3.2	Donador de electrones - síntesis y producción de energía.....	79
3.3	Curva de crecimiento típica para una población microbiana.....	84
3.4	Flujos de electrones y de energía en una célula microbiana.....	87
3.5	Efectos del sustrato limitante en el crecimiento biológico.....	89
3.6	Esquema de un quimiostato.....	92
3.7	Efecto de θ_x en S y X_a	94
4.1	Etapas de diseño de la planta de biogás.....	109
4.2	Aprovechamiento de la biomasa.....	110
4.3	Diagrama de procesos.....	120
4.4	Flujograma para el dimensionamiento del digestor.....	128
5.1	Lazos de control para automatización de una planta de biogás.....	167
6.1	Fases de la fermentación anaerobia.....	191
6.2	Esquema del biofiltro.....	197
6.3	Esquema humidificación del gas y del tanque biofiltros.....	201
6.4	Esquema del sistema de purificación del biogás.....	204
6.5	Disposición de filtros de carbón activado (serie – paralelo).....	211

ANEXOS

Anexo	Contenido	Página
A	Planos.....	260
B	Fotografías.....	261
C	Resultados del análisis físico-químico del efluente.....	262
D	Tiempo de retención hidráulico (TRH) – Temperatura.....	267
E	Especificaciones de rodamientos del sistema de agitación.....	268
F	Especificaciones del soplador seleccionado.....	269
G	Especificaciones de la bomba seleccionada.....	270
H	Especificaciones del generador seleccionado.....	272
I	Carta de satisfacción de la Hacienda “Tarragona”.....	273

RESUMEN

El presente proyecto consiste en un estudio que permite determinar la FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA EL DESARROLLO DE UNA INSTALACIÓN TERMOELÉCTRICA DE 160 KW MEDIANTE LA COMBUSTIÓN DE BIOGÁS PARA LA HACIENDA “TARRAGONA”. Para esto, se pretende aprovechar el efluente generado en la extractora de aceite de palma de la hacienda.

Las instalaciones de la extractora de aceite de palma africana Hacienda “Tarragona” están ubicadas en la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Km. 29 vía Santo Domingo – Esmeraldas. En la planta extractora se procesan un promedio de 26400 toneladas de fruto por año, proceso en el cual se generan unos 97 m³ de efluentes por día. Se considera que la generación de efluentes es del orden de 0.7 m³ por tonelada de fruto procesado y puede llegar hasta 1 m³/t.

En base a datos obtenidos de la hacienda y a referencias de otras extractoras se considera que el efluente de esta agroindustria genera una alta carga orgánica contaminante. Estos efluentes tienen una alta concentración en DQO (Demanda Química de Oxígeno) (40 a 60.000 mg/l), DBO₅ (Demanda Bioquímica de oxígeno) (20 a 40.000 mg/l) y S.S. (Sólidos Suspendidos) (20 a 30.000 mg/l). Además son ácidos (pH de 4 a 4.5) y aceitosos (+/- 5.000 mg/l.).

La Hacienda “Tarragona” dispone de un sistema de tratamiento del efluente el cual consiste en un sistema de lagunas en serie. Las primeras lagunas

pequeñas de la serie sirven para el enfriamiento del efluente y la recuperación del aceite residual, la laguna principal para la descomposición anaerobia, y las siguientes para el pulimento aerobio del efluente. Esta cadena de lagunas permite lograr eficiencias de remoción de la DBO₅ del 95 al 99 %.

A pesar de la alta eficiencia de remoción de la carga orgánica, el sistema de tratamiento tradicional implementado por la hacienda presenta varios inconvenientes como son: la contaminación del agua freática (infiltración, percolación), la colmatación paulatina de las lagunas con los lodos biológicos generados por la descomposición de la materia orgánica, la contaminación de la atmósfera por la emanación de grandes cantidades de metano, entre otros.

El sistema de producción de biogás que se propone en el proyecto consiste en una adaptación al sistema de tratamiento de lagunas en serie previamente construido en la extractora. Para ello se cubrirá el fondo de la laguna anaerobia con geomembrana HDPE y se colocará una cubierta de EPDM que permita recolectar el biogás generado por el proceso de digestión anaerobia. De esta forma no solo se reducen los costos de operación y mantenimiento de toda la planta mediante el aprovechamiento energético del biogás generado por la digestión anaerobia del efluente, sino que también se reduce la contaminación generada por esta industria de extracción de aceite. Además se pretende instalar un sistema de purga de los lodos hacia un sistema de deshidratación para facilitar su manejo, comercialización y aprovechamiento en la hacienda.

En base a un estudio sobre la biomasa y el proceso de digestión anaerobia de la misma se puede determinar si el efluente es o no adecuado para su utilización en la producción de biogás. En este caso se ha determinado que en base al efluente diario producido en la extractora se pueden llegar a generar hasta 1315 m³ de biogás por día, el cual puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica en un generador de hasta 200 kW. de potencia.

El biogás generado en el digestor tipo laguna cubierta debe ser acondicionado y purificado previo a su aprovechamiento en el generador de energía eléctrica. En base a las especificaciones del generador en cuanto a concentraciones admisibles de gases como el H₂S y CO₂, se ha previsto de un sistema de purificación del biogás en el cual las concentraciones de estos gases tóxicos se reducen hasta llegar a concentraciones menores o iguales a las requeridas por el generador para su correcto funcionamiento.

Una vez que la planta sea construida y este en operación se podrán obtener ingresos por la venta de energía y potencia, por la venta de bioabono e incluso por la venta de bonos por reducción de gases de efecto invernadero. Por este motivo se considera que el proyecto puede ser rentable ya que a pesar de que la inversión inicial es alta, esta puede ser recuperada a corto plazo gracias a las utilidades generadas anualmente.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los altos costos de generación de energía eléctrica utilizando combustibles convencionales derivados de materiales fósiles, los costos crecientes del abastecimiento de petróleo, la contaminación ambiental por su uso, sumado al costo que involucra su obtención y su carácter

finito, cuya extinción está prevista para este siglo, generan la necesidad de desarrollar proyectos que utilicen energías renovables, para la generación de energía eléctrica y de calor.

“Entre los recursos energéticos renovables, se cuenta con una fuente de energía como el biogás que se produce por la degradación anaeróbica de la biomasa” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004, pág. 21). A partir de este hecho, se puede decir que el sector agroindustrial tiene en sus desechos una gran fuente de recursos energéticos. Una correcta gestión de estos desechos puede llegar a generar grandes beneficios ambientales, sociales y económicos.

La extractora de aceite de palma “Hacienda Tarragona” genera una alta carga orgánica contaminante. La generación de efluentes es del orden de 0.7 m³ por tonelada de fruto procesado y puede llegar hasta 1 m³/t. Estos efluentes tienen una alta concentración en DQO (Demanda Química de Oxígeno) (40 a 60.000 mg/l), DBO (20 a 40.000 mg/l) y S.S. (Sólidos Suspendidos) (20 a 30.000 mg/l). Además son ácidos (pH de 4 a 4.5) y aceitosos (+/- 5.000 mg/l.). En esta planta ubicada en el kilómetro 29 vía Santo Domingo – Esmeraldas, se procesan un promedio de 26400 toneladas de fruto por año y se generan unos 97 metros cúbicos (m³) de efluentes por día. El sistema de tratamiento de estos efluentes son las lagunas en serie. Las primeras lagunas pequeñas de la serie sirven para el enfriamiento del efluente y la recuperación del aceite residual, la laguna principal para la descomposición anaerobia, y las siguientes para el pulimento aerobio del efluente. Esta cadena de lagunas permite lograr eficiencias de remoción de la D.B.O. del 95 al 99 %.

Para evitar los impactos ambientales de este sistema tradicional de lagunas de tratamiento, y reducir los costos de operación y mantenimiento de toda la planta mediante el aprovechamiento energético del biogás, se plantea cubrir la (o las) laguna(s) anaerobia(s) con carpa para aprovechar el biogás generado, e instalar un sistema de purga de los lodos, acompañado de un sistema de deshidratación de estos lodos para facilitar su manejo y aprovechamiento en dicha hacienda.

Esta opción se considera factible debido a que las instalaciones de la extractora ya disponen de lagunas tradicionales que requieren optimizar su sistema de tratamiento, reducir su impacto ambiental (lodos, metano), y sobre todo recuperar y valorizar el biogás generado por su laguna anaerobia.

En la CIME se han desarrollado investigaciones para el aprovechamiento de biogás, así se puede citar los siguientes estudios:

- Modelamiento de los procesos de biodegradación energética para aprovechamiento de basura, como generador de energía eléctrica: Validación mediante un prototipo.

- Diseño y construcción de un biodigestor plástico de flujo continuo a partir de desechos orgánicos para la hacienda San Antonio de IASA II.
- Diseño y construcción de un biodigestor prototipo para un destacamento militar de oriente.

Cabe mencionar que se tiene como principal antecedente la colocación de este tipo de “carpas” en la extractora de aceite de palma “Palmeiras” ubicada en Tumaco, Colombia, para el aprovechamiento del biogás de las lagunas de palma.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente, el sistema de tratamiento tradicional del efluente de la extractora de palma “Hacienda Tarragona” puede llegar a ser muy eficiente en cuanto a la remoción de la carga orgánica, sin embargo, existen ciertos inconvenientes como son:

- la contaminación del agua freática (infiltración, percolación), a menos de contar con un terreno arcilloso o con un plástico de protección en el fondo de la laguna.
- la colmatación paulatina de las lagunas con los lodos biológicos generados por la descomposición de la materia orgánica; esta colmatación reduce año tras año el volumen útil de las lagunas y provoca un arrastre de sólidos en suspensión con el efluente final, lo que reduce las eficiencias de remoción del sistema de tratamiento; esta colmatación implica también costos puntuales elevados para el retiro y la disposición de estos lodos.
- la emanación de grandes cantidades de metano (biogás) en la (o las) laguna(s) anaerobia(s), que contaminan la atmósfera y es uno de los principales gases responsables del calentamiento del planeta, a la par con el CO₂ y otros gases contaminantes.
- la posible generación de olores, que implica generalmente alejar las lagunas de la fábrica, lo que incrementa los costos de alcantarillado y dificulta el monitoreo.

Por estas razones el presente proyecto pretende determinar la incidencia que tiene el cubrir con carpa la (o las) laguna(s) anaerobia(s) del sistema tradicional de tratamiento para recuperar el biogás producido a fin de generar energía eléctrica y tratar de mejor forma la contaminación que genera el desecho de la industria de extracción de aceite.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Determinar la factibilidad técnica y económica para la implementación de una central termoeléctrica de 160 kW., a partir del aprovechamiento del biogás producido por la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos de la hacienda “Tarragona”.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Evaluar la disponibilidad de los desechos orgánicos producidos en la “Hacienda Tarragona” y analizar muestras para conocer su biodegradabilidad y estimar la producción de biogás.
- Dimensionar el sistema de producción de biogás, tomando en cuenta factores de tipo técnico, económico y operacional.
- Seleccionar las estructuras y sistemas auxiliares requeridos por el sistema de generación eléctrica.
- Elaborar los planos necesarios que especifiquen las normas técnicas que se deberán cumplir para la construcción del sistema.
- Realizar un análisis financiero y de rentabilidad de la instalación termoeléctrica.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

“Los precios actuales del petróleo y sus derivados, la contaminación ambiental que estos producen, así como la previsión de su agotamiento en los próximos 50 años, ha despertado mucho interés en la construcción de biodigestores y plantas de biogás para el aprovechamiento de los desechos orgánicos y la producción de energía”. (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 36).

El empleo energético de la biomasa presenta numerosas ventajas, no solo para el propietario de la instalación de aprovechamiento, sino también para la sociedad. En el primer caso, las ventajas son fundamentalmente económicas ya que se reducen los costos energéticos al disminuir la cantidad de combustibles o de energía eléctrica que se debe adquirir. En el segundo caso, el uso de la biomasa presenta, al igual que ocurre con otras energías renovables, numerosas ventajas medioambientales y socioeconómicas.

Los digestores cumplen la función ecológica de reciclar totalmente los desechos orgánicos generados en la industria de extracción de aceite a un costo muy bajo, consiguiendo también la protección del suelo (al producir abonos de gran calidad), del agua (al evitar verter residuos orgánicos), del aire y la atmósfera (al reducir las emisiones de CH₄ (metano), reduciéndose así el efecto invernadero).

Además, al emplear la tecnología de digestión anaerobia para tratar la biomasa residual húmeda se consigue anular su carga contaminante, reducir las fuentes de olores molestos y eliminar, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de digestión anaerobia pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura.

Por todas las ventajas que implica la utilización del biogás, la extractora de aceite de palma africana “Hacienda Tarragona” ha puesto su interés en el desarrollo de este proyecto, donde se estudiará la factibilidad de utilizar los desechos que se producen en esta agroindustria para generar la energía requerida de la planta, lo cual implica también el diseño del sistema requerido para la producción de biogás.

Los resultados y conclusiones de este proyecto serán de interés para todas aquellas agroindustrias que procesan el fruto de la palma africana, cuyas características sean similares a la que servirá de modelo en la investigación.

1.5 ALCANCE

El presente proyecto comprende el estudio de factibilidad y diseño de una instalación termoeléctrica de 160 kW. mediante la combustión de biogás para la hacienda “Tarragona”, con la sustentación técnica y los criterios de ingeniería adecuados.

Previamente se realizará un estudio del proceso de digestión anaerobia y de los factores que influyen la producción de biogás, con objeto de realizar el diseño del sistema adecuado en base a las condiciones del lugar, a la cantidad y al tipo de biomasa que se utilizará.

Se analizarán las muestras de los desechos orgánicos que se producen en la extractora hacienda “Tarragona”, para conocer su biodegradabilidad y estimar la producción de biogás. Además de las características del proceso para determinar el tipo de biodigestor adecuado para el proyecto. También se propondrá un sistema de acondicionamiento y purificación del biogás para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica.

En base al diseño térmico se dimensionará un intercambiador de calor que permita la alimentación de la biomasa a una temperatura adecuada. El calor

intercambiado puede destinarse a la calefacción de los digestores o para el calentamiento de agua.

Se diseñará o seleccionará las estructuras auxiliares, equipos e instrumentos que forman parte de una planta de biogás. Se brindará información sobre la operación y mantenimiento del biodigestor, para que el sistema sea adecuadamente controlado por los trabajadores encargados.

Adicionalmente, se incluirá información sobre el aprovechamiento del bioabono que es otro subproducto del proceso de digestión anaerobia de la biomasa. Para evaluación posterior de la institución auspiciante, se presentará un análisis financiero y de rentabilidad en base a los costos, gastos e ingresos referentes al sistema de producción de biogás diseñado.

CAPÍTULO 2

BIOMASA Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

2.1 ORIGEN Y CONCEPTO DE BIOMASA

El término biomasa o sustrato se refiere a toda la materia orgánica que proviene de desechos de animales (estiércol), árboles, plantas, desechos orgánicos que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, etc.), del aserradero (ramas, aserrín, cortezas), y de los residuos urbanos (aguas residuales, basura orgánica y otros). Se refiere por lo tanto a cualquier materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico natural. “El término biomasa comprende tanto a los productos de origen vegetal y a los de origen animal que se producen u obtienen en cualquier proceso agroindustrial, agropecuario o agrícola” (Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDAE), “Biomasa: Digestores anaerobios”, 2007).

“Hace más de 100 años, la biomasa de origen animal o vegetal, era la fuente de energía más importante para la humanidad y en ella se basaba la producción industrial” (Ibíd.). Con el uso masivo de combustibles fósiles el aprovechamiento energético de la biomasa fue disminuyendo progresivamente y en la actualidad presenta en el mundo un reparto muy desigual como fuente de energía. Mientras que en los países desarrollados ubicados en América del Norte y Europa la energía renovable y el aprovechamiento de los desechos agropecuarios esta en boga, en muchos países en vías de desarrollo esta fuente de energía provoca, en muchos casos problemas medioambientales como la contaminación y deforestación.

El elevado costo del petróleo y los avances técnicos que han posibilitado la aparición de sistemas de aprovechamiento energético de los desechos orgánicos, ha ocasionado que esta fuente de energía renovable se empiece a considerar como una alternativa viable técnica y económica al uso de combustibles fósiles.

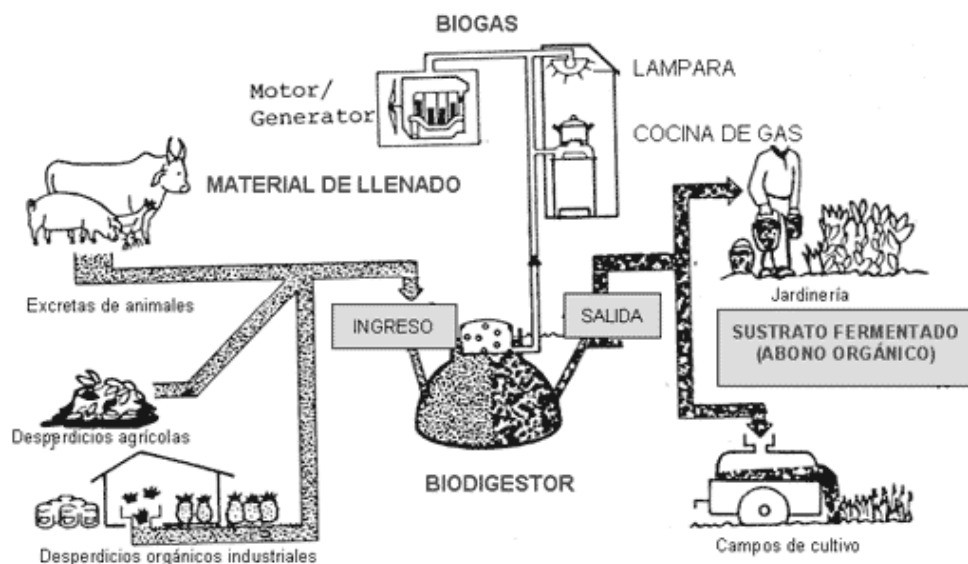


Figura 2.1: Ciclo de la biomasa

Existen una serie de factores que condicionan el consumo de biomasa y que hacen que este varíe de unos a otros, tanto cuantitativamente como en el aprovechamiento de la energía final. Estos factores se pueden dividir en tres grupos:

- Factores Geográficos: Inciden directamente sobre las características climáticas del país condicionando por tanto, las necesidades térmicas que se pueden cubrir con energías renovables.
- Factores Energéticos: Los precios y características del mercado de la energía determinan si es rentable la construcción de sistemas de aprovechamiento de la biomasa.
- Disponibilidad del Recurso: Incide directamente en la cantidad de producción de energías renovables.

“Se determinan cuatro grandes grupos de fuentes de biomasa para su aprovechamiento en biodigestores” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 118).

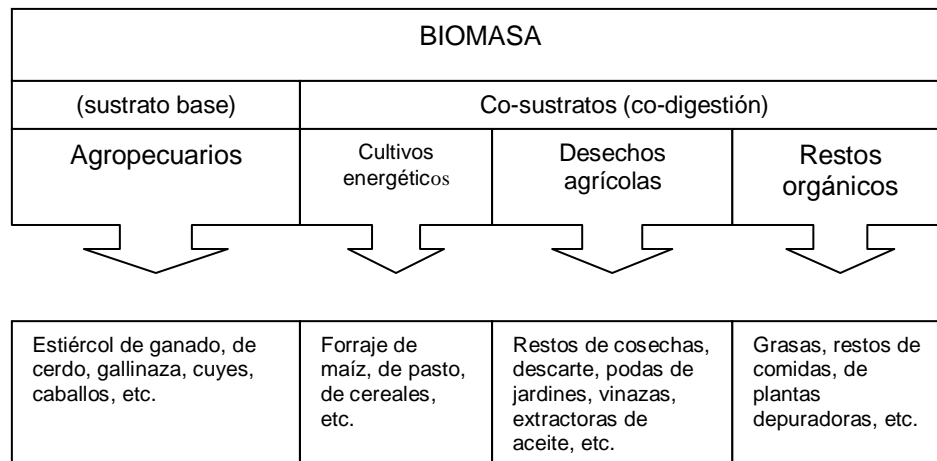


Figura 2.2: División de la biomasa

Numerosos materiales orgánicos se pueden digerir anaerómicamente sin mayores requerimientos de pretratamiento y con excelentes rendimientos, siempre que el contenido de impurezas o componentes inhibidores sean muy bajos. Con estos tipos de biomasa no ocurren problemas operacionales con frecuencia. Algunos residuos (como los vegetales) pueden formar metabolitos inhibidores (NH_3 , acumulación de ácidos volátiles) durante la digestión anaeróbica consiguientemente no son considerados como excelentes.

Muchos otros residuos orgánicos pueden ser considerados como buenos materiales, sin embargo, estos a menudo requieren de un pretratamiento (alimentos con fecha de expiración vencida, residuos de mercado, rumen y residuos de estómago, etc.). Los materiales orgánicos pueden ser clasificados como pobres para la digestión, debido a su alto costo de pretratamiento, componentes inhibidores, pobre biodegradabilidad, riesgos higiénicos o debido a costosos problemas logísticos de transporte o recolección (partes de animal, paja, residuos de jardinería, etc.).

Los residuos deben estar libres de sólidos y otros materiales como arena, rocas y piedras. Algunos materiales sólidos como el aserrín o paja se mezclan muchas veces con los residuos. La aglutinación de sólidos bloquea las tuberías de alimentación al digestor y obstaculiza la operación.

El posible aprovechamiento de residuos en algunos países también es influenciada y determinada por leyes, normas y reglamentos. Es necesario considerar la legislación sobre rellenos sanitarios, protección de suelos y aguas, las regulaciones sobre la recuperación,

disposición y tratamiento de residuos, reglas sobre salud humana y animal y guía de esterilización. “Los residuos orgánicos pueden contener bacterias patogénicas de diferentes especies como Salmonella, Listeria, Escherichia coli, Campylobacter, Mycobacteria, Clostridia, Yersinia, coliformes fecales y enterobacterias” (Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDAE), “Biomasa: Digestores anaerobios”, 2007, pág. 57).

Los residuos, desechos o sustratos que se pueden aprovechar para la generación de biogás y fertilizante orgánico son muy variados. A continuación se indican los más comunes:

- Residuos de cosechas: tallos y hojas de caña de azúcar, malezas, paja, rastrojo de maíz, espárragos, papas y otros cultivos.
- Residuos de origen animal: Desechos de establos (estiércol, orina, paja de camas, restos de forraje), camas de gallinas ponedoras, boñigas de cabras y ovejas, desperdicios de matadero (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero.
- Residuos de origen humano: basura orgánica, restos de comidas y mercados, de restaurantes, heces, orina.
- Residuos agroindustriales: tortas de oleaginosas, bagazo, salvado de arroz, desechos de tabaco y semillas, desperdicios del procesamiento de hortalizas y frutas, limos de prensas de ingenios azucareros, residuos de té, polvo de las desmotadoras de industria textil, desechos de la acuicultura, restos de materia prima, cebadas, levaduras.
- Productos agrícolas como pastos, forrajes de maíz, alfalfa, plantas como topinambur, piñón, papas, restos de frutas.
- Basuras acumuladas en rellenos sanitarios. Aguas residuales agroindustriales y domésticas. Lodos de plantas depuradoras.
- Grasas de procesos agropecuarios y agroindustriales.

Como se puede observar, no hay límite para el uso de residuos orgánicos y su aprovechamiento en biodigestores o plantas de biogás. Consecuentemente todo desecho o residuo orgánico puede aprovecharse en biodigestores.

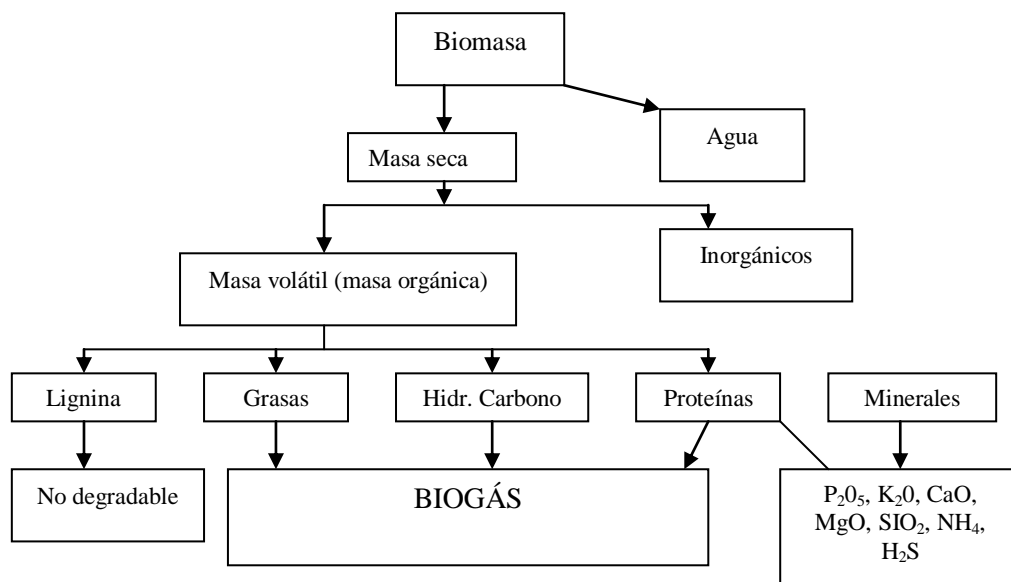


Figura 2.3: Constitución de la biomasa y su aprovechamiento

La biomasa que se aprovechará en el proyecto para la generación de energía consiste en un desecho de tipo agrícola. Este desecho es el generado en la industria de extracción de aceite de palma africana.

El procesamiento en las plantas extractoras de los racimos de fruta fresca de la palma se realiza mediante presión, temperatura y procesos mecánicos; extraen el aceite contenido en la pulpa de la fruta. “Es un proceso de cinco etapas, principalmente el primero, consiste en utilizar esterilizadores de vapor para detener la formación rápida de ácidos grasos libres. En seguida se agotan los racimos, digiriéndolos, y entonces se presionan para extraer el aceite. El aceite crudo es finalmente separado y clarificado por flotación y centrifugación de licor acuoso residual. El licor de desecho es producido en cada una de estas etapas, así como de derrames, vapor de las trampas, pero principalmente son condensados del esterilizador y los florentinos¹ en la etapa final de clarificación” (Ing. Juan Carlos Álvarez, 2009, técnico de la hacienda “Tarragona”).

A continuación se presenta una tabla del volumen de desechos (efluente) generados en la extractora Hacienda “Tarragona”, en cada una de las etapas antes mencionadas.

Tabla 2.1: Volumen efluentes

VOLUMEN EFLUENTES EXTRACTORA	
CLARIFICACION: (m ³ /TRFF)	0,53
ESTERILIZACION: (m ³ /TRFF)	0,12
HIDROCICLONES (m ³ /TRFF)	0,05
TOTAL AGUA: (m ³ /TRFF)	0,7

Fuente: Ing. Juan Carlos Alvares, técnico de la hacienda “Tarragona”

Este tipo de biomasa consiste en un efluente líquido con un bajo porcentaje de sólidos totales (<5%), ya que su composición es mayormente agua. Por esto se considera que su uso es adecuado para aprovecharlo en biodigestores sin mezclarlo con otro tipo de sustrato para evitar grandes requerimientos de pretratamiento.

2.2 CARACTERÍSTICAS QUE DEFINEN A LA BIOMASA

¹ Taques para la recuperación del aceite residual por flotación.

A continuación se presentan las características más importantes que se consideran en la biomasa para su aprovechamiento en biodigestores. Estas deben ser determinadas mediante un análisis físico-químico de una muestra del efluente que se pretende usar en el proyecto. En este caso las muestras han sido tomadas, conservadas y analizadas siguiendo las recomendaciones del Standard Methods For Examination of Water and Wastewater² (APHA 1998). Los análisis físico-químicos fueron realizados en los laboratorios del CEINCI y en los laboratorios ANNCY de la ciudad de Quito. En el ANEXO B se presentan imágenes de los procedimientos realizados.

2.2.1 CONTENIDO DE SÓLIDOS

Los sólidos en el agua pueden ser contemplados desde diversos puntos de vista, dependiendo del uso o del tipo de tratamiento al que un agua va a ser sometida.

Se llaman "Sólidos totales" los que quedan como residuo después de la evaporación del agua a 105 °C. De estos sólidos, la fracción que quedaría retenida por un filtro de membrana con un tamaño de poro de 1,2 micras, constituye los denominados "sólidos suspendidos", y el resto los "sólidos disueltos".

Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que se depositan en el fondo de un vaso cónico, llamado "cono de Imhoff", tras un período de una hora.

Por otra parte, en cada una de estas clases de sólidos puede a su vez distinguirse las fracciones "fija" o "no volátil" y "volátil", según que permanezca estable o no a una temperatura de 600 °C. Tradicionalmente se considera que la fracción volátil corresponde a la materia orgánica, aunque esto no es exactamente así ya que existen fuentes de error como la descomposición del carbonato magnésico a 350 °C. Esto hace necesario corregir numéricamente el valor obtenido cuando la concentración de carbonato magnésico es considerable, o bien regenerar químicamente el carbonato magnésico descompuesto.

De todas estas clases de sólidos las que se determinan con más frecuencia son los sólidos sedimentables, los sólidos en suspensión y los sólidos totales, y -de estos últimos- la fracción fija y la fracción volátil.

² Publicación de la Asociación Americana de salud pública (APHA), que cubre los aspectos de las técnicas de análisis de agua y aguas de desechos.

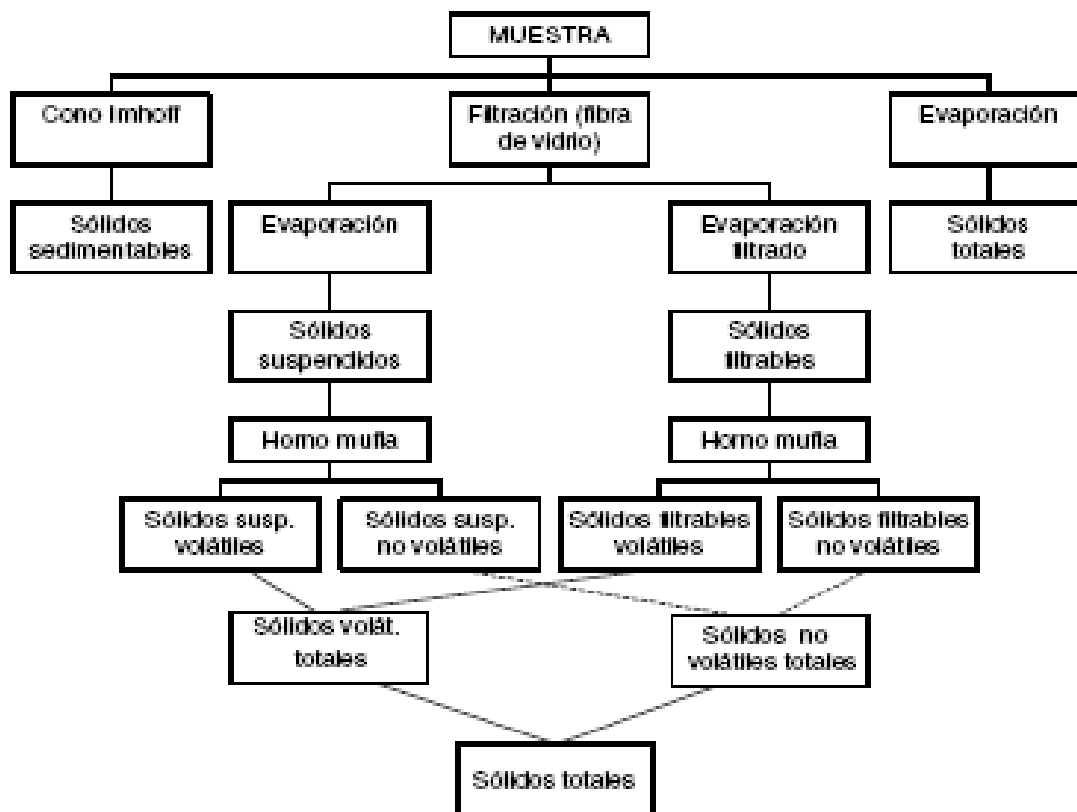


Figura 2.4: Relaciones entre los distintos tipos de sólidos encontrados en el agua

El volumen de muestra necesario depende de la carga que contenga el agua, y debe ser tanto mayor cuanto menor sea ésta. Para la determinación de los sólidos sedimentables conviene disponer de una muestra de unos dos litros, para las restantes determinaciones puede bastar con 100 ml, en caso de aguas residuales muy cargadas, o bien ser necesario hasta 20 litros, en caso de aguas naturales.

a) Determinación de sólidos totales

Toda materia orgánica residual que se destine como alimentación del biodigestor, generalmente esta compuesta por una importante cantidad de agua y una fracción sólida caracterizada por la concentración de sólidos totales (ST).

Es necesario calcular el volumen de agua para diluir la materia prima, hasta la proporción adecuada, de acuerdo al contenido de sólidos del residuo a utilizar. Por ejemplo, en el caso de utilizar estiércol bovino fresco, que contiene entre un 17 % al 20 % de sólidos totales, se deberá agregar entre 1 a 1.5 litros de agua por cada Kg. de estiércol fresco, a fin de obtener una mezcla con 8 % de sólidos totales.

La determinación de los sólidos totales se realiza por evaporación y pesada. Es necesario que esta evaporación sea suave, sin que en ningún momento llegue a producirse una ebullición

tumultuosa, para evitar el arrastre de partículas por el vapor. Para ello lo ideal es llevarla a cabo en una estufa ventilada a un ambiente cercano, pero inferior, a los 100 °C.

Material necesario:

- Cápsula de porcelana de 150 ml.
- Estufa de desecación, ventilada.
- Recipiente desecador.
- Balanza de precisión.

Procedimiento:

Secar la cápsula en estufa a 105 °C, hasta peso constante (mínimo: 2h), sacarla de la estufa, dejarla enfriar en el desecador, y pesarla. Verter en la cápsula un volumen de 100 ml de la muestra, y depositarla en la estufa, a 95 °C, hasta su total evaporación. Cuando toda el agua se haya evaporado, elevar la temperatura de la estufa hasta 105 °C, y mantenerla durante 4 h. A continuación, sacar la cápsula de la estufa y dejarla enfriar en el desecador, pesando seguidamente. La diferencia entre las dos pesadas representa los sólidos totales contenidos en el agua evaporada.

El resultado se expresará en mg de sólidos totales por litro de agua:

$$Y = \frac{\text{ml.sólidos.totales}}{\text{litro}} = \frac{(A - B) \cdot 1000}{\text{ml.muestra}} \quad (2.1)$$

Donde:

A = peso de residuo seco + cápsula, mg.

B = peso de la cápsula, mg.

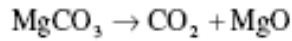
Observaciones:

El volumen recomendado (100 ml) es adecuado para un agua residual. En aguas naturales, o con poca carga de materia sólida, es necesario evaporar un volumen mayor, lo cual debe hacerse llenando sucesivas veces la cápsula, y dejando evaporar cada vez el agua. Es válida la observación anteriormente hecha, acerca de la necesidad de no perder tiempo en la pesada, para evitar la absorción por la cápsula o el residuo de la humedad ambiente.

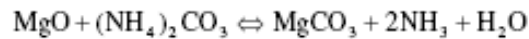
Interferencias: El agua altamente mineralizada con elevada concentración de Ca, Mg, Cl⁻ y/o sulfato puede ser higroscópica y requerir un secado prolongado, desecación adecuada y rápida pesada. Se deben excluir los aglomerados o materias no homogéneas, así como el aceite y grasas que puedan haber en la superficie.

b) Determinación de las fracciones volátil y no volátil.

Una vez determinados los sólidos totales, la determinación de la fracción no volátil se lleva a cabo por calcinación del residuo que quedó en la cápsula. Esta calcinación debe ser realizada a temperatura del orden de 600 °C. Al calentar a esa temperatura la materia orgánica se descompone en agua y anhídrido carbónico que se evaporan. Así mismo, el carbonato magnésico se descompone a 350 °C según la reacción siguiente:



Si existe en cantidad apreciable deberá regenerarse mediante la adición de una solución de carbonato de amonio. La reacción regenerante es la siguiente:



El valor de la concentración de sólidos volátiles también es necesario para el cálculo de la carga orgánica volumétrica (COV [kg/m³]) con la cual se alimenta al digestor.

Material necesario:

- Cápsula de porcelana con el residuo de los sólidos totales.
- Horno de mufla.
- Estufa de desecación ventilada.
- Recipiente desecador.
- Balanza de precisión.

Procedimiento:

Introducir la cápsula en el horno de mufla, y ajustar éste a 600 °C. Una vez alcanzada la temperatura citada, mantenerlo 1 h. Dejar enfriar el horno, y extraer la cápsula. Completar su enfriado en el desecador. Pesar la cápsula.

La diferencia entre el peso de cápsula y residuo, antes y después de todas estas operaciones, es la llamada "pérdida al fuego". La diferencia entre el peso de los sólidos totales, anteriormente obtenido y la pérdida al fuego es el llamado "residuo fijo" o "no volátil".

Los resultados se pueden expresar de distintas formas:

- En mg de sólidos fijos por litro de muestra.

$$X = \frac{\text{mg.sólidos.fijos}}{\text{litro.muestra}} = \frac{(D - B) \cdot 1000}{\text{ml.de.muestra}}$$

(2.2)

Donde

D = peso de residuo fijo de los sólidos totales + cápsula, mg.

B = peso de la cápsula, mg.

- Como porcentaje de los sólidos totales.

$$\text{Residuo fijo (\%)} = \frac{Y}{X} \cdot 100 \quad (2.3)$$

- En mg de sólidos volátiles por l de muestra.

$$\frac{\text{mg. sólidos. volátiles}}{l \text{ muestra}} = (Y - X) \quad (2.4)$$

Observaciones:

Puede prescindirse de la regeneración de los carbonatos si se tiene constancia de que su concentración en el agua es pequeña. También puede procederse a su compensación numérica, si se conoce el contenido en carbonato magnésico del agua.

c) Determinación de los sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión se determinan por filtrado, y posterior pesada del material retenido. A efectos prácticos, la filtración conviene realizarla a presión, o a vacío, para que no se demore excesivamente la determinación.

Material necesario:

- Equipo de filtración.
- Matraz Kitasato.
- Bomba o trompa de vacío.
- Estufa de desecación.
- Filtro de 47 mm de diámetro y 0,45 micras.
- Balanza de precisión.
- Recipiente desecador.

Procedimiento:

Desecar el filtro en estufa a 105 °C, hasta peso constante, (mínimo: 2h), sacarlo de la estufa, enfriarlo en el desecador, y pesarlo. Acoplar el filtro en el equipo de filtración, montarlo sobre el matraz Kitasato, y conectar éste a la bomba de vacío.

Llenar el embudo con el agua problema y poner en marcha la bomba de vacío. Filtrar el volumen deseado, llenando repetidas veces el embudo si es necesario, y mantener el vacío hasta que el papel de filtro comience a secarse. Retirar el filtro con cuidado, colocarlo sobre una cápsula de porcelana previamente pesada y ponerlo a desecar en la estufa a 105 °C (24 horas). Una vez seco, y enfriado en el desecador, se pesa la cápsula con el filtro, siendo el peso de las materias en suspensión la diferencia entre este valor, y el peso inicial del papel seco, más la cápsula vacía.

El resultado se expresará en mg de material en suspensión por litro de muestra:

$$U = \frac{\text{mg.sólidos.en.suspensión}}{\text{litro.de.muestra}} = \frac{(A - B - C) \cdot 1000}{\text{volumen.muestra, ml}} \quad (2.5)$$

Donde

A = peso del filtro + cápsula + residuo, mg.

B = peso de la cápsula, mg.

C = peso del filtro, mg.

Observaciones:

Debe evitarse utilizar un tiempo excesivo en el traslado del papel de filtro desde la estufa al desecador, y desde éste a la balanza, para evitar que la humedad ambiente penetre en el mismo. La pesada debe, asimismo, procurar hacerse lo más brevemente posible.

En aguas residuales, con concentraciones de 100 a 500 mg/l de sólidos en suspensión basta con filtrar 100 ml de agua. En aguas naturales, con cargas menores a 5 mg/l, es necesario filtrar hasta unos 20 litros. En estos casos puede resultar preferible una concentración previa por centrifugación aunque es un proceso muy laborioso.

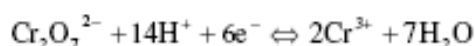
2.2.2 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La DQO es la cantidad total de oxígeno (mg/l) necesario para oxidar completamente las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un litro de suspensión y se emplea como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable a biogás.

Por el principio de conservación de la materia la cantidad eliminada de DQO, (medida indirecta de la concentración de materia orgánica del residuo o agua residual a tratar), se convierte en gas. Por este principio, la cantidad máxima de metano producible es de 0.35 [m³ de CH₄ / kg de DQO eliminada], en condiciones normales de presión y temperatura.

El método más utilizado para medir este parámetro es el método estándar de oxidación con dicromato, en el cual, se utiliza este oxidante en el método de reflujo porque es un oxidante fuerte aplicable a una gran variedad de muestras y de fácil manipulación. La eficacia de la oxidación es del orden del 95 al 100% del valor teórico. Este método es aplicable a valores de DQO comprendidos entre 50 y 800 mg/l, para valores de DQO superiores habrá que diluir la muestra. Este test se lleva a cabo por calentamiento bajo condiciones de reflujo total de un determinado volumen de muestra de agua residual con un exceso conocido de dicromato en presencia de ácido sulfúrico del 96%. El período de reflujo standard es de 2 horas. Un tiempo de reflujo superior implicaría un valor de la DQO superior dado que ésta continúa aumentando hasta las 7 horas, tiempo para el que se estabiliza.

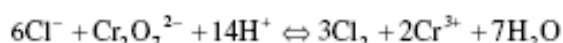
La reacción que tiene lugar es la siguiente:



donde el dicromato (naranja amarillento) oxida la materia orgánica reduciéndose a Cr^{3+} (verde).

Interferencias:

Los cloruros resultan ser una interferencia pues parte de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ actúa oxidándolos según la ecuación:



y, en este caso, los iones cromo no serían causa de la oxidación de la materia orgánica por los iones dicromato, con lo cual, a la hora de valorar el dicromato posteriormente, se obtendrían resultados erróneos. Así mismo los Cl^- pueden precipitar con la Ag^+ añadida como catalizador.

Esta interferencia se reduce, pero no se elimina totalmente, añadiendo HgSO_4 (tóxico) a la mezcla en la proporción 10:1 $\text{HgSO}_4:\text{Cl}^-$ antes de la ebullición a reflujo dando lugar a la formación de cloromercuriato soluble. Para saber la cantidad de cloruros que hay en la muestra se lleva a cabo el siguiente test:

Se valora la muestra con nitrato de plata 0,0141 N y con indicador cromato potásico. Si se utiliza un volumen de muestra de 50 ml hay que multiplicar el volumen gastado por 10, y si utilizamos 25 ml, por 5. Para que no haya interferencias debe haber menos de 2000 mg/l de cloruros. Un mg/l de Cl^- es equivalente a 0,226 mg/l de DQO. Se aconseja utilizar 1 g de sulfato mercúrico para 50 ml de muestra como la cantidad mínima que debe usarse donde la concentración de cloro es menor de 2000 mg/l.

Otra interferencia son los nitritos. El nitrito ejerce una DQO de 1,14 mg O_2 /mg $\text{NO}_2\text{-N}$. Debido a que las concentraciones de NO_2 en el agua residual no suelen ser superiores a 1 ó 2 mg $\text{NO}_2\text{-N/l}$, esta interferencia se suele ignorar. La forma de eliminarla, en su caso, sería añadir 10 mg de ácido sulfámico por cada mg de $\text{NO}_2\text{-N}$ en el tubo de reflujo, es decir, en la dilución final. Añadirlo así mismo a la disolución standard de dicromato utilizada en el blanco de agua destilada.

Material y reactivos necesarios:

- Tubos cilíndricos largos con la boca esmerilada.
- Varillas agitadoras.
- Pipetas.
- Matraz erlenmeyer de 500 ml.
- Digestor.

- Disolución ácida Ag_2SO_4
- Disolución de color intervalo alto de DQO
- Disolución de color intervalo bajo de DQO
- Espectrofotómetro.

Normalmente se suelen utilizar Kit comerciales en los que vienen añadidos todos los reactivos necesarios para el análisis.

ADVERTENCIA.- Mediante este método se manipulan y se someten a ebullición soluciones de H_2SO_4 y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Es necesario usar trajes de protección, guantes y la protección total de la cara. En caso de accidente el remedio más eficaz es el lavado abundante con agua clara. La adición de H_2SO_4 concentrado al agua y el agitado de los frascos, debe realizarse siempre con precaución. Para la preparación y manipulación de soluciones que contienen sulfato de plata y sulfato de mercurio (II) es necesario tomar precauciones ya que son sustancias tóxicas. Los reactivos utilizados contienen sales de mercurio de plata y de cromo. Las sales de mercurio descargadas en las corrientes receptoras pueden transformarse, por la acción de bacterias, en compuestos de metilmercurio muy tóxicos. Los productos resultantes deben ser manipulados o tratados antes de su eliminación, conforme a la reglamentación de sustancias tóxicas.

Procedimiento:

Se añaden 2,5 ml de muestra, 3,5 ml de disolución ácida Ag_2SO_4 y 1,5 ml de reactivo de color (intervalo alto $100 < \text{DQO} < 1000$, intervalo bajo $\text{DQO} < 100$) a dos recipientes cerrados por cada muestra y a dos blancos (muestras de agua destilada) a los que se les ha sometido a todo el proceso, se cierran y se colocan en digestor a $140\text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas. Se mide la absorbancia a 600 nm. a la muestra si es de intervalo alto y a 400 nm si es de intervalo bajo.

Sin embargo, debido a la peligrosidad de este procedimiento experimental, en la actualidad se utilizan viales comerciales, que contienen la mezcla oxidante ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, H_2SO_4 y Ag_2SO_4), y para su uso solamente es necesaria la adición de un volumen de muestra determinado, y su posterior digestión durante 2 horas a $148\text{ }^\circ\text{C}$.

Si se utiliza el Kit comercial, seguir el procedimiento indicado en el mismo. El resultado se lee directamente en el espectrofotómetro.

2.2.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO_5)

Otro parámetro de la digestibilidad de los residuos es la demanda bioquímica de oxígeno que es el consumo de oxígeno, [mg/l] de suspensión, durante la degradación por microorganismos durante 5 días a 20 grados centígrados.

Tanto la DBO como la DQO son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la primera es más representativa de la degradabilidad de la misma. También puede usarse el valor de carbono orgánico total (COT) que se obtiene midiendo el CO₂ formado en la combustión.

Para estimar el valor de la DBO se utiliza un modelo cinético de primer orden. En este modelo se supone que el consumo de oxígeno es sólo función de la DBO residual:

$$\frac{d\text{DBO}}{dt} = -k[\text{DBO}_r] \quad (2.6)$$

Donde:

DBO_r : DBO residual a tiempo t (gr/m³).

k : constante de velocidad de la reacción (t⁻¹).

El efecto de la temperatura está incluido en la constante de velocidad ($k = A \cdot \exp^{-E/RT}$). Integrando entre los límites iniciales DBO_r=DBO₀ para t=0 y DBO_r=DBO_r para t=t obtenemos:

$$\ln \frac{\text{DBO}_r}{\text{DBO}_0} = -kt \quad (2.7)$$

y resolviendo entre los límites de integración se obtiene:

$$\text{DBO}_r = \text{DBO}_0 e^{-kt} \quad (2.8)$$

Donde DBO₀ es la DBO carbonosa límite en gr/cm³.

Transcurrido un tiempo t, la DBO producida por un agua residual en un ensayo analítico sería la límite o total (es decir, la que se producirá tras un tiempo infinito o DBO₀) menos la denominada residual o remanente (es decir, correspondiente a la contaminación que aún no se ha oxidado, DBO_r). Por tanto: DBO(t)=DBO₀-DBO_r(t), es decir:

$$\text{DBO}(t) = \text{DBO}_0 (1 - e^{-kt}) \quad (2.9)$$

A continuación se muestra una representación gráfica de la variación de la DBO en función del tiempo, indicándose DBO₅ como el valor tras cinco días de ensayo analítico.

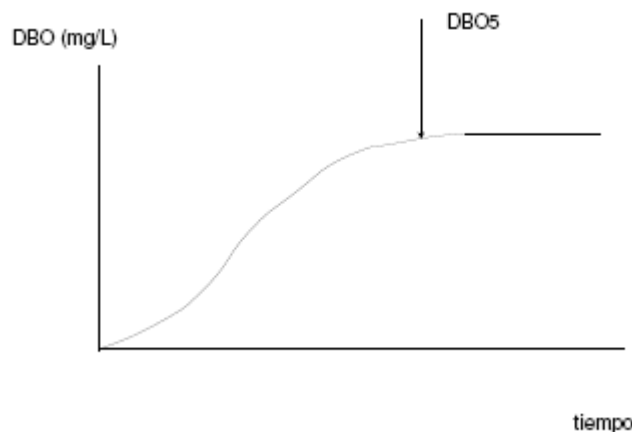


Figura 2.5: Curva típica de la evolución de la DBO

Como puede observarse, el valor de la DBO crece exponencialmente hasta los 5 días representando del 55% al 97% de la DBO_0 ; a partir de aquí crece ligera y asintóticamente, alcanzando su valor límite a los 20 días.

Material y reactivos necesarios:

- DBOmetro.
- Botellas de incubación.
- Varillas de vidrio.
- Agitadores magnéticos.
- Pipetas de 125 cc.
- Probetas
- Disolución de fosfatos: Se disuelven 8,493 gr de mono hidrógeno fosfato de sodio ($Na_2HPO_4 \cdot 2 H_2O$) y 2,785 gr de di hidrógeno fosfato de potasio (KH_2PO_4) en 1000 ml de agua destilada.
- Disolución de sulfato de magnesio de concentración 20 gr/l.
- Disolución de cloruro de calcio de concentración 25 gr/l.
- Disolución de cloruro férrico de concentración 1,5 gr/l.
- Disolución de cloruro amónico de concentración 2 gr/l.
- Hidróxido de litio.

Procedimiento:

Generalmente la DBO esperada se encuentra entre un 50% - 60% de la DQO. Según la DBO esperada el volumen de muestra a tomar será uno u otro. Deben consultarse las escalas siguientes para saber el volumen de muestra que hay que tomar.

Tabla 2.2: Escalas para selección de volumen de muestra.

DBO esperada	Volumen de muestra	Factor multiplicativo
0-40	432 cc	x1
0-80	365 cc	x2
0-200	250 cc	x5
0-400	164 cc	x10
0-800	97 cc	x20
0-2000	43,5 cc	x50
0-4000	22,7 cc	x100

Fuente: Clesceri, Lenore, Greenberg, Arnol, "Standard Methods for the examination of water and waste water", 1998.

Según el volumen de agua residual que se haya tomado habrá que multiplicar el valor de la DBO resultante por el factor multiplicativo que se da en la tercera columna. Si la muestra que se quiere analizar no es de agua residual doméstica, habrá que sembrarla, esto es añadir 0,1 ml de fango/litro de muestra si se puede. Si no es posible se añadirá el mínimo posible, intentando acercarse a 0,1 ml/litro. Esto se hace con objeto de que en el agua existan los microorganismos necesarios para que tenga lugar la degradación de la materia orgánica. A continuación se llenan las botellas, perfectamente limpias con un volumen de muestra adecuado. Se añaden las sales para proporcionar nutrientes a los microorganismos.

La proporción en la que deben añadirse es:

- Sulfato de magnesio: 0,1 ml.
- Cloruro cálcico: 0,1 ml.
- Cloruro amónico: 0,1 ml.
- Cloruro férrico: 0,1 ml.
- Fosfatos: 0,1 ml

Debe comprobarse que el pH se encuentra dentro del intervalo 7 - 9, que es el adecuado para que se desarrollen los microorganismos, en caso de que no esté en este intervalo habrá que acidificar o basificar según sea el caso con NaOH (20 gr/l) o HCl 0,5 M. Se colocan las botellas en el DBOmetro y se dejan durante unos minutos (30') para que se estabilicen a la temperatura de 20 °C. Debe tenerse en cuenta que durante el proceso de degradación también se produce CO₂. Con objeto de que éste no afecte en el valor de la DBO, se utiliza LiOH que se coloca en los tapones. La cantidad de hidróxido que se utiliza es de 0,25 gr/l de muestra (8 cucharaditas). Si el reactivo utilizado es LiOH. H₂O se utilizan 0,437 gr/l (13 cucharaditas).

Se siembran y se añaden los nutrientes a las muestras, se enrasan los manómetros de mercurio a cero, se tapan las botellas herméticamente y se toma la lectura del manómetro durante cinco días consecutivos.

El valor de la DBO determinado corresponde a la lectura manométrica a los 5 días (DBO_5), o a los 20 días (DBO límite, DBO_t) multiplicando por el factor de dilución en el caso de que ésta se haya hecho (prestar atención a las posibles modificaciones de las características del agua debido a la dilución). Puede seguirse la lectura del manómetro todos los días y con los valores obtenidos construir la gráfica:

$$DBO = f(t) \quad (2.10)$$

2.2.4 RELACIÓN CARBONO-NITRÓGENO (C:N)

Para que los procesos anaeróbicos se desarrollen y la flora microbiana actúe es necesario que la materia orgánica contenga una cierta cantidad de nutrientes. “El consumo de carbono es superior al de nitrógeno, en forma amoniacal, una relación de C:N = 30:1. Cuando la relación es muy estrecha (10:1) hay pérdidas de nitrógeno asimilable lo cual reduce la calidad del material digerido. Si la relación es muy amplia (40:1) se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno. Si hay demasiado carbono en la materia a fermentar, el proceso se hace más lento y tiende a acidificarse. Si hay demasiado nitrógeno, este se perderá como amoníaco, elevando el pH y reduciendo el poder fertilizante y nutriente de los lodos efluentes” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 238).

“También se requiere de una cantidad de fósforo en una proporción de N/P = 5:1” (Ibíd.). Además deben estar presentes metales alcalinos y alcalinos térreos, como sodio, potasio, calcio y magnesio en pequeñas concentraciones como micronutrientes; de lo contrario, puede ser causa de la inhibición del proceso de digestión. Para cumplir con las funciones enzimáticas también se requiere de muy pequeñas concentraciones de hierro, cobre, zinc, níquel, azufre, etc., los que se encuentran en las cantidades necesarias, en todos los residuos orgánicos habitualmente utilizados.

La relación ideal de nutrientes es:

$$C:N:P = 75:5:1 \text{ hasta } 125:5:1$$

$$C:N = 10:1 \text{ hasta } 30:1$$

$$N:P = 5:1$$

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a la fermentación anaeróbica. La cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y

el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células. “Los alimentos principales de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en la forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, amoníaco, etc.)” (Carless J., “Renewable Energy: A concise Guide to Green Alternatives”, 1995, pág. 183).

Las bacterias utilizan el carbono con una rapidez unas 30 veces mayor que su uso de nitrógeno. Si la relación C:N es alta, el nitrógeno será consumido rápidamente por las bacterias metanogénicas para formar proteínas y no reaccionará con el material restante, por tanto la producción de gas será alta. Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se vera limitada. Al existir nitrógeno en exceso se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

Debido a estas características de la relación C:N, es muchas veces necesario la CO-Generación o mezcla de diferentes tipos de biomasa con diferente relación C:N para aumentar o reducir esta relación hasta obtener un valor más cercano al óptimo. Los materiales con una relación C:N alta pueden mezclarse con aquellos de baja relación de C:N para dar la relación promedio deseada a la carga, que es de 20 a 30 partes de carbono por 1 de nitrógeno.

Por ejemplo la gallinaza tiene C:N bajo y debería mezclarse con una biomasa alta en carbonos como el pasto o desechos agrícolas de mercados. A continuación se muestra la relación C:N para varios tipos de desechos.

Tabla 2.3: Relación C:N

Relación C:N Para varios tipos de Desechos			
Agua Residuales	11	Paja de Maíz	112
Alfalfa	18	Paja de Trigo	122
Algas Marinas	19	Pastos	16
Amaranto	11	Pulpa de Cacao	16
Acerrin de Madera	805	Pulpa de Café	16
Bagazo de Caña	128	Ramas de Yuca	98
Basura Orgánica	25	Raquis de Banano	61
Cáscara de arroz	63	Restos de Fruta	35

Relación C:N (Continuación)

Cáscara de Café	53	Restos de Habichuelas	24
Cáscara de Soya	33	Restos de Lino	90
Cáscara de Yuca	96	Tallos de Maíz	60
Cáscara de fruto de Cacao	38	Tomates	12,6
Cáscaras de Maní	31	Heces de Conejo	23
Heno	12	Estiércol de Vaca	16,6 – 25
Hojas Caídas	50	Gallinaza	12
Hojas de Banano	19	Heces de Ovejas	20
Hojas de Eucalipto	15	Heces de Cuyes	17
Hojas de yuca	12	Estiércol de Caballo	25

Leguminosas	12	Estiércol de Cerdo	15 – 30
Madera	700	Restos de Pollos	28,6
Mazorca de Maíz	49,9	Sangre de Cerdo	15 – 30
Paja de Arroz	72	Sangre de Vaca	15 – 30

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 240.

2.2.5 BIODEGRADABILIDAD DE DESECHOS ORGÁNICOS

La determinación de la biodegradabilidad de un tipo de efluente agroindustrial permite estimar la fracción de DQO que puede ser eliminada por medio de la digestión anaeróbica. La relación entre los valores de DBO y de DQO es indicativa de la biodegradabilidad de la materia orgánica. En el caso de aguas residuales o aguas de procesos, estas pueden degradarse en un biodigestor cuando la relación de DBO/DQO ≥ 0.5 . Se puede establecer que una relación DBO/DQO = 0.5 denota un grado satisfactorio de biodegradabilidad. Una relación de DBO/DQO inferior a 0.5 admite la presencia de sustancias tóxicas que retardan o inhiben la biodegradabilidad (metales pesados, cianuros, cloro, etc.) aun en presencia de sustancias carbonadas, resistentes ellas mismas a la descomposición biológica. Un valor de la relación de DBO/DQO menor a 0.2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y orgánico si es mayor de 0.5.

Un efluente agroindustrial que es considerado poco o nada biodegradable, lo será porque o bien presenta una serie de compuestos que son inhibidores o tóxicos para la degradación biológica o bien los compuestos en disolución son de difícil biodegradación (cinética lenta), o bien las dos condiciones anteriores en mayor o menor grado.

2.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La producción de biogás la determina el contenido de proteínas, hidratos de carbono y grasas que forman la biomasa o los sustratos que se co-digestionan. “La mayor cantidad de biogás se obtiene de las grasas, pero el mayor porcentaje de gas metano se obtiene de las proteínas (71 %)” (Perry L. McCarty, “Chemistry for environmental engineering and science”, 2003, pág. 198). La menor producción de metano se obtiene de los hidratos de carbono. Por estas razones es muy importante lograr una mezcla de sustrato equilibrada en donde se produzca la mayor cantidad de biogás, pero también el mayor contenido porcentual de gas metano.

La formación de biogás y la cantidad de CH₄ dependen de la composición de biomasa. Si se conoce la composición de la biomasa es posible calcular según la fórmula simplificada de Buswell³ la cantidad de biogás a producir y su contenido de CH₄ y CO₂.

La producción de biogás en un biodigestor involucra una serie de procesos interrelacionados que comprende toda la gestión, desde el suministro del sustrato o biomasa hasta su aprovechamiento.

Los volúmenes de biogás producido se expresan en (m³/Kg. MV), como (m³/Kg. DQO) ó en (l/Kg. MS) o (m³/Ton. de Masa Húmeda). Estos volúmenes difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga sobre volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo. “En general la producción promedio oscila entre 1 a 2 m³ de biogás/m³ de digestor, o dicho de otra manera entre 0.3 y 0.5 m³/Kg. MV o alrededor de 0.35 m³ de gas CH₄/Kg. DQO degradado. Hay sustratos como el pasto o el forraje de maíz que produce mayores cantidades de biogás por Kg. de MV” (Carrillo, “Microbiología Agrícola”, 2003, pág. 8).

En la práctica es casi imposible calcular empíricamente y/o con exactitud la producción de biogás de una biomasa o mezcla. Esto se debe a que se desconoce la cantidad exacta de nutrientes y componentes de la biomasa o de la mezcla. Las estimaciones se realizan en base a mediciones puntuales del contenido del nutriente, pero estos pueden variar en la biomasa día a día. Adicionalmente la mayoría de los cálculos del potencial teórico de producción de biogás en un biodigestor se los hace considerando una degradación del 100 % de la materia orgánica, lo que generalmente nunca sucede.

Tabla 2.4: Producción de biogás

Producción de Biogás De Varios Tipos de Biomasa	
Sustrato	Biogás (m³/kg MV)
Orujos agrícolas, cerveceros y de fabricantes de zumo	0,42 - 0,50
Residuos de Matadero y de la transformación de pescado	0,34 - 0,71
Residuos verdes de jardinería y agrícola	0,35 - 0,46
Residuos alimenticios y piensos	0,32 - 0,80
Orujos de la destilación de patata y cereales	0,48
Residuos orgánicos domésticos	0,40 - 0,58
Residuos de separadores de grasa	0,70 - 1,30
Purines agrícolas	0,22 - 0,55
Fango de procesos de depuración	0,45 - 0,75

³ Buswell y Boyle desarrollaron una fórmula científica que describe la composición del biogás después de la digestión anaerobia de acuerdo a la composición química de los sustratos de entrada a un proceso de digestión.

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 243.

Adicionalmente otros factores tienen mucha influencia en la producción de biogás, como el tiempo de retención hidráulica, la temperatura, el porcentaje de masa seca, masa volátil y la cantidad eventual de inhibidores de la producción de biogás contenidos en la biomasa.

Por un lado, la velocidad de degradación de la materia orgánica se consigue también aumentando la temperatura del proceso al interior del digestor. Pero solo se consigue hasta un cierto límite ya que no es posible aumentar la temperatura a valores muy elevados, debido a que las bacterias dejarían de producir biogás. Pero por otro lado hay que tener en cuenta que con el aumento de la temperatura, se consigue una mayor producción de CO₂ y por lo tanto una menor producción de gas metano. Esto ocasiona que el biogás que se produzca tenga un bajo poder calorífico.

El contenido de masa seca en una mezcla de biomasa tiene también influencia en la producción de biogás. Si este valor es muy elevado las bacterias no tienen espacio para moverse y crecer y solo degradan la materia presente en un reducido espacio. Si el contenido de MS alcanza valores de 40 % o más puede ocurrir el colapso del proceso, ya que en este caso no existe la suficiente humedad para que se desarrolle el proceso anaeróbico. Por otro lado también pueden ocurrir problemas con elementos inhibidores del proceso, ya que estos existirían en una concentración muy elevada. La producción de biogás también dependerá del grado de homogenización y mezcla de la biomasa. A mayor mezcla y agitación, mayor será la producción de biogás.

También se puede realizar el cálculo de la posible producción de biogás en base al contenido de moles de las grasas, hidratos de carbono y proteínas contenidas en la biomasa. En la tabla siguiente se presenta la cantidad de biogás que se obtiene de diferentes componentes de la biomasa en base a su contenido molecular.

Tabla 2.5: Componentes y producción de biogás

Componentes de Biogás y Producción de Diferentes Tipos de Biomasa				
Sustrato	Peso Molecular (g/mol)	Moles CO₂ y CH₄ en biogás (Moles)	Cantidad de Moles en Biogás (g/mol)	Posible Producción de Biogás
Hidratos de Carbono (C ₆ H ₁₂ O ₆ o (CH ₂ O) _n)	180	3 CO ₂ + 3 CH ₄	6 * 22,4 = 134,4	134,4 / 180 = 0,746
Grasas (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	256	4,5 CO ₂ + 11,5 CH ₄	16 * 22,4 = 358,4	358,4 / 256 = 1,39
Proteínas (C ₁₃ H ₂₅ O ₇ (N ₃ S))	367	5,125 CO ₂ + 7,857 CH ₄	13 * 22,4 = 291	291 / 367 = 0,79
Biomasa de Cultivos y Plantas (C ₃₉ H ₆₀ O ₂₆)	932	18 CO ₂ + 20 CH ₄	36 * 22,4 = 851	851 / 932 = 0,91

Fuente: Perry L. McCarty, “Chemistry for environmental engineering and science”, 2003.

2.3.1 FACTORES QUE INFLUENCIAN LA PRODUCCIÓN DEL BIOGÁS

La actividad metabólica involucrada en el proceso de producción de gas metano se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias que intervienen en las distintas etapas del proceso, responde en forma diferencial a la influencia de esos factores, no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Entre los factores más importantes que influyen la producción de biogás se tiene a los siguientes:

- Ausencia de oxígeno
- Tipo de biomasa (nutrientes disponibles)
- Carga de alimentación
- Nutrientes
- Relación carbono/nitrógeno
- Grado de mezclado de la biomasa
- Temperatura del proceso
- Tiempo de retención hidráulico (TRH)
- Nivel de acidez (pH)
- Agregado de inoculantes
- Presencia de compuestos inhibidores del proceso

Tabla 2.6: Parámetros físicos-químicos para una óptima digestión anaeróbica

Valores mínimos de parámetros físicos y químicos necesarios para la digestión anaeróbica	
pH	6,5 - 8,0
Contenido de sales	2,5 hasta 25 mS/cm.
Temperatura	8 hasta 55 °C
Oxígeno	<1 ppm
Hidrógeno	6 Pa
Carbono total	0,2 hasta 50 g/l DQO
Sodio	45 hasta 200 ppm
Potasio	75 hasta 250 ppm
Magnesio	10 hasta 40 ppm
Azufre	50 hasta 100 ppm
Hierro	10 hasta 200 ppm
Níquel	0,5 hasta 30 ppm
Cobalto	0,5 hasta 20 ppm
Molibdeno, Wolframio, Selenio	0,1 hasta 0,35 ppm
Cinc	0 hasta 3 ppm
Fosfatos	50 hasta 150 ppm

Fuente: Morales P., "Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento", Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005.

a) Ausencia de oxígeno

Las bacterias metanogénicas son los seres vivos más antiguos que existieron sobre nuestro planeta. Se formaron hace 3 o 4 billones de años, cuando en la tierra no existía la atmósfera como nosotros la conocemos en la actualidad. Por esa razón las bacterias metanogénicas sólo pueden existir en ambientes anóxicos⁴. La razón por la cual las bacterias metanogénicas no se mueren o se inhiben inmediatamente en presencia de oxígeno es porque viven en conjunto con otras bacterias que se formaron en los procesos previos. Sin embargo, el efecto inhibitorio del oxígeno no es permanente, ya que en la flora bacteriana existen también microorganismos facultativos que irán consumiendo el oxígeno que pueda tener el medio. Estas son las bacterias facultativas que pueden vivir en presencia de oxígeno y en ausencia de él. Es por esta razón que para que ocurra un proceso anaeróbico óptimo deben crearse las condiciones para un medio totalmente libre de oxígeno al interior del digestor. “Mientras el contenido de oxígeno en el digestor sea menor que el 3-5 % puede desarrollarse el proceso anaeróbico sin consecuencias negativas” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004, pág. 58).

b) Tipo y calidad de biomasa

La producción de biogás es influenciada por el tipo de biomasa con la que se alimenta al digestor. Hay determinados tipos de biomasa como la gallinaza, pastos, maíz, etc. que producen más biogás que otros, como el estiércol de cerdo o ganado. La producción de biogás depende de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que tenga esta biomasa.

El proceso anaeróbico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

La selección del tipo de biomasa influye en la producción de biogás. Generalmente la biomasa con alto contenido de grasas, proteínas e hidratos de carbono es la que más biogás produce. Debido a esta característica es entendible que se quiera alimentar al digestor únicamente con este tipo de biomasa, pero los digestores necesitan un amplio espectro de nutrientes. Por lo tanto hay que tener en cuenta que lo más conveniente es la preparación equilibrada de una mezcla de biomasa para alimentar al digestor. Hay que buscar siempre un punto de equilibrio

⁴ Ambiente sin la presencia de oxígeno

entre la selección de biomasa para la producción de una mayor cantidad de biogás y una biomasa de alto contenido de nutrientes esenciales para el crecimiento de las bacterias.

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos agroindustriales, puede presentarse el caso de que sea necesaria la adición de otros nutrientes esenciales. En lo referente a estiércoles de animales la degradación biológica de cada tipo de biomasa dependerá básicamente del tipo de animal y de su alimentación.

La calidad de la biomasa es un factor importante que tiene influencia directa en la producción de biogás. Por esta razón es importante que en algunos casos se de una preparación previa a la biomasa. Básicamente hay que tener en cuenta que la biomasa tenga una buena calidad. Por ejemplo, no es recomendable que se alimente al digestor con biomasa podrida y/o fermentada. Esta biomasa puede inhibir el proceso anaeróbico y colapsar el proceso de digestión. Siempre hay que tener en cuenta que al interior del digestor ocurre un proceso con seres vivos (bacterias) que necesitan adecuadas condiciones para vivir. En países europeos se aplica la regla de que solo se alimenta al digestor con biomasa que pudiera todavía servir como alimento animal.

Tampoco debe cambiarse en forma frecuente el tipo de biomasa o de mezcla con la que se alimenta al digestor. Tampoco se podría alimentar al ganado con diferentes tipos de alimentos todos los días. El ganado se enfermaría y dejaría de comer. Este es el mismo caso en los digestores. Si se cambia repentinamente el tipo de biomasa es probable que las bacterias se mueran o que colapse el proceso anaeróbico. En casos en los que sea necesario un cambio en el tipo de biomasa, este debe realizarse paulatinamente y en un período de varios días para que las bacterias se vayan acostumbrando a la nueva biomasa.

La biomasa debe ser preparada previa a la alimentación del digestor. Se debe retirar todo material extraño como palos, piedras, basuras, plásticos, etc. Esta actividad es necesaria para evitar el taponamiento de tuberías, formación de espumas, capas en la base, fallas de proceso o daños de bombas y elementos de agitación. Estas etapas de pretratamiento requieren de maquinaria sofisticada y frecuentemente causa considerables costos operacionales. Particularmente la biomasa que viene directamente de las cosechas debe ser trozada o cortada para que se alimente al digestor. Mientras más cortada o trillada sea una biomasa mayor va a ser la probable producción de biogás, ya que la biomasa tendrá una mayor superficie de contacto para la acción de las bacterias metanogénicas. De otra manera puede suceder que la biomasa no se degrade y que cuando cumpla su tiempo de retención en el digestor sea extraída y no se haya degradado.

También el pH de la biomasa tiene influencia en la producción de biogás. Hay que considerar que durante el proceso anaeróbico hay fluctuaciones del pH que pueden ser soportados y equilibrados por el digestor, siempre y cuando el pH se maneje dentro de ciertos rangos. Si se alimenta al digestor con biomasa con un pH demasiado bajo, por ejemplo aguas de proceso o forrajes, puede ocurrir una inhibición del proceso. En este caso hay que regular el pH de la biomasa antes de su ingreso al digestor. También pueden formarse muchas espumas al interior del digestor si el pH de la biomasa que se carga es diferente del pH al interior del digestor.

La co-digestión ofrece muchas ventajas ecológicas, tecnológicas y económicas mejorando el balance de nutrientes. La digestión de una variedad de sustratos en lugar de un solo tipo de residuo mejora la relación C:N:P de nutrientes del cual óptimamente debería ser alrededor de 300:5:1. Este también mantiene una razonable mezcla de minerales (Na, K, Mg, Mn, etc.) así como también una balanceada composición de trazas de metales. La co-digestión mejora el proceso de digestión e incrementa la generación de biogás, esto podría ser atribuido a la presencia de nutrientes y la reducción/dilución de sustancias inhibitoras debido a la mezcla de los residuos.

El suministro y transporte de biomasa juega un papel muy importante únicamente en el aprovechamiento de sustrato que no se produzca en la misma instalación o predio en donde se construye el digestor. Es importante que se implementen un sistema de preparación y adecuación de la biomasa, y se disponga equipos para el control y el pesaje de biomasa. Se debe también controlar y protocolar la calidad y cantidad de biomasa que se alimenta al digestor.

c) Almacenamiento

Los silos de almacenamiento sirven para equilibrar variaciones en la demanda y producción de biomasa. La forma y tamaño de los silos depende del tipo de biomasa y del flujo de aprovechamiento. En épocas de cosecha y bajo aprovechamiento de biomasa se debe prever suficiente volumen para almacenamiento. Si se aprovechan desechos agroindustriales con desechos agropecuarios, se debe separar el almacenamiento de la biomasa. No se debe mezclar con la biomasa que debe ser previamente higienizada antes de su aprovechamiento en digestores. En caso de silos cerrados hay que tomar precauciones para que no se acumulen malos olores o haya degradación de materia orgánica debido a ausencia de oxígeno.

d) Preparación de la biomasa

Cada tipo de biomasa requiere de tratamientos diferentes, dependiendo de la consistencia de dicha materia prima. Ejemplos de pretratamiento incluyen:

- Separación de sólidos inertes y materiales extraños como ladrillo, arena, gravas, troncos, etc.
- Acondicionar los residuos vegetales tales como pasto, paja, hojas, mediante un proceso de picado fino, molienda, maceración, etc. Los equipos para esto pueden ser costosos.
- Mezcla y homogeneización de residuos y precalentamiento o enfriamiento.
- Reducir el tamaño de las partículas para aumentar la superficie para los microorganismos y hacer más eficiente el proceso de digestión.

La magnitud y tipo de preparación de la biomasa tiene una gran influencia en la eficiencia del proceso al interior del digestor. A mayor y mejor preparación de la biomasa, mejor eficiencia y mayor producción de biogás. La preparación de la biomasa tiene como meta mejorar y optimizar el proceso de degradación de la materia orgánica.

e) Clasificación, eliminación de materia extraña

La magnitud y alcance de este proceso depende del tipo de biomasa y su procedencia. La biomasa se debe clasificar en un tanque de pretratamiento o en el mismo tanque de mezcla. En caso de que la biomasa contenga mucho material extraño (piedras, palos, plásticos, etc.) se debe prever una rejilla antes de la tubería de descarga para la retención de sólidos y basuras.

f) Higienización

En caso de que se aprovechen desechos de restaurantes, de mercados o restos de animales, y de acuerdo a las regulaciones y normas en cada país, se debe higienizar la biomasa antes de su alimentación al digestor. A través de la higienización se eliminan bacterias, parásitos y virus. Se reduce el riesgo de contaminación y transmisión de enfermedades. La higienización se la realiza calentando la biomasa a una temperatura de 70 °C durante una hora.

El proceso de higienización se lo efectúa en tanques de acero y hormigón. Después de la higienización, y previo a la alimentación de la biomasa en el digestor, hay que reducir la temperatura de la biomasa a la temperatura del proceso.

g) Troceado, trillado de la biomasa

No se debe ingresar al digestor pedazos grandes de biomasa, como repollos enteros, frutas enteras, verduras enteras. La biomasa debe ser despedazada, troceada, desmenuzada para que se degrade más eficiente y rápidamente en el digestor. Mientras más pequeñas sean las partículas de biomasa, más superficie de contacto tienen para que las bacterias se puedan

alimentar y producir biogás. Se logra una velocidad mayor del proceso de degradación de la materia orgánica, alimentando al digestor con materia bien desmenuzada o troceada.

La producción de metano puede también depender del tiempo de retención y del grado de troceado de la materia orgánica. La biomasa se trocea o desmenuza por medio de mezcladores, aspas, molinos, etc.

h) Mezcla y homogenización

Es necesaria la mezcla y homogenización de la biomasa con agua, para alcanzar el grado de dilución requerido. La biomasa debe mezclarse con suficiente agua para alcanzar el grado de dilución. El grado de dilución debe ser del 5 – 15 %. Este valor corresponde al contenido de masa seca. Un porcentaje del 10% significa que la mezcla tendrá un 10% de masa seca y un 90% de humedad (agua). Los contenidos de masa seca mayores al 15% inhiben el proceso de degradación en el digestor.

Para homogenizar la biomasa se puede utilizar agua, biol o aguas de procesos. El biol es el efluente del digestor, se lo puede recircular desde el tanque de descarga al tanque de homogenización. La inoculación de la biomasa con biol favorece el proceso de digestión, ya que la biomasa se inocula con bacterias digeridas o fermentadas. Si se utiliza agua de algún proceso para la homogenización hay que tener en cuenta que no contenga trazas de desinfectantes o elementos químicos que inhiban la producción de biogás.

La homogenización se la realiza en tanques por medio de mezcladores o agitadores.

i) Carga de alimentación

Idealmente se debe alimentar al digestor en forma continua. En la práctica pocas veces es posible por lo que se habla de una alimentación casi continua. La alimentación debe hacerse durante todo el día, en lo posible cada hora. Este proceso puede automatizarse. No es recomendable que se mezcle u homogenice la biomasa en los tanques de alimentación, si esta no se alimenta inmediatamente al digestor. Preferentemente solo se debe homogenizar la biomasa con la que se va a alimentar en ese momento al digestor.

Dentro de los parámetros del efluente que deben medirse a la entrada del reactor están: la cantidad de sólidos totales (que es la concentración de sólidos en un determinado volumen de agua); la cantidad de sólidos volátiles (que indica la cantidad de material que puede ser usado como alimento por las bacterias e indirectamente la cantidad de arena); el factor de carga orgánica volumétrica (COV) y el tiempo de retención hidráulico que se relaciona con el crecimiento bacteriano y su descarga.

La concentración de los lodos se determina mediante la prueba de sólidos totales. Esta prueba elimina el contenido de agua de una muestra pesada y por diferencia se determina el porcentaje de sólidos presentes. La muestra deberá ser tomada de un punto en donde exista una buena agitación para que sea representativa, ya sea de lodo crudo, de lodos digeridos, etc.

El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir en el digestor debe ser de 5 a 15%. Se logra esta dilución mezclando la biomasa con agua o recirculando biol o bioabono. En digestores operados con estiércol de ganado los valores óptimos de operación oscilan entre 8 y 10% con límites del 12%. Esta dilución es importante para establecer un mejor contacto de las bacterias con el sustrato. Mezclas de biomasa con porcentajes de masa seca mayor al 15% son difíciles de bombear por las tuberías de alimentación al digestor. También son muy difíciles de agitar en el digestor o se requiere de grandes cantidades de energía para la agitación.

Tabla 2.7 Contenido de agua (biomasa – MS) de diferentes sustratos

Sustrato	Contenido de agua (%)
Vinazas	90 – 94
Cereales	12 - -15
Estiércol de cerdo	85-95
Gallinaza	65-85
Forraje de maíz	65-80
Estiércol de ganado	85-95
Frutas – verduras	82-95

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 73.

De la concentración de sólidos totales que entran al digestor solo un porcentaje esta disponible para la biodegradación, este porcentaje se determina mediante una prueba de sólidos volátiles. “El remanente de la prueba de sólidos totales se somete a una temperatura de 550° C hasta obtener una ceniza blanca (que es el contenido de materia inorgánica presente), esta ceniza se pesa y se resta del peso de los sólidos totales, el resultado es la cantidad de sólidos volátiles” (Clesceri, Lenore, Greenberg, Arnol, “Standard Methods for the examination of water and waste water”, 1998).

El conocimiento de los sólidos volátiles es importante ya que solo este porcentaje es el contenido real de masa orgánica en la biomasa. El resto es humedad, trazas inorgánicas y otras materias que no producen biogás. Solo este contenido de STV es el que produce el biogás durante la digestión anaeróbica en el biodigestor. El contenido de humedad (agua) no produce biogás, pero facilita el proceso de digestión.

En base a estos parámetros, existen dos factores de carga distintos: el factor de carga orgánica volumétrica (COV) y el de carga hidráulica. Además de ser indicadores del proceso nos

permiten evaluar la eficiencia del digestor. El factor de carga orgánica es la cantidad de alimento que entra como sólidos volátiles por día y se calcula como kilogramos de sólidos volátiles por día por metro cúbico del volumen activo del digestor.

$$Carga\ orgánica = \frac{Kg.\ lodo\ crudo/día \cdot \% \text{ contenido sólidos volátiles}}{volumen\ disponible\ del\ digestor} \quad (2.11)$$

El valor de la COV depende mayormente de la temperatura del proceso al interior del digestor y del tiempo de retención hidráulica (TRH). La COV es considerada como un parámetro para controlar la carga del digestor y es un factor determinante para el dimensionamiento del digestor. Si el sustrato está muy diluido, las bacterias no tienen suficiente alimento para vivir, mientras que un exceso en sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y por consiguiente la efectividad del proceso, ya que les impide acceder al alimento.

Si se mantiene constante el volumen del digestor (m^3) y se aumenta la COV, disminuye el TRH. En este caso las bacterias tienen menor tiempo para degradar la materia orgánica y para producir biogás. “Para cargas de COV mayores a $3\text{ kgSTV}/m^3$ se puede dar el caso de que la materia orgánica se descargue del digestor a través del efluente, sin que se haya degradado” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005).

j) Temperatura del proceso

“El rango de temperatura para la digestión anaeróbica tiene tres rangos: rango psicrófilico (por debajo de 25°C), mesófilico (entre 25 y 45°C) y otro termófilico ($45 - 60^\circ\text{C}$). Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperaturas mesófilas y la digestión óptima se obtiene a unos 35°C ” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005). La velocidad de degradación a temperaturas superiores a 45°C es mayor que a temperaturas más bajas, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a los cambios ambientales como una disminución repentina de solo unos pocos grados.

La velocidad de degradación de la materia orgánica aumenta con la temperatura, aunque también aumentan los requerimientos energéticos. Esto puede ocasionar la disminución de la estabilidad del proceso, al menos en presencia de determinadas sustancias tóxicas.

La producción de biogás, en ausencia de inhibidores, aumenta con la temperatura, puesto que aumenta la tasa de crecimiento de los microorganismos. Temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos, y por tanto mayores volúmenes de digestor.

El régimen termofílico se ha relacionado tradicionalmente con mayores problemas de inestabilidad. Sin embargo otros autores consideran que las plantas termofílicas son tan estables y tan operables como las mesofílicas, presentando, además de las ventajas antes mencionadas, una mayor producción de biogás por unidad de sólidos volátiles y una mejora en el postratamiento, ya que el efluente de la digestión termofílica es más fácilmente deshidratable, junto con una menor producción de malos olores.

Tabla 2.8: Temperaturas óptimas y máximas, parámetros cinéticos de cultivos

Temperatura óptima y máxima, parámetros cinéticos de crecimiento de diferentes cultivos metano genéticos acetoclásticos				
Metano génicos Acetoclásticos	T_{opt.} (°C)	T_{máx.} (°C)	μ_{máx.} (d⁻¹)	K_s (Ac) mgDQO/l
Methanosarcina barkeri	35-40	-	0,023	320
Methanosarcina thermophila	50	55-60	0,058	288
Methanosarcina CALS-1	55-58	60	0,058	-
Methanosarcina MP	55	60	-	-
Methanosarcina MSTA-1	55	65	0,053	685
Methanosarcina SHTI55	57	63	0,085	614
Methanohirx soehngeni	37	45-50	0,0085	45
Methanohirx concilii	35-40	40-45	0,029	77
Methanosaeta sp.P _T	55	65-70	0,020	-
Methanohirx sp. CALS-1	60	65-70	0,028	<64

Temperaturas óptimas y máximas y parámetros cinéticos de cultivos (continuación)

Methanohirx thermoacetophila	65	70	-	-
Co-cultivo oxidante de acetato	60	-	0,019	-

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 78.

La mayoría de las bacterias termofílicas presentan tasas específicas de crecimiento máximas mayores que los organismos mesofílicos. “La temperatura normal de operación dentro del rango termofílico está sobre los 55°C (52 – 56° C). Por encima de este nivel los organismos acetogénicos disminuyen drásticamente su velocidad de crecimiento. Sin embargo, la tasa específica de crecimiento de los microorganismos metanogénicos continua aumentando hasta los 70 °C” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005).

La sensibilidad a los cambios de temperatura ambiental depende de diversos factores, principalmente del grado de adaptación de las bacterias, del modo de operación y del tipo de biodigestor. En el rango termofílico un aumento brusco de la temperatura puede provocar un importante descenso en la producción de biogás. Mientras que una bajada puede suponer un descenso en la producción de biogás pero completamente reversible, o puede no mostrar diferencias, debido a la disminución del efecto de inhibición por amoníaco. Para pasar un digestor del rango mesofílico al termofílico sin que se produzca una paralización en la producción de biogás, se deberá realizar el proceso de cambio muy lentamente.

El efecto inhibitorio del amonio es mayor en el rango termofílico que en el mesofílico por el aumento de la concentración de la forma tóxica, NH_3 , al aumentar la temperatura, a pesar de la mayor sensibilidad de los microorganismos mesofílicos al amoníaco libre. Un problema adicional al de inhibición por amonio es la mayor tasa de hidrólisis de proteínas en el rango termofílico frente al mesofílico.

El tratamiento termofílico presenta la importante ventaja de la mayor eliminación de organismos patógenos, que puede ser un factor clave en función del destino final del efluente, sobre todo para su uso como fertilizante orgánico. Un tratamiento termofílico por encima de 50°C reúne en un solo paso el tratamiento de higienización y el de digestión anaerobia. El proceso de digestión anaerobia produce la inactivación de algunos virus patógenos (enterovirus y parvovirus), pero la tasa de inactivación depende del tipo de virus, de la duración del proceso y de la temperatura de operación.

Una técnica interesante, especialmente en instalaciones ya existentes de digestión de lodos de depuradora, es la combinación de dos fases de digestión, una primera de alta carga en temperaturas termofílicas y una segunda con menor carga en temperatura mesofílica. Con este sistema aprovechan las ventajas del sistema termofílico (reducción de patógenos, menos problemas de formación de espumas) y evitar problemas de inestabilidad.

De forma general, a altas temperaturas las tasas de las reacciones químicas y biológicas son más rápidas que a bajas temperaturas. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables, que a su vez es dependiente de la temperatura.

Al aumentar la temperatura disminuye la solubilidad de los gases NH_3 , H_2S y H_2 , favoreciéndose la transferencia líquido-gas, y por tanto desapareciendo más rápidamente del medio acuoso. La solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura. Las sales orgánicas son más solubles a altas temperaturas, por lo que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar su solubilidad con la temperatura serán

potencialmente más tóxicos, lo que puede explicar parcialmente la mayor inhibición de determinados compuestos orgánicos en el rango termofílico, como los ácidos grasos de cadena larga.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el digestor. Esto se debe a que los demás grupos de bacterias crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un metabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas. Los niveles de reacción química y biológica aumentan generalmente con el incremento de la temperatura hasta un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación de metabolismo, debido a la degradación de las enzimas, lo que es crítico para la vida de las bacterias.

Todas estas consideraciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor, ya que a pesar de incrementarse la eficiencia y producción de biogás, paralelamente aumentarán los costos de instalación, de operación y mantenimiento y la complejidad de la misma. Los digestores que trabajan a temperaturas mesofílicas y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislamiento y control, los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas.

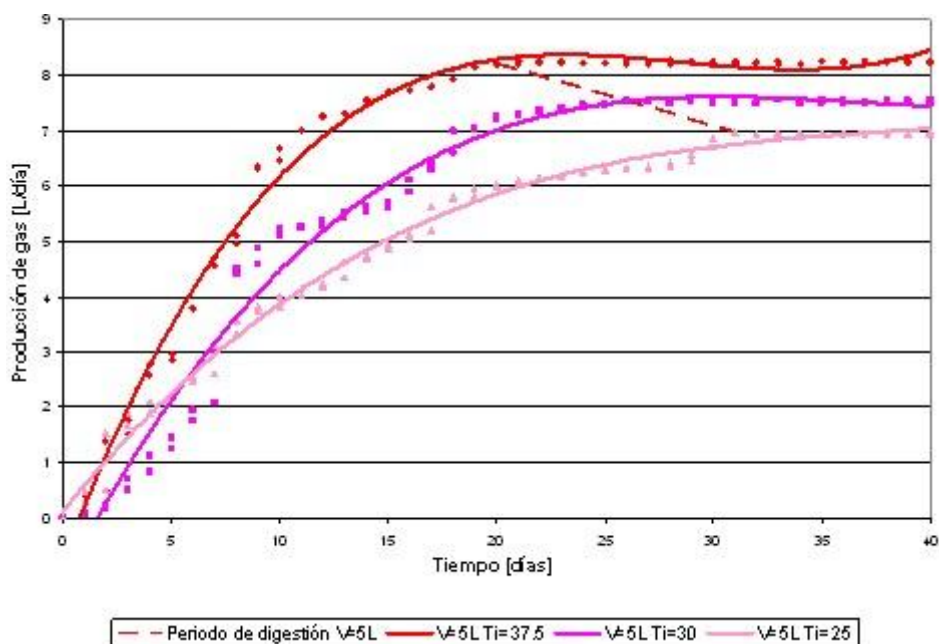


Figura 2.6: Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás

k) Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El TRH es el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor. No existe un criterio unificado para determinar el tiempo de retención. Este valor depende de la temperatura ambiental y de la carga orgánica del digestor. Estos dos valores determinan el volumen del digestor. El TRH seleccionado para una biomasa determinada depende de la degradabilidad de la materia orgánica. Materia de fácil degradación requiere de un menor TRH.

El TRH sólo puede ser claramente definido en los sistemas de carga continua, donde el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semi continuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria como se muestra a continuación. El tiempo de retención determina el tiempo de permanencia de la biomasa al interior del digestor hasta su descarga. Indica también indirectamente la carga del digestor con materia orgánica, ya que a menor tiempo de retención menos tiempo tienen las bacterias para la degradación de la materia orgánica.

$$TRH = \frac{\text{Volumen del digestor, } L}{\text{Flujo de entrada, } L / d} \quad (2.12)$$

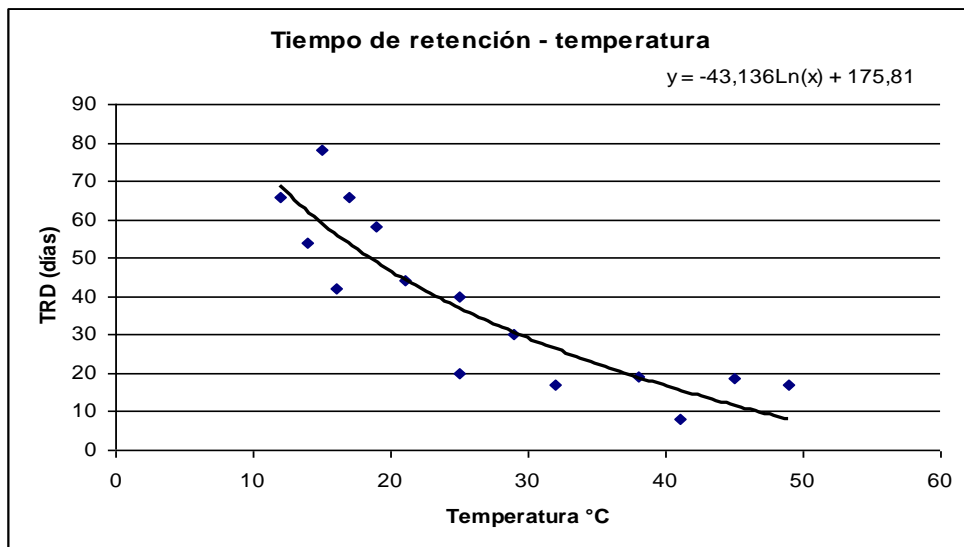


Figura 2.7: Influencia de la temperatura sobre la TRH

El TRH está también íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura de proceso implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes del digestor necesario para digerir un determinado volumen de biomasa. Este es el caso de las vinazas o efluentes de las extractoras de aceite de palma africana que tienen temperaturas de hasta 75 °C.

“Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos” (Unidad de planeación minera energética (UPME), “Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás”, 2003).

Con el aumento de la carga de biomasa al digestor y reducción del TRH aumenta la productividad de las bacterias, pero por el aumento de la carga volumétrica disminuye la producción de biogás. La tasa de producción de biogás aumenta proporcional a mayor carga del digestor hasta alcanzar un punto máximo. Por causa de la creciente carga de biomasa por unidad de tiempo, no se puede degradar la materia orgánica y decae la producción de biogás. Si se sigue acortando el TRH se disminuye rápidamente la producción de biogás, ya que debido al corto TRH se descarga materia orgánica sin que esta se haya degradado al interior del digestor.

Por estas razones expuestas hay que tener muy en cuenta durante la puesta en marcha y operación de los digestores, que la alimentación con biomasa vaya aumentando paulatinamente y que no se exceda los volúmenes máximos de biomasa que se puede alimentar al digestor. En la práctica nunca se alcanza una máxima producción de biogás, por lo que es conveniente encontrar un punto de equilibrio entre la estabilidad del proceso y la producción de biogás.

En países de clima frío y con alta experiencia en la construcción de digestores como Dinamarca, se dimensiona los digestores para un TRH de 16-20 días mientras que en Alemania se dimensiona para un TRH de 45-60 días. En estos dos países hay que considerar que las temperaturas promedio anuales son de 5 °C con un promedio de 70 días de verano con temperaturas mayores a 21 °C.

Si el TRH se elige demasiado corto las bacterias no tienen tiempo de formarse y crecer, las bacterias necesitan aunque sea los días necesarios para duplicarse. Por esta razón se considera como límite inferior un TRH de 10 días como mínimo para la producción de bacterias. El límite superior del TRH, está dado por aspectos económicos. En algún momento puede ocurrir que el TRH sea muy grande y que la producción de biogás sea muy baja y por lo tanto, baje la rentabilidad.

Por todas estas razones es necesario que el TRH se elija considerando también el aspecto económico. El TRH debe ser seleccionado considerando los siguientes aspectos:

- $COV \leq 3 \text{ kgMV/m}^3 \cdot \text{d}$
- Que permita una variación en el tipo de cantidad de biomasa dentro de ciertos parámetros.

- Que el volumen de biodigestor que se obtenga permita aumentos del $\pm 10\%$ en la cantidad de biomasa que se alimenta al digestor.

Por esta razón cuando se dimensiona un digestor se debe considerar un volumen de seguridad del 20 % adicional.

Se ha determinado en ensayos de laboratorio que dependiendo del tipo de biomasa la producción de biogás se termina a las 4-6 semanas. Si se estima un rango de seguridad se determina que la producción de biogás terminará en 8 semanas.

I) Acidez

Es uno de los parámetros de control más importantes, debido a que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad ante variaciones del mismo. “Si el valor del pH se mantiene entre 6,5 y 7,5 se consigue un buen rendimiento de degradación y una elevada concentración de metano” (Unidad de planeación minera energética (UPME), “Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás”, 2003). La digestión comienza a inhibirse a pH menor que 6,5. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y entre ellos el acetato, tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. Sin embargo, el equilibrio CO_2 – bicarbonato opone resistencia al cambio de pH. Comúnmente la concentración de AGV no supera los 2-3 g/l, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel, la digestión cesará en dos o tres días debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen.

Para lograr un adecuado funcionamiento de los sistemas anaerobios es indispensable generar las condiciones ambientales favorables para el desarrollo y crecimiento de las bacterias metanogénicas y de esta manera lograr las eficiencias de producción de biogás estimadas para cada proyecto.

Varios productos químicos pueden ser utilizados para el control del pH. Dentro de estos productos se pueden citar a la cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cal virgen (CaO), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), hidróxido de sodio (NaOH), y bicarbonato de amonio (NH_4HCO_3). Estos productos químicos pueden ser diferenciados en dos grupos:

- Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente como NaOH , NaHCO_3 , NH_4HCO_3
- Los que reaccionan con gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática como CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NH_3 .

La cal es aplicada usualmente para reducir el pH, por ser más barata y común, pero por ser un compuesto o producto bastante insoluble puede ocasionar serios problemas operacionales al digestor. El gas carbónico presente en el digestor reacciona con la cal para formar bicarbonato de calcio pudiendo provocar un vacío en digestores cerrados. Si la disponibilidad de gas carbónico no es suficiente para reaccionar con la cal, el pH final puede ser aún más elevado, lo que puede ser más perjudicial que un pH bajo. Adicionalmente se pueden formar en el fondo del digestor precipitados e incrustaciones que pueden presentar serios problemas operativos.

El bicarbonato de sodio es bastante fácil de manipular y es bastante soluble a diferencia de la cal, no requiere gas carbónico pero su costo operativo es más elevado. Para bajar el pH se puede utilizar ácido clorhídrico o sulfato ácido de sodio (bisulfato sódico).

El pH es también una importante variable de diagnóstico de los sistemas anaerobios, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Ejemplos clásicos son las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica, que pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, produciendo la acumulación de éstos y el consiguiente descenso del pH, produciéndose la acidificación del digestor. En función de la alcalinidad del medio, la bajada de pH será más o menos rápida. En residuos ganaderos, que presentan altas alcalinidades, la bajada de pH será poco importante incluso aunque se produzcan importantes acumulaciones de ácidos.

La capacidad de amortiguamiento del pH se mide de la siguiente manera. Se toma una muestra de 100 ml. de sustrato del interior del digestor y se mide el valor del pH. Cuando la medición se mantiene estable en el mismo valor se agrega 0.1 mol/l de ácido hidrociorídico (HCl).

Primero se adiciona la mitad hasta llegar a un pH de 5. La cantidad de HCl adicionado hasta alcanzar el pH=5 es la medida para determinar la capacidad de amortiguamiento del sustrato. Después se adiciona HCl hasta que el pH baja a 4.3. Este valor es una medida para la determinación de los ácidos orgánicos volátiles. Cuando llega a un pH=4.3 se llega a un punto en el cual se conoce que el sustrato ya no contiene hidrógeno de carbono y por lo tanto nada de carbonatos. Es decir el sustrato ya no tiene capacidad buffer alcalina. La cantidad de HCl que debe adicionarse para alcanzar este valor de pH es una medida de la capacidad buffer alcalina. Como parámetro de medición se entiende la relación de la cantidad de ácido para alcanzar un pH de 5 a 4.3 sobre la cantidad de ácido para alcanzar al comienzo un valor de pH=5. Esta relación debe ser menor a 0.3. Si esta relación es mayor se determina que el proceso está sobrecargado o inestable.

m) Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio. Esta capacidad tampón puede ser proporcionada por amplio rango de sustancias, siendo por tanto una medida inespecífica. En el rango de pH de 6 a 8, el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el dióxido carbono-bicarbonato. “La relación de alcalinidad se define como la relación entre la alcalinidad ocasionada por los AGV y la debida al bicarbonato, recomendándose no sobrepasar un valor de 0.3-0.4 para evitar la acidificación del digestor. La alcalinidad al bicarbonato debe mantenerse por encima de 2500 mg/l para asegurar la estabilidad del digestor” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005).

n) Porcentaje de degradación

El grado de degradación indica el porcentaje de la masa orgánica que se degrada durante el tiempo de retención y se transforma en biogás. La degradación total de la biomasa orgánica hasta su mineralización sería solo posible si la biomasa no tuviese lignina⁵. En la práctica se requeriría tiempos de retención muy grandes para lograr una degradación total de la biomasa.

La degradación de la biomasa en un digestor no es constante, empieza en forma acelerada y después es bastante lenta. Los últimos porcentajes de biogás (si se trata de lograr una total degradación de la biomasa) se podrían lograr teóricamente con grandes volúmenes de digestor.

El porcentaje de degradación que se alcanza en un digestor depende también del tipo de biomasa, del tipo de animal y de su alimentación. Si se co-digestionan varios tipos de biomasa, depende de las características físico-química de los componentes de la mezcla en el digestor.

En la práctica se logra un porcentaje de degradación del 35 al 75%. En término medio se puede lograr un porcentaje de degradación de aproximadamente el 65%. Si se trata de digestores que se alimentan con cultivos energéticos como el maíz, pasto, trigo, etc., se puede lograr un porcentaje de degradación en promedio del 80%.

A continuación se presentan resultados de una evaluación realizada en laboratorio para determinar el % de degradación en relación al TRH.

Tabla 2.9: Degradación en relación de temperatura de proceso y TRH

Degradación de la biomasa en relación de temperatura de proceso y TRH					
Caso	Tipo de biomasa	Temperatura °C	COV kgMV/m ³ días	TRH (días)	Tasa de degradación

⁵ La lignina es el constituyente intercelular incrustante o cementante de las células fi-brosas de los vegetales.

					%
1	Vacuno general	21	2	33	55
4	Vacuno majada	33	1,1	32	50
6	Cerdo	14	0,7	30	49
7	Vacuno y cerdo	30	1,7	25	53
9	Gallinaza y vacuno	33	1,4	33	48

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 92.

o) Nutrientes

Para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana, es necesario un aporte de nutrientes a las células y bacterias. Estos nutrientes como carbono, fósforo, nitrógeno, azufre y algunas sales minerales deben estar presentes en el sustrato que se alimenta al digestor. Las pequeñas concentraciones de sodio, potasio, calcio, molibdeno o hierro favorecen la descomposición del sustrato y la formación de metano.

Además de una fuente de carbón orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las bacterias que producen metano, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

Tabla 2.10: Concentraciones de nutrientes

Rangos de concentración de nutrientes necesarios para el correcto crecimiento de las bacterias anaerobias		
Nutriente	g/kg SSV	g/kg DQO
Nitrógeno	80-120	55-85
Fósforo	10-25	7-18
Azufre	10-25	7-18
Hierro	5-15	7-11

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 93.

p) Agitación, mezclado

La agitación de los digestores anaerobios tiene diversos objetivos, que se resumen en los siguientes puntos: Poner en contacto el sustrato fresco o afluente con la población bacteriana, y eliminar los metabolitos⁶ producidos por los metanogénicos al favorecer la salida de los gases, remoción de las burbujas de biogás producidos por las dichas bacterias, proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana, prevenir la formación de capa superficial (costras) y de espumas, así como la sedimentación en el digestor; prevenir la formación de

⁶ Cualquier molécula utilizada o producida durante el metabolismo.

espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del digestor, manteniendo una temperatura uniforme en todo el digestor.

Algunos tipos de digestores pueden funcionar bien sin ningún sistema de agitación. Se suelen utilizar para sustratos con muy alto contenido en sólidos o para sustratos básicamente solubles, con regímenes de flujo tipo pistón.

Para la elección de un determinado sistema de agitación se debe tener siempre presente tanto los objetivos buscados como el prejuicio que puede causar una agitación excesiva debiéndose buscar un punto medio óptimo. Existen varios mecanismos de agitación utilizados desde los más simples que consisten en un batido manual o el provocado por la entrada y salida de los líquidos hasta sofisticados equipos que involucran agitadores a hélice, recirculadores de sustrato e inyectores de gas.

2.3.2 FACTORES QUE INHIBEN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La digestión anaerobia como todos los procesos biológicos es susceptible a la acción de materiales y sustancias que en cantidades o concentraciones altas resultarán tóxicas o inhibitorias para la actividad microbiana. Usualmente los problemas de toxicidad se detonan cuando alguno de los siguientes compuestos se introduce al proceso:

- Hidrocarburos, derrames accidentales de algún derivado del petróleo como gasolina, diesel, grasas, aceites para motores, etc.
- Metales pesados, provenientes de las descargas de las industrias de la platería, joyería, curtidoras, etc.
- Sulfuros, provenientes de la metalurgia, minas de carbón, etc.
- Fenoles y resinas plásticas, residuos orgánicos en general, provenientes de la industria química, producción de pinturas, manufactura de muebles y producción de carbón y gas.
- Insecticidas y fungicidas.
- Amoníaco, en este caso el amoníaco se forma dentro del digestor cuando desechos con alto contenido de proteínas son alimentados.

“Es importante señalar que la toxicidad está en función de la concentración, efectos de antagonismo⁷ y sinergismo⁸, formación de complejos y aclimatación” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 95). La concentración es muy importante ya que muchos de estos compuestos sirven como estimuladores del proceso a bajas concentraciones. La tasa de crecimiento aumentará conforme la concentración se eleve hasta llegar a ser constante, y eventualmente disminuirá.

⁷ Es la reducción del efecto tóxico de una sustancia por la presencia de otra.

⁸ Es el incremento de la toxicidad aparente de una sustancia por la presencia de otra en el medio ambiente.

En general, cuando una sustancia se encuentra por debajo de su concentración límite, servirá como estimulador; cuando ya haya sobrepasado este límite la actividad metabólica comenzará a mermar, y se dice entonces que la sustancia tiene un efecto tóxico. De esta forma, una sustancia puede ser considerada como sustrato o como tóxico dependiendo del rango en el que se encuentre su concentración. Los efectos de antagonismo y sinergismo también están en función de la concentración. Estos efectos suelen presentarse entre sustancias que tienen una relación química.

La magnitud del efecto tóxico provocada por una sustancia puede minimizarse considerablemente si la concentración es aumentada lentamente. La mayoría de los microorganismos desarrollan cierta resistencia a materiales tóxicos siempre y cuando se les de tiempo suficiente para desarrollar estructuras que minimicen el impacto de dicho material, a este fenómeno se le llama aclimatación, en él las bacterias logran reacomodar las rutas metabólicas que se bloquean con la presencia del material tóxico.

En la naturaleza existen distintos tipos de cepa y algunas resultan ser menos sensibles que otras, por lo que el problema con los materiales tóxicos puede solucionarse si se inoculan cepas más resistentes.

Por estas razones es difícil establecer límites a los cuales un material resulta tóxico, no obstante se pueden establecer métodos para prevenir efectos nocivos o minimizarlos.

Una vez que se ha detectado un problema por la presencia de materiales tóxicos existen distintas vías que se pueden seguir para evitar el colapso del proceso, el objetivo de todas ellas será reducir la concentración del tóxico hasta los límites en donde no implique ningún riesgo para la biomasa. La primera medida es preventiva y consiste en remover el tóxico mucho antes de que entre al digestor, si se detecta o se sospecha de la presencia de algún material inhibitorio es posible retirarlo desde los clarificadores muchos pasos antes, esta medida implica conocer las actividades industriales de la región y tener caracterizado el flujo, además de conocer las concentraciones máximas y mínimas. Si esta opción resulta difícil de aplicar y el tóxico ya ha entrado al digestor, entonces se podrá diluir su concentración, la dilución puede llevarse a cabo mediante agua o con algún otro flujo.

Todos los materiales que producen un efecto tóxico deben estar disueltos en el contenido del digestor, al estar en solución los microorganismos pueden introducirlos en su metabolismo. Si la concentración disponible de la sustancia inhibitoria puede disminuirse con algún procedimiento como la formación de un complejo insoluble o un precipitado, los microorganismos no podrán hacer uso de él, minimizando los efectos dañinos. Por ejemplo, la toxicidad de algunos metales pesados como el cobre y el zinc puede ser removida mediante la adición de sulfuros, éstos forman un precipitado insoluble con los metales. Así mismo, cuando

la toxicidad es producida por un aumento en la concentración de los sulfuros, se pueden agregar metales y la formación del precipitado disminuirá la toxicidad.

Variaciones en el pH pueden cambiar la forma del compuesto tóxico alterando así su toxicidad, por ejemplo el amoníaco es tóxico en su forma primaria NH_3 si se consigue mantener el pH a niveles bajos, el equilibrio ácido base se dirigirá hacia la formación de NH_4^+ , la cual no representa ningún peligro para el metabolismo microbiano.

Existe también la posibilidad de agregar materiales que tengan un efecto contrario al producido por el compuesto tóxico, estos materiales reciben el nombre de antagonicos.

Otros métodos para controlar la toxicidad son específicos al tipo de contaminante que se presente, a continuación se tratan los más importantes.

Tabla 2.11: Concentraciones mínimas para la metanogénesis

Concentración mínima de elementos necesaria para la metanogénesis y factores ambientales	
pH	6,5-8
Contenido de sales	2,5-25 mS/cm.
Temperatura	8-55 °C
Elemento	Concentración
Oxígeno	<1 ppm
Hidrógeno	6 Pa
Carbono total	0,2-50 g/l DQO
Magnesio	10-40 ppm
Azufre	50-100 ppm
Hierro	10-200 ppm
Níquel	0,5-30 ppm
Cobalto	0,5-20 ppm
Molibdeno	0,1-0,35 ppm
Zinc	0-3 ppm
Fosfatos	50-150 ppm
Relación C:N:P:S	2000:15:5:3

Fuente: Morales P., "Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento", Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005.

a) Sales alcalinas

Usualmente las aguas residuales industriales contienen concentraciones inhibitorias de sodio, calcio, potasio, calcio y magnesio, estas sales vienen disueltas y pueden causar alteraciones en el desempeño del digestor. Sin embargo, en la mayor parte de los casos la concentración de estas sales se eleva hasta niveles tóxicos al tratar de corregir el pH, como se mencionó previamente la adición de bicarbonato de sodio o cualquier otra base que contenga sodio, magnesio, calcio o potasio puede inhibir el proceso debido a la alta concentración de la

sal. En la siguiente tabla se enlistan los efectos de distintos cationes, así mismo se menciona la concentración a la cual son estimulantes e inhibitorios.

Tabla 2.12: Cationes comunes, concentraciones inhibitorias y estimulantes

Catión	Estimuladorio (mg/l)	Inhibición moderada mg/l	Inhibición alta mg/l
Sodio	100-200	3500-5500	8000
Potasio	200-400	2500-4500	12000
Calcio	100-200	2500-4500	8000
Magnesio	75-150	1000-1500	3000

Fuente: Perry L. McCarty, "Chemestry for environmental engineering and science", 2003.

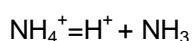
Las concentraciones estimulantes son deseables debido a las mejoras en el desempeño general del proceso. Un fenómeno asociado con la toxicidad de las sales es el efecto antagónico que tienen unos con otros, si alguno de éstos elementos está presente en concentraciones tóxicas puede ser controlado agregando algún otro catión, de igual forma si varios cationes se encuentran en concentraciones estimulantes podrán servir como medida de control si alguno se encuentra en concentración inhibitoria moderada.

“Los antagonistas funcionan mejor cuando las sales son cloruros, en caso de que no estén disponibles o que sean demasiado costosas el mejor método es la dilución. Se ha demostrado que 300 mg/l de potasio reducen al 80% los efectos tóxicos de 7000 mg/l de sodio. El efecto inhibitorio desaparecerá completamente si se agregan 150 mg/l de calcio, sin embargo la adición de calcio sin la presencia de sodio no servirá de nada” (Perry L. McCarty, "Environmental biotechnology: principles and applications", 2001, pág. 147).

b) Amoníaco

El amoníaco se produce durante la degradación anaerobia de compuestos con alto contenido proteico, normalmente se combina con CO₂ y agua para formar bicarbonato de amonio, lo que constituye un buffer dentro del sistema, sin embargo cuando la concentración de proteínas es muy alta la concentración de amoníaco también se elevará hasta alcanzar efectos tóxicos. Esto es muy común en sistemas en donde se tratan residuos provenientes de la cría de ganado porcino.

El amoníaco se encuentra en equilibrio con el ión amonio dentro del digestor, y aunque en la mayoría de los casos es el NH₃ el que causa los efectos nocivos, también se produce inhibición si el ión amonio se acumula.



A pH mayores de 7.4 el amoníaco (NH_3) producirá inhibición si se encuentra en concentraciones entre 1500 y 3000 mg/l. Bajo estas condiciones la producción de ácidos grasos volátiles se incrementará lo que hará que baje el pH y el efecto tóxico se reducirá. La concentración de ácidos volátiles permanecerá en niveles altos a menos que el pH se reduzca un poco más, para esto se agrega ácido clorhídrico (HCl) hasta alcanzar un pH igual a 7. Es importante señalar que si la inhibición es provocada por el ión amonio, no servirá de nada bajar el pH, por lo que la adición de HCl no tendrá ningún efecto, en este caso la única vía es la dilución del contenido de nitrógeno amoniacal.

Cuando la concentración de amoníaco ha rebasado los 3000 mg/l, es lo suficientemente tóxico como para producir un deterioro considerable sin importar el pH. El único método de control viable consiste en diluir el contenido del digestor ya sea agregando lodos crudos con bajas concentraciones de nitrógeno, agregando sobrenadante o agregando lodos digeridos.

Tabla 2.13: Concentraciones de amonios inhibidores

Concentración inhibidora de amonios como N (mg/l)	
50-200	Beneficioso
>200-1000	No tiene efectos adversos
1500-3000	Inhibidor para pH>7,4-7,6
>3000	Tóxico

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 100.

c) Sulfatos y sulfuros

La presencia de altas concentraciones de sulfato en numerosos efluentes residuales industriales ha sido considerado normalmente como un inconveniente para proceder a su tratamiento anaerobio en biodigestores debido a la competencia que se establece entre las bacterias productoras de metano (BPM) y las bacterias sulfato reductoras (BSR), con la consiguiente producción de sulfuro de hidrógeno.

Sin embargo, la aplicación de tratamiento anaeróbico de estos efluentes es posible porque bajo condiciones anaeróbicas, las bacterias reductoras de sulfato (BRS) son capaces de usar azufre como aceptador final de electrones en la degradación de materia orgánica e hidrógeno, generándose como producto final sulfuro de hidrógeno. Una pequeña cantidad de sulfuro de hidrógeno puede proveer condiciones favorables para las bacterias productoras de metano (BPM) debido a que: a) el sulfuro puede mantener bajos potenciales redox en el digestor, b) es una importante fuente de azufre para el crecimiento de las BPM, y c) algunos iones de metales pesados como Cu, Ni y Zn, que son tóxicos para los microorganismos anaeróbicos, pueden ser precipitados como sulfuros insolubles.

Por otro lado, concentraciones altas de sulfato en aguas residuales pueden causar serios problemas en el tratamiento aeróbico posterior, debido a lo siguiente: a) el sulfato puede ser reducido a sulfuro que es altamente inhibitorio para las BPM, b) el sulfuro puede causar alta demanda de oxígeno en los efluentes, c) sulfuro de hidrógeno en forma gaseosa causa problemas de corrosión y mal olor, d) la competencia entre BRS y BPM por sustratos orgánicos puede disminuir la producción de metano.

Estos problemas pueden restringir las aplicaciones del proceso anaeróbico para el tratamiento de algunas aguas residuales industriales ricas en sulfato, por lo tanto, es importante tener un mejor entendimiento del comportamiento de las BRS y BPM para este tipo de efluentes.

De forma general, la aplicación de un proceso de digestión anaerobia a aguas con alto contenido en sulfato causa la coexistencia de las bacterias BRS con las bacterias BPM, estableciéndose una situación de competición entre ambos grupos microbianos por los sustratos orgánicos disponibles, especialmente por los compuestos intermedios más comunes en la digestión anaerobia, tales como acetato, hidrógeno y otros ácidos grasos volátiles de cadena corta (AGV) como propionato y butirato. El resultado de esta competición determinará la cantidad de sustrato que será utilizado para la generación de sulfuro de hidrógeno o metano, respectivamente. En los casos extremos en que predomine una de las dos poblaciones se tendrá o un sistema totalmente metanogénico o bien un sistema sulfurogénico.

Cuando la relación DQO/SO_4 es de 0.67 hay teóricamente el suficiente sulfato en el medio para que toda la materia orgánica sea utilizada por las BRS, pudiéndose de esta forma operar en condiciones puramente sulfurogénicas.

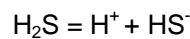
La presencia de sulfatos (SO_4) en agua residual provoca por lo tanto una alteración en el crecimiento de las bacterias metanogénicas. Por la reducción de sulfato se forma sulfuro de hidrógeno (H_2S). El grado de alteración del crecimiento de las bacterias metanogénicas es más grande cuando la relación $DQO/SO_4 \leq 7$. Para relaciones $DQO/SO_4 > 10$ gran parte del H_2S producido será removido en la fase líquida en función de una mayor producción de biogás. Parte del H_2S producido en esta fase pasa a formar el biogás y a causar problemas de corrosión y malos olores. La presencia de sulfatos causa una elevada demanda de oxígeno en el efluente. Para una misma cantidad de materia orgánica presente en el digestor la reducción de sulfatos disminuye la producción de biogás.

La reducción de 1.5 g de SO_4 equivale a la utilización de 1.0 g de DQO, lo que significa una menor disponibilidad para la producción de CH_4 . Cada mol de SO_4 requiere de 2 moles de oxígeno para su reducción. Por lo tanto cada 96 g. de SO_4 consumen 64 g. de DQO.

Debido a la influencia en la eficiencia de degradación de DQO que tienen altos contenidos de SO_4 , es importante la reducción de la concentración de sulfuro libre en el digestor, generalmente por debajo de 100-200 mg/l. Esto puede realizarse mediante la dilución previa del afluente, por elevación del pH, o bien con la posibilidad de extender el tratamiento anaerobio con una etapa adicional de eliminación de sulfuro, ya sea por “stripping” (desorción), precipitación u oxidación parcial a azufre elemental, y la consiguiente dilución del afluente mediante una recirculación de parte del efluente final.

Los sulfuros que se encuentran en el proceso de digestión, tienen su origen en diversas fuentes, cantidades pequeñas de sulfuro vienen contenidas en las aguas domésticas, concentraciones mayores provienen de la actividad industrial y finalmente otra porción se suma durante la descomposición de las proteínas durante la biodegradación anaerobia. La toxicidad provocada por sulfuros también se presenta en residuos que contienen altas concentraciones de sulfatos, ya que al introducirse al proceso los sulfatos son usados como aceptores de electrones y finalmente se convierten en sulfuros.

Una vez dentro del digestor podemos encontrar a los sulfuros en dos formas: formando un sulfuro insoluble con metales pesados (ya sea con cobre, zinc o hierro), que se precipita y no representa ningún daño para el proceso, y como sulfuros solubles. Estos últimos representan los mayores riesgos cuando su concentración se eleva, en particular la forma ionizada del ácido sulfhídrico que se encuentra disuelta en el contenido del digestor.



“Ciertas cantidades de azufre son necesarias para el crecimiento bacteriano, de manera que las bacterias son capaces de tolerar entre 50-100 mg/l de sulfuros solubles presentando leves afectaciones, incluso pueden manejar concentraciones de 200 mg/l, pero una vez que se ha sobrepasado este límite, la presencia de H_2S provoca inhibiciones considerables” (Perry L. McCarty, “Environmental biotechnology: principles and applications”, 2001, pág. 173). Además de los efectos que produce en el metabolismo microbiano, el H_2S es un gas muy oloroso que afecta la salud de los trabajadores y las condiciones de seguridad dentro del sistema anaerobio, ya que también es corrosivo.

El impacto de los sulfuros dentro del digestor no es del todo negativo, su presencia también es necesaria para minimizar los efectos en caso de que una alta concentración de metales pesados sea introducida al proceso. Cuando se detectan efectos inhibitorios causados por los sulfuros se puede (1) diluir el contenido del reactor (2) identificar, separar y contener el flujo de tóxicos y (3) agregar alguna sal de hierro para precipitar los sulfuros.

d) Metales pesados

Las sales de cobre, níquel, zinc y cadmio son solubles y también tóxicas a bajas concentraciones. El mercurio también es tóxico a concentraciones pequeñas. “Sólo 1 mg/l de cualquiera de los metales arriba mencionados producen efectos inhibitorios considerables” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005). Como se mencionó en la sección previa la presencia de sulfuros ayuda a minimizar el impacto producido por los metales pesados ya que forma compuestos insolubles con ellos.

Otro factor que ayuda a minimizar la toxicidad producida por metales pesados es que el hierro normalmente se encuentra en concentraciones altas, lo cual no presenta ningún efecto desfavorable en el metabolismo de la biomasa, y junto con los sulfuros forma complejos buffer ante la introducción de otro tipo de metal. El FeS se encuentra en solución y al estar en presencia de otro metal el Fe es desplazado, en ese momento se forma un precipitado insoluble lo que impide la permanencia de condiciones tóxicas. En algunas ocasiones se agrega ácido sulfúrico o sulfuros, sin embargo se debe ser muy cauteloso con el uso de estas sustancias ya que los sulfuros por sí mismos pueden inhibir el proceso si se excede la concentración límite, por otra parte, el ácido sulfúrico requiere de condiciones de transporte, uso y almacenaje muy especiales, por lo que su uso debe hacerse bajo un estricto control.

Las concentraciones disponibles de sulfatos en las aguas residuales son las que determinan la cantidad de metales pesados que pueden ser tolerados en los procesos biológicos anaeróbicos. El procedimiento más eficaz para controlar la toxicidad de los metales pesados es la adición de sales de sulfato para precipitar los metales. “Cerca de 1.8 mg/l – 2 mg/l de metales pesados pueden ser precipitados como sulfatos metálicos a través de la adición de 1 mg/l de sales de sulfato (sulfato de aluminio, sulfato férrico, etc.)” (Ibid.).

Tabla 2.14: Concentración de inhibición y toxicidad de metales pesados

Concentración de inhibición y toxicidad de metales pesados			
Metal	Alimentación gradual		Alimentación brusca
	Concentración de inhibición* (mg/l)	Límite de toxicidad (mg/l)	Límite de toxicidad (mg/l)
Cr (III)	130	260	<200
Cr (VI)	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Níquel	10	30	<30
Cadmio	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1700

Nota: * Inicio de la disminución de producción de gas

Concentración inhibidora de metales pesados en procesos anaeróbicos

	Cantidad inhibidora mg/l	Acción tóxica mg/l	Concentración necesario mg/l	Concentración permitida mg/l
Cobre (Cu)	40-250	170-300		8
Cadmio (Cd)	150-600	20-600		0,12
Zinc (Zn)	150-600	250-600		32
Níquel (Ni)	10-300	30-1000	0,006-0,5	4
Plomo (Pb)	300-340	340	0,02-200	12
Cromo III (Cr)	120-300	260-500	0,005-50	8
Cromo VI (Cr)	100-110	200-420		
Cobalto (Co)	-		0,003-0,06	
Molibdeno (Mb)	-		0,005-0,05	
Selenio (Se)	-		0,008	
Manganeso (Mn)			0,005-50	
Mercurio (Hg)				0,08
Hierro (Fe 2+)			1,1	

Fuente: Moncayo, "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás", 2008, pág. 106.

e) Compuestos orgánicos

Los compuestos orgánicos que resultan tóxicos para el proceso anaerobio provienen de los residuos industriales en altas concentraciones. Sin embargo, a bajas concentraciones pueden convertirse en fuente de alimento para los microorganismos, con un diseño adecuado la mayoría pueden ser tratados por vía anaerobia con buenos resultados. A continuación se presenta una tabla con diversos tipos de contaminantes y las concentraciones a las cuales producen efectos inhibitorios.

Tabla 2.15: Concentración de compuestos orgánicos que reducen la producción de gas

Tóxico	Concentración mg/l	Tóxico	Concentración mg/l
Hidrocarburos		Alcanos Halogenados	
Alcanos		Clorometano	50
ciclohexano	150	Cloroformo	1
Octano	2	Tetracloruro de carbono	6
Decano	0,35	Pentacloroetano	11
Aromáticos		Hexacloroetano	22
Benceno	1200	Bromometano	4
Tolueno	580	Bromodichlorometano	2
Xileno	250	Alquenos Halogenados	
Fenoles		Tricloroetano	13
Fenol	2100	Tetracloroetano	22
o-Cresol	890	1,1-Dicloroetano	8
p-Cresol	91	Aromáticos Halogenados	
Alcoholes		Clorobenceno	270
Metanol	22000	1,2-Diclorobenceno	150
Etanol	43000	2-Clorotolueno	53

1-propanol	34000	2-cloro-p-xileno	89
1-butanol	11000	2-Clorofenol	160
Cetonas		Misceláneos	
Acetona	50000	Hidroquinona	2800
2-Butanona	28000	Acetonitrilo	28000
2-Hexanona	6100	Acrilonitrilo	90

Fuente: Perry L. McCarty, "Chemestry for environmental engineering and science", 2003.

f) Desinfectantes y antibióticos

Los antibióticos usados en las explotaciones pecuarias llegan a los excrementos pero, no suelen afectar mayormente la digestión debido a la dilución con materiales no tóxicos. Los metanógenos son sensibles a los antibióticos que afectan a la síntesis de proteínas o lípidos y a los que interfieren con la función de la membrana citoplasmática.

Los antibióticos son comúnmente añadidos a las dietas de los animales, para mejorar la producción o para control de enfermedades. La presencia de penicilina y tetraciclina, procedentes de la dieta de los animales, en el purín de cerdo, tiene un efecto inhibitorio sobre el proceso, aunque parece haber una buena aclimatación a la presencia de dichas sustancias.

Los restos de desinfectantes, procedentes de la limpieza y desinfección de las granjas en los residuos animales pueden resultar tóxicos para el sistema anaerobio. La toxicidad dependerá, básicamente de la concentración, de la biodegradabilidad de los mismos, y del tiempo transcurrido desde su utilización, hasta la entrada del residuo en el sistema anaerobio.

“Los desinfectantes clorados son muy tóxicos aún a bajas concentraciones (<1 mg/l) pero son rápidamente absorbidos por los sólidos e inactivados. La mayoría de los detergentes sintéticos son degradados fácilmente pero si la concentración es mayor que 20 mg/l pueden afectar la digestión. Los compuestos de amonio cuaternario son persistentes y tóxicos a bajas concentraciones (1mg/l). Los solventes clorados y derivados son tóxicos en concentraciones de 1 mg/l. La toxicidad de los sulfatos se manifiesta a concentraciones mayores que 1 g/l y la inhibición total ocurre por sobre 4.5 g/l” (Perry L. McCarty, "Environmental biotechnology: principles and applications", 2001, pág. 183).

Los residuos de cultivos agrícolas, susceptibles de ser utilizados para producción de metano, pueden contener algunos compuestos tóxicos para el crecimiento de los microorganismos anaerobios, por ejemplo, residuos de pesticidas, compuestos fenólicos, terpenos, resinas, etc. Al realizar un pretratamiento químico con ataque ácido o básico, también se pueden formar compuestos tóxicos.

CAPÍTULO 3

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE DESECHOS ORGÁNICOS

En el presente proyecto se pretende aprovechar los residuos orgánicos agroindustriales que se generan en el proceso de extracción de aceite de palma africana. Los efluentes generados en esta agroindustria son muy concentrados y contaminantes. La generación de efluentes es del orden de $0,7 \text{ m}^3$ por tonelada de racimos de fruta procesada, con un DQO entre 65000 y 85000 [mg / l] y con una carga equivalente a aproximadamente 50 kilos de DQO por tonelada de fruta procesada. La DBO (48000 mg/l) y grasas y aceites (mayor de 2000 mg/l). “De acuerdo a estos valores 100 m^3 / día de efluente de una extractora de palma africana pueden generar aproximadamente 2000 m^3 de biogás día” (Ing. Felipe Chaparro, Coordinador de procesos BIOTEC internacional).

Estos contaminantes no son valores fijos y varían según el tipo de palma⁹, las prácticas de cosecha, la presión de las prensas, el tamaño de la extractora y la cantidad de agua utilizada en los clarificadores y en el aseo. Estos efluentes son también concentrados en potasio, tienen una temperatura de descarga de hasta 80 grados centígrados y tienen un pH de 4,5. La cantidad de licor de desecho producido de estas plantas extractoras de aceite de palma varía con la cantidad de agua usada.

Este efluente puede provocar un deterioro ecológico si carece de un sistema de tratamiento eficiente. Las extractoras suelen tratar este efluente mediante una serie de lagunas: desaceitado, enfriamiento, anaerobia, facultativa, pulimento. Este sistema es relativamente barato a pesar de los enormes volúmenes de tierra a mover y permite, cuando está bien diseñado, operado y mantenido, lograr altas eficiencias de remoción de la carga orgánica, hasta un 95%. Sin embargo, requiere de un suelo impermeable o de la colocación de geomembranas en la parte inferior de las lagunas para evitar la contaminación del nivel freático.

⁹ En la hacienda existen dos variedades de palma. INIAP que es palma nacional y otra variedad importada desde Costa Rica.

Las principales fallas que se observan en el sistema en operación en la extractora “Hacienda Tarragona” son:

- necesidad de grandes áreas
- recolección del aceite poco práctica
- contaminación del nivel freático
- colmatación rápida de las lagunas con lodo espeso

Además las lagunas anaerobias del sistema de tratamiento del efluente de la extractora de palma generan enormes cantidades de biogás (gas metano) liberado a la atmósfera que es por una parte un recurso energético no valorizado y por otra parte un contaminante de la atmósfera (efecto invernadero).

Debido a las altas cargas orgánicas del efluente, la generación de metano es elevada y la contribución al calentamiento global no es para nada despreciable. Por esta razón el metano es uno de los gases de efecto invernadero regulado por el Protocolo de Kyoto¹⁰.

En la tabla siguiente se indican los parámetros principales que caracterizan al efluente con el que se trabaja en el proyecto. Dichos parámetros fueron analizados según el Standard Methods For Examination of Water and Wastewater (APHA 1995), en el laboratorio ANNCY ubicado en la ciudad de Quito, Ecuador y en los laboratorios del CEINCI de la ESPE. Los materiales, equipos, reactivos y procedimientos utilizados para realizar este análisis han sido detallados previamente en el capítulo 2.

Tabla 3.1: Caracterización del sustrato

Análisis físico-químico del efluente de la extractora de palma “Hacienda Tarragona”			
Ensayo	Métodos	Unidades	Resultado
	Referencia-Laboratorio		
Sólidos suspendidos (SST)	HACH 8006	mg/l	10040
Aceites y grasas	EPA 418.1	mg/l	51400
DBO ₅	APHA 5210 D	mg/l	21350
DQO	APHA 5220 D	mg/l	55500
Nitrógeno total	HACH 8075	mg/l NTK	540

¹⁰ El Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990.

Sólidos totales	APHA 2540 B	mg/l	30504
Sólidos totales volátiles (STV)	APHA 2540 E	mg/l	26530

Fuente: Ing. Cecilia Morales, Gerente Laboratorios ANNCY. (Ver resultados en el ANEXO C).

La relación entre los valores de DBO y de DQO es indicativa de la biodegradabilidad de la materia orgánica. La relación de DBO/DQO obtenida es de 0.38, por lo que se puede decir que el efluente admite la presencia de sustancias tóxicas que retardan o inhiben la biodegradabilidad (metales pesados, cianuros, cloro, etc.), sin embargo, el efluente sí puede ser utilizado en biodigestores debido a que esta relación está dentro de los rangos aceptados de biodegradabilidad ($0,2 \leq \text{DBO/DQO} \leq 0,5$). Un valor de la relación de DBO/DQO menor a 0.2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y orgánico si es mayor de 0.5.

3.1 LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

El biogás se produce a través de la degradación anaeróbica de la biomasa. La digestión anaeróbica es un proceso natural microbiano que ocurre en forma espontánea en la biomasa en ausencia de oxígeno. Genera una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y una suspensión acuosa (bioabono) que contiene los componentes no degradados o parcialmente degradados y restos inorgánicos inicialmente presentes en la biomasa.

3.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO

El proceso en el digestor se puede comparar con el proceso que ocurre en el interior de los estómagos de los rumiantes. Por esta razón las bacterias al interior del digestor reaccionan negativamente cuando se cometen errores de alimentación de la biomasa. La digestión anaeróbica es un proceso complejo desde el punto de vista microbiológico, al estar enmarcado en el ciclo anaerobio del carbono, donde es posible, transformar la biomasa en ausencia de oxígeno en compuestos volátiles como el CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2 , CH_4 y otros gases menores. Este proceso ocurre también con el denominado “gas de pantanos” que brota en aguas estancadas, el gas natural metano, en los yacimientos petrolíferos así como en el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas¹¹.

La digestión anaeróbica es un proceso natural, por el cual es posible que mediante una acción coordinada y combinada de diferentes grupos bacterianos en ausencia total de oxígeno, éstos

¹¹ Bacterias productoras de gas metano, en ausencia de oxígeno.

puedan utilizar la materia orgánica para alimentarse y reproducirse, como cualquier especie viva que existe en los diferentes ecosistemas.

Cuando se acumula materia orgánica (compuesta por polímeros, como carbohidratos, proteína, celulosa, lípidos, etc.) en un ambiente acuoso, los microorganismos aerobios, actúan primero, tratando de alimentarse de este sustrato. Este proceso consume el oxígeno disuelto que pueda existir. Luego de esta etapa inicial, cuando el oxígeno se agota, aparecen las condiciones necesarias para que la flora anaerobia se pueda desarrollar consumiendo también, la materia orgánica disponible. Como consecuencia del proceso respiratorio de las bacterias se genera una importante cantidad de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y ácido sulfhídrico (H_2S).

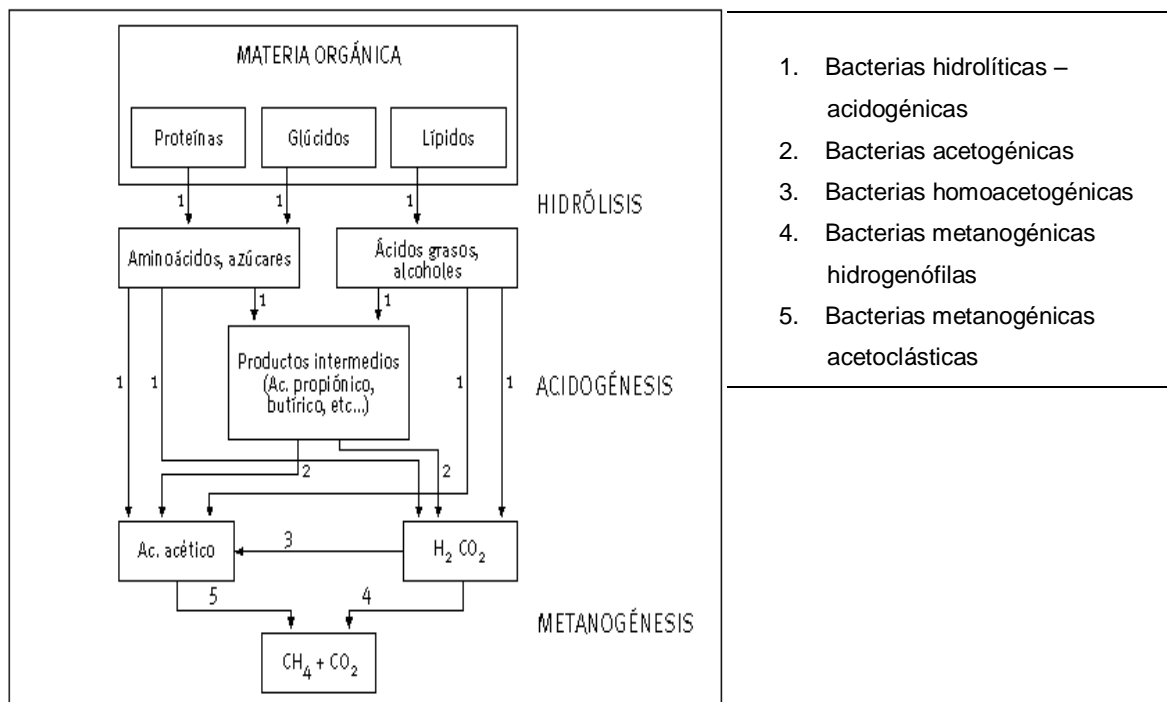


Figura 3.1: Esquema del proceso de degradación anaeróbica de desechos orgánicos.

Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido, en la práctica existe todavía información muy limitada sobre los procesos químicos que la ocasiona y su microbiología bacteriana. Sin embargo, se puede afirmar en líneas generales que la digestión anaerobia se desarrolla en cuatro etapas durante las cuales la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para la obtención de biogás y bioabono, como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias. Para la definición de digestión anaeróbica se definen las siguientes etapas:

- **Hidrólisis:** En esta etapa la materia orgánica es metabolizada por los microorganismos. En esta fase se descomponen las cadenas largas de materia orgánica en otras más cortas,

obteniéndose los productos intermedios. La materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas anaeróbicas que hidrolizan las moléculas solubles en agua, tales como grasas, proteínas y carbohidratos y las transforman en polímeros más simples. Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.

- **Acidogénesis:** En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas dos primeras fases las llevan a cabo un primer grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples (acético mayormente). Son bacterias anaerobias facultativas (pueden consumir oxígeno molecular para su metabolismo, se adaptan a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno resulta tóxico en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no hay una reducción significativa de la DQO del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente.
- **Acetogénesis:** Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético, llevándolos al grupo acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$ y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. Esta reacción es endoenergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.
- **Metanogénesis:** En esta fase un segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las

condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

“Las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las de la fase de acetogénesis, por ello, son las que limitarán el proceso de degradación anaerobia. Son también las que condicionarán el tiempo de retención de la biomasa en el digestor así como la temperatura del proceso” (Perry L. McCarty, “Chemestry for environmental engineering and science”, 2003, pág. 118).

La conversión de acetato a metano aparece como un proceso ecológico muy importante en digestores de residuos y en medios anóxicos de agua dulce, donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias. A pesar de que la producción de metano está muy extendida, son pocos los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de la metanogénesis. Por lo tanto, es un proceso que depende de la producción de esos compuestos por otros organismos, a partir de la materia orgánica compleja.

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H₂ y el CO₂ que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariontas¹². Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa¹³ y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H₂ y CO₂. Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si éste se halla en alta concentración. Además el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos.

“Las metano bacterias solo pueden multiplicarse cuando está avanzada la fermentación de los sustratos primarios por acción de las bacterias anaerobias facultativas (por ejemplo Escherichia, Enterobacter, Klebsiella o Bacillus spp.) y se haya consumido todo el oxígeno disuelto, de manera que el potencial redox haya alcanzado un valor menor que -200 mV. Además, el pH no debe bajar demasiado, debido a los ácidos producidos por los Clostridium, para no inhibir el crecimiento de los metanógenos” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 59).

Tabla 3.2: Bacterias involucradas en la digestión anaerobia

Etapa	Género/Especie	Población mesofílica en lodos residuales
-------	----------------	--

¹² Células sin núcleo celular diferenciado, es decir, cuyo ADN no se encuentra confinado dentro de un compartimiento limitado por membranas, sino libremente en el citoplasma.

¹³ La celobiosa es un azúcar doble que aparece en la hidrólisis de la celulosa y su fórmula es C₁₂H₂₂O₁₁

Hidrolíticas acidogénicas	Butyvirbio, Clostridium, Ruminococcus, Acetovibrio, Eubacterium, Peptococcus, Lactabacillus, Strptococcus, etc.	$10^8 - 10^9$ por ml
Acetogénicas Homoacetogénicas	Acetobacterium, Acetogenium, Eubacterium, Pelobacter, Clostridium, etc.	$\approx 10^5$ por ml

Bacterias involucradas en la digestión anaerobia (continuación)

Reductores de protones estrictos	Matanobacillus omelionskii, Syntrophobacter wolinii, Syntrophomonas wolfei, Syntrophus buswellii, etc.	
Metanogénicos	Methanobacterium (muchas especies), Methanobrevibacter (muchas especies), Methanococcus (muchas especies), Methanomicrobium (muchas especies), Methanogenium (muchas especies), Methanospirillum bungatei, etc.	$\approx 10^8$ ml

Fuente: Monroy C., "Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios Orgánicos".

Dentro de cualquier proceso de metanogénesis es de vital importancia mantener bien equilibradas las poblaciones de bacterias acidogénicas y las metanogénicas. La concentración de ácidos orgánicos y el pH dentro del reactor deben ser monitoreados diariamente. Los ácidos orgánicos son un indicador clave del desempeño del proceso así como la capacidad de buffer, es así que estos dos parámetros nos brindan información suficiente para mantener en balance a los productores y a los consumidores de ácido.

3.1.2 ESTEQUIOMETRÍA DE LA METANOGÉNESIS

La estequiometría consiste en plantear ecuaciones químicas balanceadas que representen cuantitativamente las relaciones que existen entre los reactivos y los productos, en este caso la relación que existe entre los sustratos, la biomasa y los productos finales. Mediante el planteamiento de estas relaciones se puede saber cuantos gramos de células y productos finales se obtendrán por cada mol o gramo de residuos suministrados al proceso ya que los balances de materia para el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno y otros elementos se mantienen a cada paso. En el caso de la digestión anaerobia el balance de los electrones equivalentes que entran al proceso con la materia orgánica es mucho más importante, ya que todos estos electrones se conservan en el CH_4 , esto quiere decir que sólo a través de la formación de metano los electrones equivalentes se removerán y el residuo se estabilizará. El primero de cuatro pasos que se tienen que seguir para conformar un análisis estequiométrico es la construcción de una fórmula que contenga las proporciones másicas de

C, H, O y N del residuo a tratar, un análisis similar se debe llevar a cabo para obtener una fórmula empírica que nos represente las células microbianas, esto constituye el segundo paso. El tercer y cuarto paso están relacionados con la forma en la que el sustrato donador de electrones se divide entre la generación de energía y la síntesis. A continuación se plantea la estequiometría de la digestión anaerobia tomando en cuenta los criterios arriba mencionados.

a. Fórmula empírica para células microbianas

Una de las primeras fórmulas empleadas para representar células microbianas fue $C_5H_7O_2N$, presentada por Porges, Jasewicz y Hoover en 1956 durante un estudio de tratamiento biológico de aguas residuales que contenían caseína. Actualmente se sabe que las proporciones másicas de cada elemento varían de microorganismo a microorganismo, del tipo de sustrato del que se este obteniendo energía, de los nutrientes presentes en el medio y si se trata de una cepa pura o de un consorcio bacteriano. Un análisis químico del porcentaje en peso de cada uno de los elementos presentes en la porción orgánica de una muestra de células bacterianas nos dará una idea de su composición.

Tabla 3.3: Fórmulas empíricas para células bacterianas metanogénicas

Fórmula Empírica	Peso Formular	$\frac{COD'}{Peso}$	% N	Sustrato
$C_{4.9}H_{9.4}O_{2.9}N$	129	1.26	11	acetato
$C_{4.7}H_{7.7}O_{2.1}N$	112	1.38	13	octanoato
$C_{4.9}H_9O_3N$	130	1.21	11	glicina
$C_5H_{8.8}O_{3.2}N$	134	1.16	10	leucina
$C_{4.1}H_{6.8}O_{2.2}N$	105	1.2	13	caldo nutritivo
$C_{5.1}H_{8.5}O_{2.5}N$	124	1.35	11	glucosa
$C_{5.3}H_{9.1}O_{2.5}N$	127	1.41	11	almidón

Fuente: Rittman, Bruce E., McCarty Perry L., "Environmental Biotechnology: Principles and Applications", 2001.

b. División del sustrato y rendimiento celular

Como ya se ha mencionado, durante la síntesis y el crecimiento celular el flujo de electrones es crucial para obtener energía suficiente para todas las funciones celulares. Inicialmente una porción de electrones (fe^0) del sustrato donador es transferida al aceptor para la conversión de otra porción de electrones (fs^0) en células microbianas.

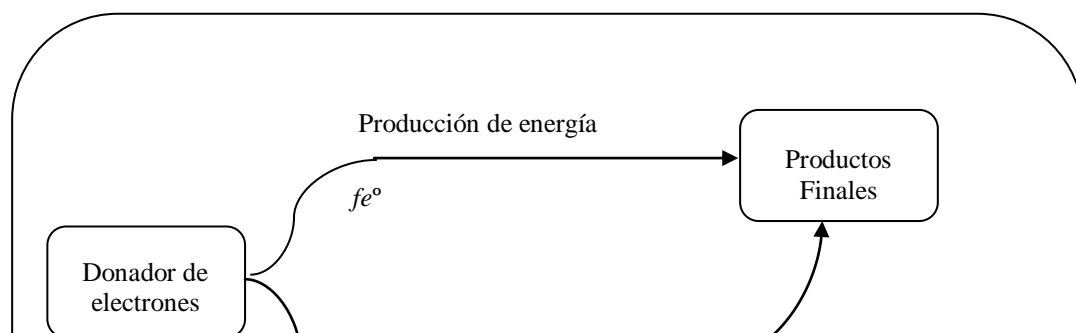


Figura 3.2: Utilización del donador de electrones para síntesis y producción de energía.

La suma de f_e^0 y f_s^0 es igual a 1. Cuando por depredación o por causas naturales la célula muere, parte de los electrones en f_s^0 son transferidos al aceptor para generar más energía y otra parte se convierte en residuos celulares orgánicos. Las porciones inicialmente convertidas en células, f_s^0 , y usadas para generar energía, f_e^0 , proveen las bases para dividir el sustrato entre generación de energía y síntesis. La división de la energía que proviene del sustrato también se maneja en términos de flujo de electrones equivalentes, ya que son estos flujos los que generan la energía de la célula, estos equivalentes vienen contenidos junto con la materia orgánica que entra al proceso.

La fracción f_s^0 puede ser convertida a unidades de masa como gramos de células producidas/gramos de DQO consumido. Cuando se expresa en gramos se denomina rendimiento total y se representa con la letra Y:

$$Y = f_s^0 (M_c \text{ g células / mol células}) / [(n_e e^-_{eq} / \text{mol células}) (8 \text{ g DQO / } e^-_{eq} \text{ donador})] \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

M_c = fórmula empírica de las células

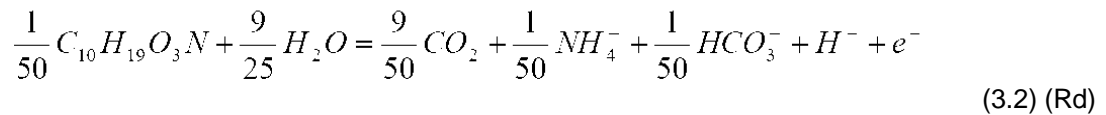
n_e es el número de electrones equivalentes en un mol de células empíricas, y la masa del donador debe expresarse como DQO.

c. Producción de energía

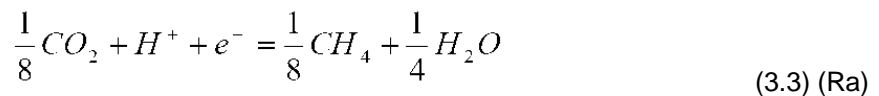
El sustrato de la mayoría de las reacciones es la materia orgánica, es decir, el donador de electrones, en condiciones anaerobias los aceptores más comunes son nitratos, sulfatos y dióxido de carbono. En algunos casos la materia orgánica es usada como aceptor y donador a ese proceso se le denomina fermentación.

Para conocer la energía que se obtiene de la oxidación de la materia orgánica y de la reducción de los productos finales es necesario construir una reacción estequiométrica que involucre los sustratos, los productos y la energía libre que se produce durante la conversión de uno a otro.

En el caso de la metanogénesis la reacción para la generación de energía (R_e) se determina escribiendo primero la reacción de oxidación (donador de electrones):



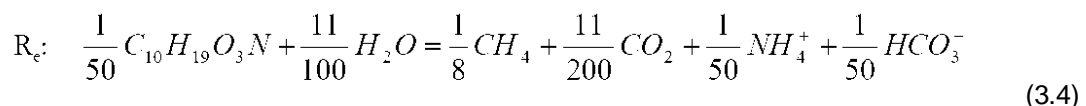
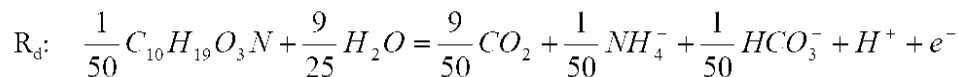
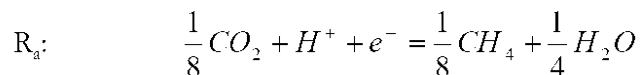
y posteriormente la reacción de reducción (aceptor de electrones):



Se hace una resta algebraica y se obtienen los coeficientes de cada una de las especies involucradas.

$$R_e = R_a - R_d$$

Esto es:

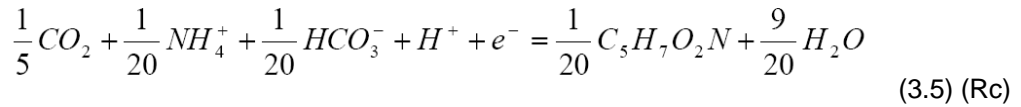


Nota: Las reacciones de oxidación y reducción fueron tomadas de Rittmann y McCarty 2001, donde $C_{10}H_{19}O_3N$ corresponde a la fórmula obtenida para lodos residuales municipales.

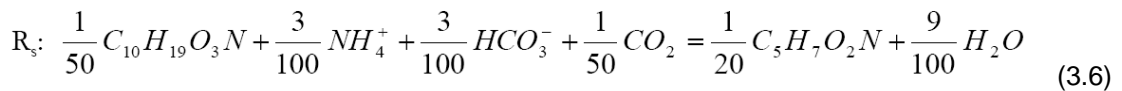
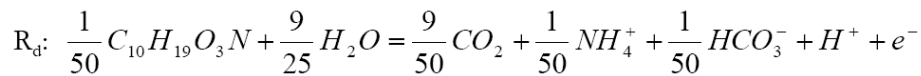
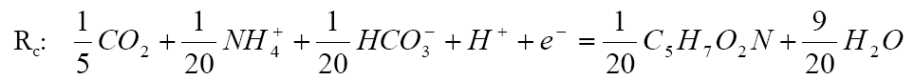
Con esta última reacción obtenida podemos aseverar que cuando 1/50 mol (ó 4 grs.) de lodos residuales son convertidos en energía durante la digestión anaerobia, 1/8 de mol (ó 16 grs.) de metano se forman y 11/200 de dióxido de carbono ascienden hacia la fase gaseosa. Una relación muy importante que observamos en la ecuación es aquella que existe entre los moles de NH_4^+ y HCO_3^- que como hemos visto son los responsables del valor de pH dentro del proceso de digestión.

d. Síntesis celular

Como ya se ha mencionado anteriormente el crecimiento biológico dependerá de la división del sustrato en producción de energía y en síntesis celular. Para representar la síntesis celular (R_s) es necesario escribir nuevamente una reacción que relacione el sustrato donador de electrones (R_d) y la formación de células nuevas (R_c).



$$R_s = R_c - R_d$$



e. Reacción general del crecimiento biológico

Para obtener una reacción general que describa el crecimiento microbiano debemos relacionar la producción de energía y la síntesis celular. R_e deberá ser multiplicada por f_e y R_s deberá ser multiplicada por f_s .

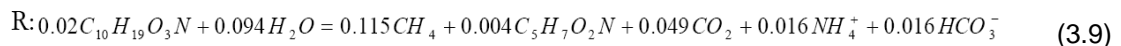
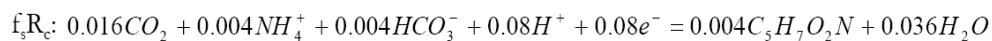
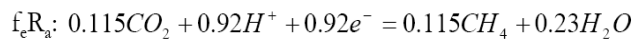
$$R = f_e(R_e - R_d) + f_s(R_c - R_d) \quad (3.7)$$

Recordando que $f_s + f_e = 1$ y simplificando:

$$R = f_e R_e + f_s R_c - R_d \quad (3.8)$$

“ $f_s = 0.08$ cuando la fuente de nitrógeno es el amonio” (Rittmann y McCarty 2001).

Esto es:



3.1.3 CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Junto con el proceso microbiológico y la química básica que se relaciona con el proceso de digestión, es necesario conocer y entender la forma de crecimiento de los microorganismos y las herramientas que existen para predecir o modelar este crecimiento. Todos los organismos crecen gracias a la transformación de sustratos orgánicos e inorgánicos. Mediante reacciones de óxido/reducción logran obtener la energía potencial almacenada en los enlaces y esta se distribuye en la célula, ya sea que esta energía se canalice a crecimiento o a reproducción es posible trazar rutas metabólicas (estequiométricas y mediante balances de materia) que nos permitan entender mejor el comportamiento microbiano y por tanto generar condiciones que favorezcan su crecimiento a fin de optimizar su desempeño.

Es importante dentro del diseño de cualquier proceso biológico conocer la tasa o la velocidad a la que son empleados ciertos materiales dentro del reactor, en el caso de la digestión anaerobia, el planteamiento de estas tasas nos permitirá conocer con anterioridad la producción de metano a partir de un cierto tipo de material, el crecimiento bacteriano o la remoción de ciertos compuestos.

Suponiendo que las condiciones ambientales estén bien controladas se puede asegurar una estabilización apropiada mediante el control de la tasa de crecimiento. Esta tasa está en función de la velocidad a la cual los microorganismos metabolizan o utilizan el sustrato, y de ella dependerá el tiempo que deben permanecer los microorganismos dentro del proceso.

La solución de un modelo se puede utilizar para diseñar un nuevo proceso capaz de cumplir los objetivos de tratamiento, o bien, para analizar por qué un proceso que ya funciona cumple o incumple su objetivo.

Esta sección del capítulo está dedicada a revisar el crecimiento microbiano y los modelos cinéticos empleados para predecir el comportamiento de los microorganismos a determinadas condiciones de proceso.

a. Crecimiento microbiano

Las bacterias son las responsables de las reacciones de biodegradación en la digestión anaerobia. Cada célula individual se reproduce por un proceso llamado fisión binaria, el tiempo que requiere cada ciclo de crecimiento es muy variable y depende de factores nutricionales y genéticos. El crecimiento se define como “un incremento en el número de células microbianas en una población, lo cual también puede ser medido como un incremento en la masa microbiana” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004). En una forma general se puede describir el crecimiento microbiano a través de 4 etapas. La primera etapa recibe el

nombre de *fase de latencia*, que corresponde al lapso en el que las bacterias se adaptan a nuevas condiciones medio ambientales, este periodo puede ser corto o largo, todo depende de la velocidad a la que las bacterias sintetizan enzimas que permitan metabolizar determinados componentes esenciales presentes en el medio (ver Figura 3.3). En esta fase no hay reproducción celular por lo que la velocidad de crecimiento es nula. También se presenta fase de latencia en aquellas poblaciones que han sufrido daños debido a excesivas temperaturas, compuestos tóxicos, variaciones de pH, etc.

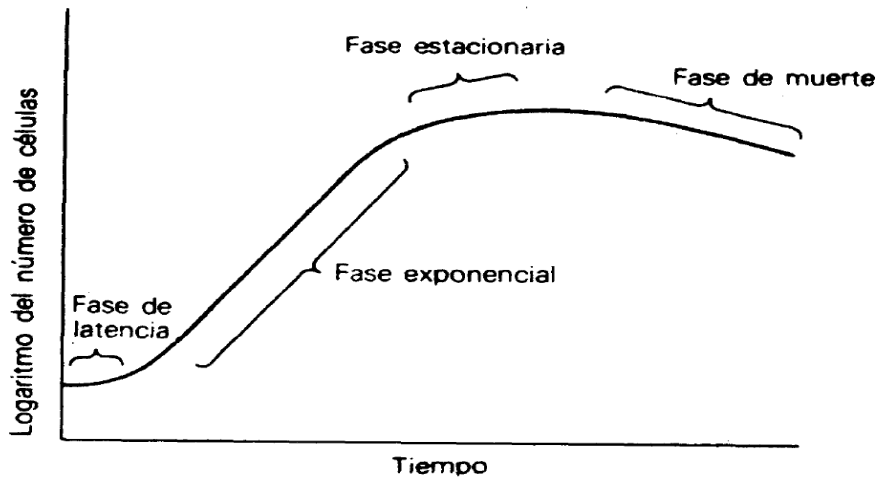


Figura 3.3: Curva de crecimiento típica para una población microbiana

Una vez que las bacterias se han adaptado a las nuevas condiciones del medio, se presenta una *fase de crecimiento exponencial* en donde cada célula se dividirá en dos, al principio la velocidad de crecimiento celular será lenta para después incrementarse hasta llegar a su valor máximo y permanecer constante por un tiempo determinado.

El tiempo necesario para que a partir de una célula se formen dos, recibe el nombre de *tiempo de generación*, también se le conoce como tiempo de duplicación y puede obtenerse mediante la relación directa que existe entre el número de células presentes al inicio y al final de cierto lapso como se describe en la siguiente expresión:

$$N = N_0 2^n \tag{3.10}$$

De acuerdo a la expresión anterior n equivale a:

$$n = \frac{\log N - \log N_0}{\log 2} \tag{3.11}$$

Donde

- N = número final de células,
- N_0 = número inicial de células
- n = número de generaciones.

Nota: El tiempo de generación g es igual a t/n donde t son las horas o minutos de crecimiento exponencial. Cabe señalar que el tiempo de generación es diferente para cada especie y depende de diversos factores.

En un cultivo en el que no se agrega más sustrato o medio, no puede existir un crecimiento exponencial indefinido, tarde o temprano un nutriente esencial se terminará empobreciendo el medio o algún producto resultante del metabolismo microbiano se acumulará y alcanzará concentraciones tóxicas o inhibitorias lo que frenará el crecimiento exponencial. Cuando esto sucede se dice que se ha alcanzado la *fase estacionaria*, en ella no hay aumento ni decremento del número de células presentes, ya que la velocidad de crecimiento se vuelve lenta y algunas células empiezan a morir lográndose un equilibrio, a pesar de que no hay crecimiento neto en esta fase la mayoría de las funciones celulares continúan.

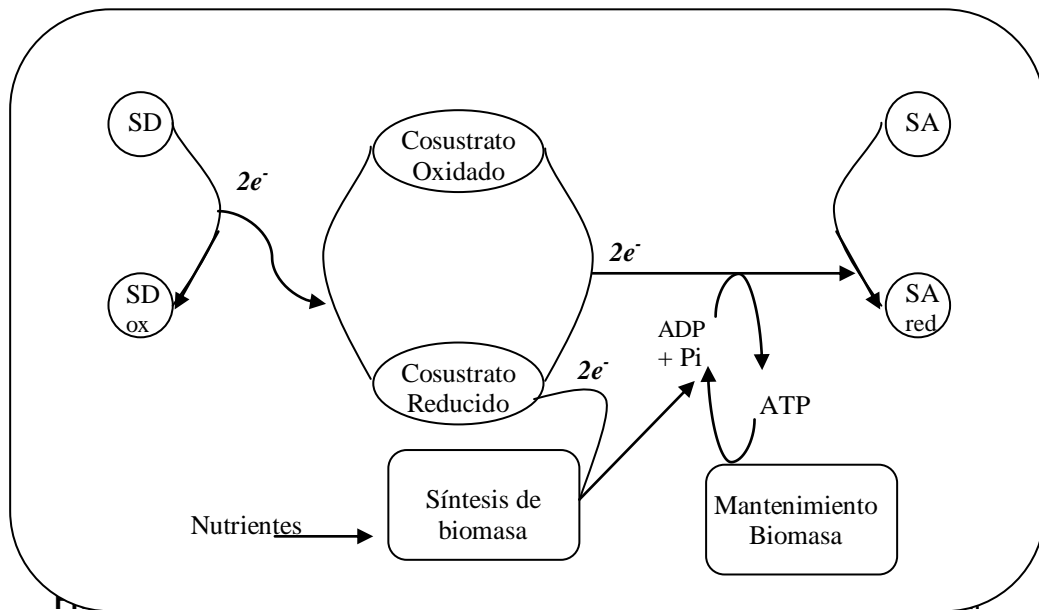
Si las condiciones del medio no cambian una vez alcanzada la fase estacionaria eventualmente las células morirán, la *fase de muerte* es la última etapa del crecimiento microbiano. En algunos casos va acompañada de lisis celular¹⁴ y al igual que la fase de crecimiento presenta un comportamiento exponencial, sin embargo la velocidad de muerte resulta ser más lenta que la de crecimiento. En los procesos continuos, se pretende que la fase de crecimiento estacionario se mantenga indefinidamente.

Aunque la mayoría de las reacciones de degradación forman parte del metabolismo normal de las células bacterianas, el objetivo del metabolismo microbiano no es la eliminación de los contaminantes ambientales, el objetivo principal es crecer y mantenerse. Mediante los nutrientes, la energía y los electrones disponibles en el medio ambiente es que las bacterias logran crecer y alimentarse, los nutrientes principales son C, N, P, S y otros elementos que conforman la base de los carbohidratos, aminoácidos, lípidos y ácidos nucleicos. Los electrones son necesarios para reducir los nutrientes a la forma química utilizada en los constituyentes celulares, y para generar la energía necesaria para la síntesis y el mantenimiento de la biomasa.

“El metabolismo microbiano se basa en la transferencia de electrones de un sustrato donador a uno aceptor. El sustrato donante se oxida y emite electrones que son llevados por un co-sustrato interno reducido. Una parte de los electrones transportados por el co-sustrato llegan al sustrato aceptor, esta transferencia generará energía en forma de un compuesto de almacenamiento, el adenosin trifosfato¹⁵ (ATP). El resto de los electrones y parte del ATP se emplean para generar biomasa nueva, mientras que el ATP restante satisface las necesidades de mantenimiento de las células” (Wheatley Andrew, “Anaerobic digestion: a waste treatment technology”, 1991).

¹⁴ Rotura de la membrana celular

¹⁵ Molécula orgánica fundamental en la obtención de energía celular. Se produce durante la respiración celular.



Nota: S.D.= sustrato primario donante, S.D.ox.= sustrato donante oxidado, S.A.= sustrato aceptor primario, S.A. red.= sustrato aceptor reducido, ADP = adenosina difosfato y Pi = fosfato inorgánico, e^- =electrón

Debido a que la transferencia de electrones entre los sustratos es esencial para la producción y la conservación de la biomasa reciben el nombre de sustratos primarios. Normalmente el sustrato donante de electrones primario es uno de varios compuestos orgánicos posibles, mientras que el sustrato aceptor de electrones primario normalmente es O_2 , NO_3^- , CO_2 , SO_4^- o un compuesto orgánico como en el caso de la digestión anaerobia que es el CH_4 .

Existen también sustratos secundarios, reciben este nombre porque no aportan un flujo de electrones suficientemente grande para mantener la síntesis de nueva biomasa y la subsistencia de la célula, esto se debe a que no se encuentran en altas concentraciones por lo tanto su flujo de electrones es menor al flujo mínimo requerido. Aún así pueden degradarse si actúan como sustratos secundarios, tal es el caso de los contaminantes orgánicos como los fenoles.

b. Modelo cinético

A través de la oxidación de un sustrato y la reducción de otro se obtiene energía y poder reductor para mantener las actividades celulares, estas reacciones son usualmente aceleradas

por la acción de las enzimas producidas dentro de la célula. La velocidad a la cual un determinado contaminante es removido depende de dos concentraciones, la primera corresponde a la concentración del catalizador, en este caso de la biomasa activa. La segunda corresponde a la concentración de los sustratos primarios que sirven de donador de electrones.

La ecuación de Monod es la más usada para describir la cinética del crecimiento microbiano. En ella se relaciona la velocidad específica de crecimiento microbiano con la concentración de un sustrato donador de electrones limitante.

$$\mu_{\text{sin}} = \left(\frac{1}{X_a} \frac{dX_a}{dt} \right)_{\text{sin}} = q \frac{S}{K + S} \quad (3.12)$$

Donde:

μ = tasa de crecimiento específico, t^{-1}

X_a = Concentración de biomasa activa (microorganismos), mg/L

t = tiempo

S = concentración del sustrato o nutriente limitante, mg/L

q = máxima tasa de crecimiento específico, mgDQO/mgSSV

K = constante de saturación media, concentración de sustrato (S) a la mitad de la máxima tasa de crecimiento ($\mu = q/2$) mg/L.

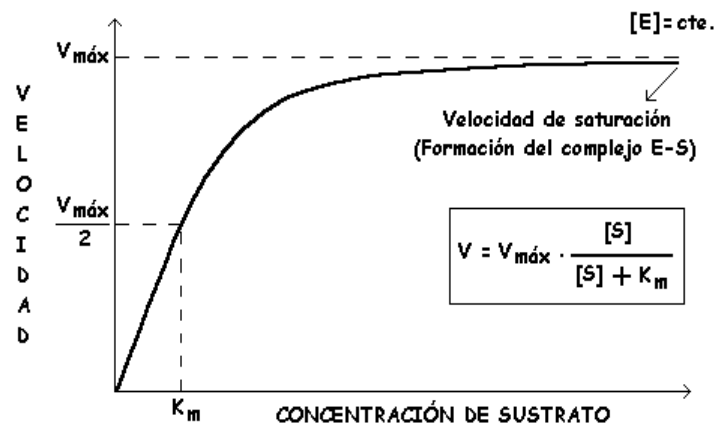


Figura 3.5. Esquema de los efectos del sustrato limitante en el crecimiento biológico.

La figura muestra como μ varía a distintas concentraciones de S y que $\mu = q/2$ cuando $K = S$. “En la ecuación anterior se asume que sólo hay crecimiento bacteriano sin embargo la biomasa activa tiene una demanda energética para llevar a cabo funciones celulares tales como movilidad, reparación, regulación osmótica, transporte y pérdida de calor” (Rittmann & McCarty, “Environmental Biotechnology: Principles and Applications”, 2001). Este flujo de energía se conoce como descomposición endógena, ya que la célula se oxida así misma a fin de satisfacer sus necesidades.

La velocidad de descomposición endógena viene dada por la expresión:

$$\mu_{desc} = \left(\frac{1}{X_a} \frac{dX_a}{dt} \right)_{desc.endógena} = -b \quad (3.13)$$

En donde:

b = coeficiente de descomposición endógena, t^{-1}

μ_{desc} = tasa de crecimiento específico debido a la descomposición.

Es importante puntualizar que no toda la materia orgánica que se oxida sirve para generar energía, una fracción de ella se acumula como biomasa inerte. De manera que la tasa de oxidación (o respiración para la generación de energía) es:

$$\left(\frac{1}{X_a} \frac{dX_a}{dt} \right)_{resp.} = -f_d b \quad (3.14)$$

Donde:

f_d = fracción de biomasa activa biodegradable.

La velocidad a la cual la biomasa activa se convierte en biomasa inerte viene dada por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{1}{X_a} \frac{dX_a}{dt} \right)_{inerte} = -(1 - f_d) b \quad (3.15)$$

De esta manera la tasa de crecimiento neto de la biomasa activa es la suma del crecimiento y la descomposición:

$$\mu = \mu_{sin} \mu_{desc} = \mu_m \frac{S}{K + S} - b \quad (3.16)$$

Debido a que la remoción de sustrato es lo que se busca en cualquier proceso de tratamiento biológico la expresión anterior se re-expresa en términos de utilización del sustrato. De esta manera la ecuación de Monod toma la forma.

$$r_{ut} = - \frac{q_m S}{K + S} X_a \quad (3.17)$$

Donde:

r_{ut} = tasa de utilización del sustrato.

q_m = máxima tasa de utilización del sustrato específica,

El crecimiento bacteriano y la utilización del sustrato están relacionados por la siguiente relación:

$$\mu_m = q_m Y \quad (3.18)$$

Donde:

Y: es el coeficiente de producción máxima medido durante cualquier periodo finito de crecimiento exponencial, (rendimiento total para síntesis celular).

Es la fracción de electrones convertidos en biomasa durante la síntesis celular.

Finalmente la expresión queda como sigue:

$$r_{net} = Y \frac{q_m S}{K + S} X_a - b X_a \quad \text{Ec. 3.19}$$

Donde:

r_{net} = tasa de crecimiento de biomasa activa neta.

$$\mu = r_{net} / X_a = Y \frac{q_{max} S}{K + S} - b \quad \text{Ec. 3.20}$$

▪ Efectos de la temperatura

El crecimiento biológico y la utilización del sustrato son parámetros ligados directamente a la estequiometría de la célula y la generación de energía. En la tabla 3.4 se muestran valores típicos para el proceso de digestión anaerobia, en donde se refleja el costo y la ganancia de energía durante la síntesis y la oxidación del sustrato donador de electrones.

Tabla 3.4: Constantes cinéticas para la digestión anaerobia

Donador de electrones	Aceptor de electrones	Fuente de Carbono	f_s	Y	q_m	μ_m
Acetato	Acetato	Acetato	0,05	0,035 gSSV/gDBO	8,4 gDBO/gSSV-d	0,3
H	CO	CO	0,08	0,45 gSSV/gDBO	1,1 g H/gSSV-d	0,5

Fuente: Henze & Herremoes, 1983, determinados a 35°C

Como es de esperarse la temperatura influye no sólo en la transferencia de gases y la sedimentación de los sólidos biológicos, también afecta a la actividad metabólica. De modo que a temperaturas por encima de la temperatura óptima, la velocidad de utilización del sustrato se duplica con cada aumento de 10° C en la temperatura. Este fenómeno puede ser aproximado mediante la siguiente expresión:

$$q_{m_T} = q_{m_{20}} (1.07)^{T-20} \quad (3.21)$$

Donde:

T está en °C y $q_{m_{20}}$ es el valor para q_m a 20 °C. Si este valor no es conocido, la relación puede ser generalizada:

$$q_{m_T} = q_{m_T} (1.07)^{(T-T^R)} \quad (3.22)$$

3.1.4 BALANCES DE MATERIA

Los balances de materia constituyen una herramienta esencial durante el diseño y la modelación de cualquier proceso biológico. Para obtener soluciones y parámetros importantes se considera uno de los sistemas más sencillos, el quimiostato¹⁶.

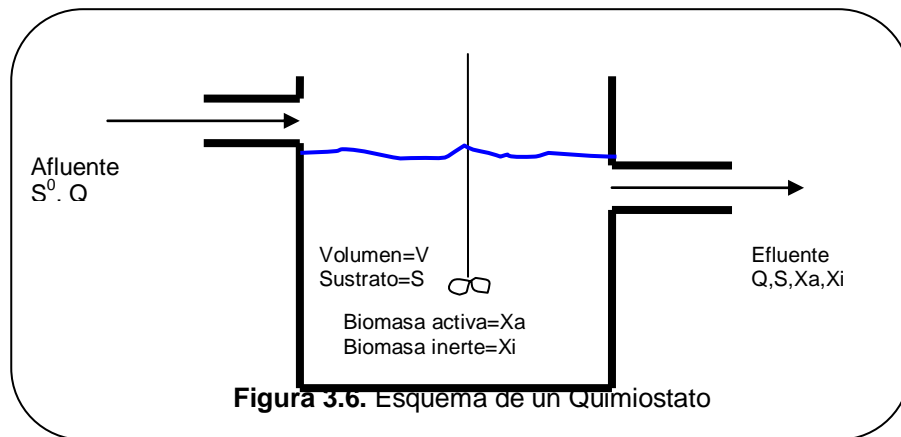


Figura 3.6. Esquema de un Quimiostato

Los primeros balances que deben hacerse involucran la concentración de biomasa activa y la concentración de sustrato (más adelante trataremos los balances correspondientes a la biomasa inerte). Para la biomasa activa contamos con la siguiente ecuación:

$$0 = \mu X_a V - Q X_a \quad (3.23)$$

Y para el sustrato:

$$0 = r_{ut} V + Q(S^0 - S) \quad (3.24)$$

Sustituyendo la tasa de crecimiento específico, la velocidad de utilización, el tiempo de retención hidráulico y despejando para el sustrato y la biomasa activa tenemos:

¹⁶ El quimiostato consta de un reactor totalmente mezclado que tiene concentraciones uniformes y estables de células activas (X_a), sustrato (S) y biomasa inerte (X_i). El reactor tiene un volumen fijo (V), y la velocidad de flujo de alimentación constante (Q) tiene una concentración de sustrato S^0 en el cual vendrán compuestos solubles o material que será hidrolizado una vez dentro del reactor.

$$0 = Y \frac{q_m S}{K + S} X_a V - b X_a V - Q X_a \quad \Longrightarrow \quad S = K \frac{1 + b\theta}{Y q_m \theta - (1 + b\theta)} \quad (3.25)$$

y para la biomasa activa:

$$0 = -\frac{q_m S}{K + S} X_a V + Q(S^0 - S) \quad \Longrightarrow \quad X_a = \frac{Y(S^0 - S)}{1 + b\theta} O_2 N + \frac{9}{20} H_2 O \quad (3.26)$$

Anteriormente se mencionó el concepto de tiempo de retención hidráulico, que usualmente se representa con θ y es igual al volumen del reactor entre el flujo de alimentación ($\theta = V/Q$). Existe otro concepto llamado tiempo de retención de sólidos, también se conoce como tiempo de retención celular y nos indica la edad de los lodos. Se representa con θ_x , tiene unidades de tiempo y se define:

$$\theta_x = \frac{\text{biomasa activa en el sistema}}{\text{velocidad de producción de biomasa activa}} = \mu^{-1} \quad (3.27)$$

Al ser el recíproco de la velocidad de crecimiento celular, es un parámetro que nos brinda información valiosa del estado del sistema. Si consideramos un sistema en estado estable, entonces:

$$\theta_x = \frac{V X_a}{Q X_a} = \theta \quad (3.28)$$

Re-escribiendo las ecuaciones obtenidas para la biomasa activa y el sustrato introduciendo el concepto de tiempo de retención celular tenemos:

$$S = K \frac{1 + b\theta_x}{Y q_m \theta_x - (1 + b\theta_x)} \quad \text{y} \quad X_a = Y(S^0 - S) \frac{1}{1 + b\theta_x} \quad (3.29)$$

En la Figura 3.7 se muestran los efectos de θ_x en X_a y S . Podemos observar que cuando θ_x es muy pequeño, $S=S^0$, y $X_a=0$. A esta situación se le llama lavado, y debido a que no se remueve sustrato del medio, no hay acumulación de biomasa activa. El valor de θ_x en el cual comienza el lavado se conoce como $\theta_{x,\min}$, este constituye el límite entre el estado estable y el lavado y se obtiene sustituyendo S^0 por S en la ecuación de arriba, de esta manera:

$$S = K \frac{1 + b\theta_x}{Y q_m \theta_x - (1 + b\theta_x)} \quad \Longrightarrow \quad \theta_x^{\min} = \frac{K + S^0}{S^0 (Y q_m - b) - K b} \quad (3.30)$$

θ_x Incrementa si S^0 aumenta pero llega a un valor límite asintótico

$$\left[\theta_x^{\min} \right] \lim = \frac{1}{Y q_m - b} \quad (3.31)$$

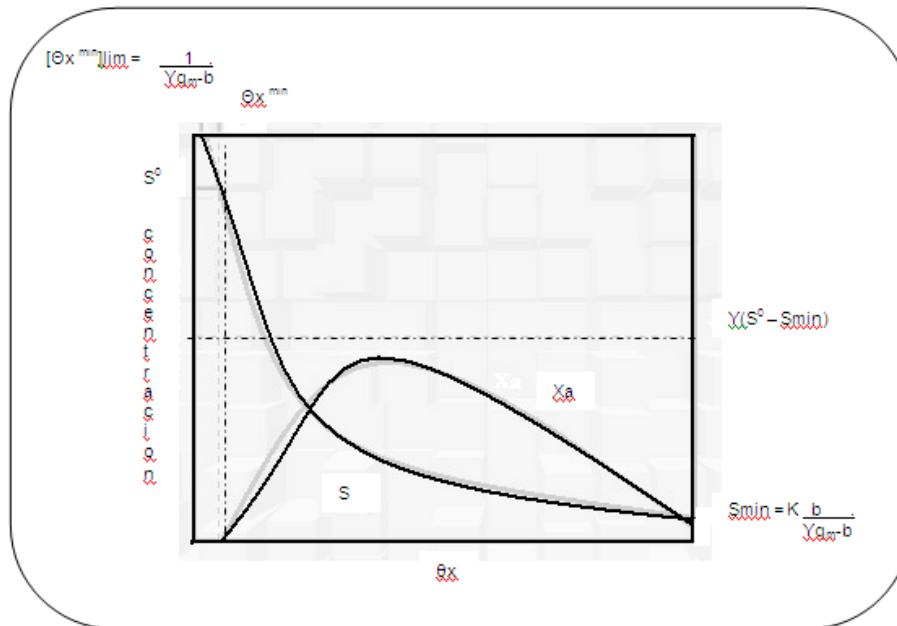


Figura 3.7: Efecto de θ_x en S y X_a

En la gráfica podemos observar también que para valores altos de θ_x , S se aproxima a otro valor límite S_{min} , que corresponde al valor mínimo de la concentración de sustrato a la cual se puede mantener el sistema en estado estable. S_{min} se obtiene llevando θ_x al infinito en la ecuación del sustrato:

$$S = K \frac{1 + b\theta_x}{Yq_m\theta_x - (1 + b\theta_x)} \quad \Rightarrow \quad S_{min} = K \frac{b}{Yq_m - b} \quad (3.32)$$

Esta ecuación nos indica que sólo cuando $S > S_{min}$ la biomasa podrá mantenerse en estado estable, por lo que S_{min} es un límite en la concentración del sustrato presente cuando el tiempo del proceso es muy largo.

Es así que podemos reducir S de S^0 a S_{min} al mismo tiempo que incrementamos θ_x de $\theta_{x,min}$ al infinito, el valor de θ_x que escojamos depende del balance entre remoción de sustrato y producción de biomasa.

Los siguientes balances que deben hacerse involucran la biomasa inerte que es el resultado de la respiración endógena, la porción no biodegradable de la célula. El balance de masa correspondiente viene dado por la siguiente expresión:

$$0 = (1 - fd)bX_aV + Q(X_i^0 - X_i) \quad (3.33)$$

Donde:

X_i = concentración de biomasa inerte

X_i^0 = concentración de biomasa inerte en el flujo de entrada

Resolviendo para X_i

$$X_i = X_i^0 + X_a(1 - f_d)b\theta \quad (3.34)$$

La suma de X_i y X_a es igual a X_v , la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV). Si además introducimos el tiempo de retención celular, X_v viene dada por:

$$\begin{aligned} X_v &= X_i^0 + X_a(1 + (1 - f_d)b\theta_x) \\ &= X_i^0 + Y(S^0 - S)\frac{1 + (1 + f_d)b\theta_x}{1 + b\theta_x} \end{aligned} \quad (3.35)$$

3.1.5 PRODUCTOS DEL PROCESO

Al final del proceso de digestión obtenemos biogás, biol o bioabono y lodos digeridos en el caso de que se trate de un proceso de digestión anaerobia de alta carga, que se caracteriza por llevar un régimen de mezclado completo, sin embargo, si se trata de un proceso de digestión convencional también obtendremos una capa de nata y una de sobrenadante.

a. Biogás

El biogás es la mezcla de gas producido por bacterias metanogénicas que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias. Está compuesto de 60 a 80% de metano, 30 a 40 % de dióxido de carbono y trazas de otros gases, como nitrógeno, ácido sulfhídrico, monóxido de carbono e hidrógeno como se indica en la tabla a continuación. “Un metro cúbico de metano a temperatura y presión normales tiene un poder calorífico neto de 35800 kJ/m³, el biogás tiene un poder calorífico de aproximadamente 22400 kJ/m³” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005).

Tabla 3.5: Características del biogás

Características del biogás	
Componente	Porcentaje
Metano	60-80
Gas carbónico	30-40
Hidrógeno	5-10%
Nitrógeno	1-2%
Monóxido de Carbono	0-1,5
Oxígeno	0,1
Ácido Sulfhídrico	0-1
Vapor de agua	0,3
Características del Metano	
Densidad	1,09 kg/m ³

Solubilidad en agua	Baja
Presión crítica	673,1 psia
Temperatura crítica	82,5 °C
Poder calorífico	22400 kJ/m3

Fuente: Moncayo, "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás", 2008, pág. 277.

El contenido de metano depende del contenido de humedad, temperatura, tiempo de retención. Depende mayormente del porcentaje de grasas, proteínas, e hidratos de carbono. Con grasas se obtiene un mayor porcentaje de metano que con hidratos de carbono.

En referencia a la pureza del biogás es importante el conocimiento del sulfuro de hidrógeno, ya que este puede ocasionar daños por corrosión al equipo electro-mecánico. En el capítulo 6 se describirá con mayor detalle lo referente a las características y purificación de biogás.

▪ **Estimación de la producción de biogás**

El cálculo de la producción de biogás se lo realiza con base en la teoría previamente detallada, considerando la concentración total de DQO en la biomasa.

CALCULO DE LA PRODUCCIÓN MÁXIMA DE METANO

$$\text{efluentegenerado} := 0.7 \frac{\text{m}^3}{\frac{\text{TRFF}}{\text{TRFF}}}$$

$$\text{frutoprocesado} := 137.4 \frac{\text{t}}{\text{dia}}$$

$$Q_{\text{diario}} := \text{efluentegenerado} \cdot \text{frutoprocesado}$$

$$Q_{\text{diario}} = 96.25 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{temperaturaefluente} := 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$S_o := 5550 \frac{\text{mgDQO}}{\text{l}}$$

$$\text{CargaDQO} := \frac{S_o}{1000000} \cdot (Q_{\text{diario}} \cdot 1000)$$

$$E_{\text{cargaDQO}} = 5.342 \times 10^3 \frac{\text{kgDQO}}{\text{d}} \quad \text{Eficiencia de remoción (50-60\%)}$$

$$S := S_o - \frac{(S_o \cdot E)}{100}$$

$$S = 1.387 \times 10^4 \frac{\text{mgDQO}}{\text{l}} \quad \text{xcii}$$

Factor de corrección para la temperatura operacional

$$F_T = \left(\frac{20}{T} \right)^{0.11} \cdot \left(\frac{20}{T} \right)^{0.11} \cdot \left(\frac{20}{T} \right)^{0.11}$$

**CACULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS EN BASE A LOS
SOLIDOS TOTALES VOLATILES**

SV:=26530

$c := 0.4 \frac{m^3}{kg}$

contenido de biogas por unidad de masa seca que entra al digestor

$Q_{diario} := 96.2 \frac{m^3}{d}$

ST:=3050

Contenido de sólidos totales

$V_{biogas} := \frac{ST \cdot Q_{diario}}{c} \cdot 1000$

Volumen de biogás

Nota: El volumen de biogás generado se estima como el promedio entre los dos valores obtenidos anteriormente

b. Bioabono

El residuo orgánico que se descarga del biodigestor obtenido de los procesos de digestión anaerobia es un lodo-líquido fluido de excelentes propiedades fertilizantes, el cual está constituido por la fracción orgánica que no alcanza a degradarse y por el material orgánico agotado.

En el proceso de fermentación se remueven sólo los gases generados (CH_4 , CO_2 , H_2S). Se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (N, P, K) contenidos en la materia prima, que son esenciales para las plantas. Este aspecto lo convierte en un valioso abono orgánico, prácticamente libre de olores, patógenos y de fácil aplicación.

La composición del bioabono, biol, o fertilizante orgánico que se produce en el digestor, su contenido de nitrógeno, carbono, fósforo, potasio y otros nutrientes, depende del origen del sustrato, de la permanencia en el digestor, de la temperatura del proceso y de la carga orgánica volumétrica. A través de la digestión anaeróbica se degrada la masa volátil de la biomasa en un 25% hasta el 80% mayormente en gas metano CH_4 y en dióxido de carbono CO_2 .

El grado de degradación, en el caso de desechos agropecuarios, depende mayormente del tipo de animal. En el caso del estiércol de ganado vacuno el % de degradación es de 30% para el estiércol de vacas lecheras y hasta el 40 % para ganado de engorde. Para el caso del estiércol de cerdo el % de degradación está entre 40 y el 50 %. Para la gallinaza este valor está entre el 45 y el 65 %. Los bajos porcentajes del estiércol de ganado se deben al material fibroso que contiene el estiércol producto del tipo de alimentación,

El estiércol de ganado contiene cerca de 1% de nitrógeno total. El nitrógeno se lo considera particularmente importante ya que es vital como nutriente de los cultivos para su crecimiento. A través del proceso anaeróbico este % de nitrógeno aumenta a 1,3 % aunque no se forma nuevo nitrógeno por la digestión. El 15 % al 18% del nitrógeno se convierte en amonio (NH_4).

Por otro lado el N gaseoso se transforma en amoníaco (NH_3), y diluido en agua está a disposición de las plantas como nutriente.

“La composición del bioabono en promedio tiene 8.5% de materia orgánica, 2.6% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.0% de potasio y un pH de 7.5” (Kiely, Gerard, “Environmental Engineering”, 1997). El bioabono sólido o líquido no posee mal olor, a diferencia del estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida, en las cantidades recomendadas; o bien, el bioabono sólido puede deshidratarse en lechos de secado de lodos y almacenarse para usarlo posteriormente. Al deshidratarse puede haber pérdidas por volatilización hasta 60% sobre todo de nitrógeno.

El biodigestor mejora la capacidad fertilizante del sustrato. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. El efluente es mucho menos oloroso que el afluente.

▪ **Uso del bioabono como fertilizante**

El bioabono o biol se utiliza como fertilizante orgánico para cualquier tipo de cultivos. “Su uso como fertilizante orgánico ha sido probado en varios países y en diferentes cultivos, reportando incrementos en las cosechas y mejoras en las propiedades del suelo a diferencia de los fertilizantes químicos que reducen a largo plazo la productividad de la tierra” (Vesilind, Hartman, Skene, “Sludge management and disposal for the practicing engineer”, 1986).

Ventajas del bioabono:

- i. Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención en el biodigestor, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión. “En condiciones de laboratorio, con temperaturas de 35 °C los coliformes fecales fueron reducidos en 50 – 70 % y los hongos en 95% en 24 horas” (Clesceri, Lenore, Greenberg, Arnol, “Standard Methods for the examination of water and waste water”, 1998).
- ii. Debido a su pH (7.5) funciona como un corrector de acidez, eliminando el aluminio tóxico y liberando el fósforo de sus sales insolubles de aluminio y hierro. Con elevación del pH se dificulta el desarrollo de hongos patógenos.
- iii. Su poder de fijación es tan grande que evita la solubilidad y lixiviación excesiva de sales, mejora la estructura del suelo, dejándolo más trabajable y facilitando la penetración de raíces. El efluente lleva parte de sus nutrientes en forma no disponible de inmediato para las plantas, los nutrientes se liberan paulatinamente

mediante ciertos procesos complejos de descomposición de materia orgánica- De esta forma, la nutrición es lenta pero continua.

- iv. 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.
- v. Permite el ahorro de la cantidad de otros abonos químicos convencionales sin disminución de la producción.
- vi. Presenta incrementos de la producción, al compararla con la de suelos no abonados.
- vii. Estabiliza la aglomeración de partículas del suelo, logrando que resistan a la acción disgregadora del agua; absorbiendo las lluvias más rápidamente, evitando la erosión y, conservando la humedad por más tiempo. La estructura porosa permite mayor aireación de la zona de raíces facilitando su respiración y crecimiento.
- viii. Favorece el desarrollo microbiano y las bacterias se multiplican por millones, dando vida y salud al suelo. La intensa actividad bacteriana fija nitrógeno atmosférico, transformándolo en sales aprovechables.

▪ **Efectos del bioabono como fertilizante**

El biofertilizante líquido promueve el equilibrio nutricional del suelo, aumenta su fertilidad natural, estimulando a los microorganismos benéficos del suelo. El bioabono líquido es rico en minerales, aminoácidos, vitaminas y hormonas. También mejora el balance nutricional en la planta, haciéndola más resistente al ataque de plagas y enfermedades originadas por el desequilibrio ambiental; es por eso que en algunos casos se le atribuye el efecto de actuar como repelente, fungicida o insecticida suave. Aumenta la producción, mejora la calidad de los productos, garantizando al agricultor mayor aceptación de sus productos y precio en el mercado.

“Un metro cúbico de bioabono producido y aplicado diariamente, puede fertilizar más de 2 ha. de tierra por año” (Schügel, Karl, “Bioreaction engineering”, 1985).

▪ **Formas de aplicación**

Efluente líquido: Presenta ventajas como la alta disponibilidad de nutrientes y la buena absorción por parte de las plantas, puede aplicarse inmediatamente después de la descarga del digestor, o puede almacenarse en tanques cerrados por un período no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno.

Efluente compostado: Otra manera de manejar el efluente es agregándole material verde (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, comercialización y aplicación.

Efluente seco: El secado resulta una pérdida casi total del nitrógeno orgánico de 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 se vayan a fertilizar grandes áreas.

Como biofertilizante puro, presenta una concentración de nutrientes relativamente alta, y a pesar de esta característica, puede ser aplicado directamente a los cultivos. Se lo utiliza también como aditivo en la preparación de soluciones nutritivas para cultivos hidropónicos. Las ventajas de la utilización de bioabono como fertilizante son enormes, no solo por su bajo costo sino más bien por los excelentes resultados que se obtienen en la producción agrícola de todo tipo de cultivos.

▪ **Comercialización**

El bioabono se lo puede comercializar en forma líquida y sólida. El abono sólido es de más fácil manipulación y transporte. Durante la aplicación del abono sólido los cultivos pueden fertilizarse sin tener equipos adicionales como mangueras en el riego por goteo.

El secado o deshidratación de los lodos se lo puede realizar por medios estáticos y mecánicos. Los medios estáticos como los lechos de secado son los más económicos y fáciles de operar. Las ventajas de este proceso estático de sacado son las siguientes:

- i. Estructuras simples
- ii. Costos bajos de construcción
- iii. Requerimientos mínimos de operación y capacitación
- iv. Bajo consumo de energía eléctrica
- v. Baja sensibilidad a la variabilidad del lodo
- vi. Bajo consumo de químicos
- vii. Alto contenido de sólidos en la torta seca de lodos

Los lechos de secado son celdas rectangulares de aproximadamente 90 cm. de alto o profundidad con base de ladrillo sobrepuesto y eventualmente con cubierta consistente en una estructura simple para evitar que los lodos se mojen con la caída de lluvias. Tienen en la base un sistema de drenajes para captar lixiviados que se escurren de los lodos durante el secado.

Los lixiviados se recogen en un pozo de bombeo y se recirculan al tanque de carga para utilizarlos como agua de mezcla para la nueva biomasa que se carga al digestor. Este proceso

tiene la ventaja de que la biomasa nueva que se carga al digestor se inocula con bacterias y se ahorra agua de mezcla.

El proceso de secado en los lechos se lo realiza en forma sencilla. Simplemente se bombean los lodos desde el tanque de descarga o directamente desde el pozo de succión hasta el lecho de secado. Se debe descargar un 60 % de la capacidad del lecho de secado en cada tanda de bombeo. Debido al alto contenido de agua de los lodos, esta se escurre rápidamente (formando un lixiviado) y por gravedad a través de las tuberías de drenaje hacia el pozo de bombeo.

El remanente semi-sólido de los lodos que se queda sobre el lecho se va secando con el flujo de aire y por radiación solar y pueden ser ensacados posteriormente para su comercialización. El abono deshidratado puede complementarse con compostaje y vermicultura¹⁷. El producto puede comercializarse a un precio mayor.

El costo de venta al mayoreo de un saco de 25 kilos de bioabono seco (deshidratado) al 10 % de humedad está en el orden de US\$ 5/saco. Para el cálculo de la rentabilidad del proyecto se asume una utilidad líquida del 50% correspondiente a US\$ 2.50/saco de 25 kilos. El resto se considera como gastos de personal, embalaje y comercialización.

Parte del bioabono puede comercializarse en forma líquida y envasado en botellas de PVC. El precio de venta de este producto es mucho más elevado y está en el orden de US\$ 0,50/l.

c. Lodos digeridos

Después de la capa en la cual tiene lugar la digestión se encuentra la zona de lodos digeridos que se compone de aquellos sólidos inorgánicos y volátiles que son de difícil degradación.

Las características de un lodo bien digerido son las siguientes:

- i. Debe ser sencillo de separar de la fase líquida.
- ii. La cantidad de sólidos digeridos que salen del proceso debe ser mucho menor a la que entró debido a que durante la degradación parte de ellos se transformaron en gases, ácidos líquidos y aguas.
- iii. Debe tener una apariencia aterronada.
- iv. Debe tener un color oscuro, si aparecen manchas o coloraciones verdes, es indicativo de que los lodos no están bien digeridos.
- v. No deben presentar mal olor.
- vi. La concentración de sólidos volátiles presentes deberá ser entre un 40-60% menor que la concentración a la entrada.

¹⁷ Método para compostar desechos de frutas y vegetales por medio de lombrices.

En la práctica no es factible el cálculo exacto de la producción de lodos en biodigestores. Solo se puede realizar una estimación empírica de la producción de lodos. Los lodos se producen por causa del componente orgánico o inorgánico que no se degrada por medio de la digestión anaeróbica. La masa volátil contenida en la masa seca es el único componente de la biomasa que se puede degradar y producir biogas. El resto de biomasa (inorgánicos, fibras, arenas, piedras, etc.) se sedimentan al fondo del digestor y deben ser retirados con frecuencia.

La cantidad de lodos que se precipitan es teóricamente el volumen entre la masa seca y la masa volátil y depende del tipo de biomasa, de la temperatura del proceso y del tiempo de retención. Por otro lado también una parte de la masa volátil que no se degrada y produce biogás, puede sedimentarse al fondo del digestor o mezclarse con el fertilizante líquido que se extrae diariamente del digestor.

Para el caso que se cuente con los valores de DQO de la biomasa, se puede realizar la estimación de la producción de lodos en base a datos empíricos y a varias mediciones en biodigestores. “Se estima que la producción de biogas esta en el orden de 0.12-0.15 gSSV/gDQO removido” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 265).

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

“Una planta de biogás tiene una alta inversión. No debe ser construida como una unidad temporal. Fallas y baja eficiencia de una planta de biogás ocurren por mala planificación y también por mala operación. La planificación y el diseño de las estructuras deben ser adecuados y apropiados al medio” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 412).

Las plantas de biogás se componen básicamente de un sistema de alimentación, agitación, captación de biogás y descarga de efluentes y lodos. Los biodigestores, estructuras de alimentación y descarga, se construyen generalmente en hormigón armado, acero al carbono, acero inoxidable, geomembrana y ladrillo.

El desarrollo del proyecto inicia con la determinación del tipo y cantidad de biomasa disponible, los requerimientos de energía y/o bioabono en la instalación agroindustrial en donde se construirá el biodigestor. Se debe verificar y cuantificar todos los equipos electromecánicos que demanden energía eléctrica. Se debe verificar las planillas de consumo mensual durante un período igual o mayor a seis meses. En base a estos consumos y la verificación de los equipos, se instalará un generador que abastezca dichos requerimientos. Siempre se debe sobredimensionar la unidad de generación de energía en un 20% para que el generador pueda suplir todos los picos y eventuales crecimientos de demanda de energía eléctrica.

Se debe realizar un análisis exhaustivo del tipo y la disponibilidad de biomasa. En este caso debido a que es una agroindustria donde se producen efluentes de desechos del proceso de extracción de aceite de palma se debe analizar, cuantificar y verificar los porcentajes de producción de desechos en base al peso bruto de toda la fruta procesada.

Antes de proceder al diseño de la planta, es preciso determinar el potencial de generación de biogás con el objeto de definir su factibilidad. Este potencial fue determinado mediante pruebas realizadas en digestores prototipo, en las que se generaron diferentes cantidades de biogás dependiendo del tiempo de retención hidráulico de cada prueba. Las pruebas realizadas también influyeron

en la selección del TRH adecuado para este tipo de biomasa. Además gracias a los prototipos pudimos determinar que el efluente de la extractora no requiere de dilución con agua para su aprovechamiento.

El diseño de la planta se lo ha realizado considerando las condiciones climáticas (temperatura promedio mínimas, medias y máximas), topográficas y aspectos socio económicos del lugar. Se debe tomar muy en cuenta para el diseño, los materiales de construcción existentes en el país. Es importante que para el diseño y construcción se utilicen tecnologías apropiadas. De esta manera se reducen los costos de construcción y operación por lo que el proyecto se vuelve sostenible técnica y económicamente.

De igual manera se debe verificar la existencia de personal capacitado para la construcción. Es importante que la mayoría de los materiales de construcción se adquieran localmente. “Muchas plantas de biogás han fracasado o están paralizadas porque han sido construidas mayormente con materiales importados y diseñados para que operen en países industrializados” (Wheatley, Andrew, “Anaerobic digestion: a waste treatment technology”, 1991). Por lo tanto, hay que diseñar estructuras que no tengan partes constantes de supervisión para su operación o que no sean de continua reposición. La selección de partes sofisticadas o muy complicadas requiere también de personal sofisticado o muy capacitado. Por esta razón es importante verificar en la zona la disponibilidad de personal tanto para la construcción como para la operación del digestor.

En el diseño de la planta de biogás se considera que parte del biodigestor está bajo tierra por lo que se debe analizar la condición de suelo, tipo de suelo (roca) y el nivel freático. En caso de encontrar un nivel freático muy alto se debe prever sistemas de drenaje. El suelo de la región es muy útil para este tipo de diseño, debido a que es un suelo arcilloso, no hay grandes problemas de infiltraciones. Este tipo de lodo no requiere de drenaje, es un suelo que no tiene grandes caídas de temperatura.

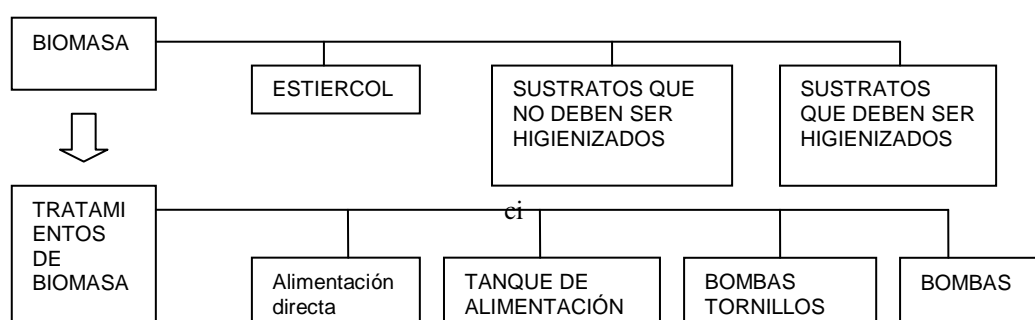


Figura 4.1: Etapas de diseño de la planta de biogás

El principal objetivo para la construcción de toda planta de biogás es obtener una alta producción de biogás y alta reducción de la materia orgánica por unidad de volumen del digestor. El proyecto se elaboró en base a este objetivo, lo cual implica analizar la biomasa disponible y conocer la demanda diaria de biogás.

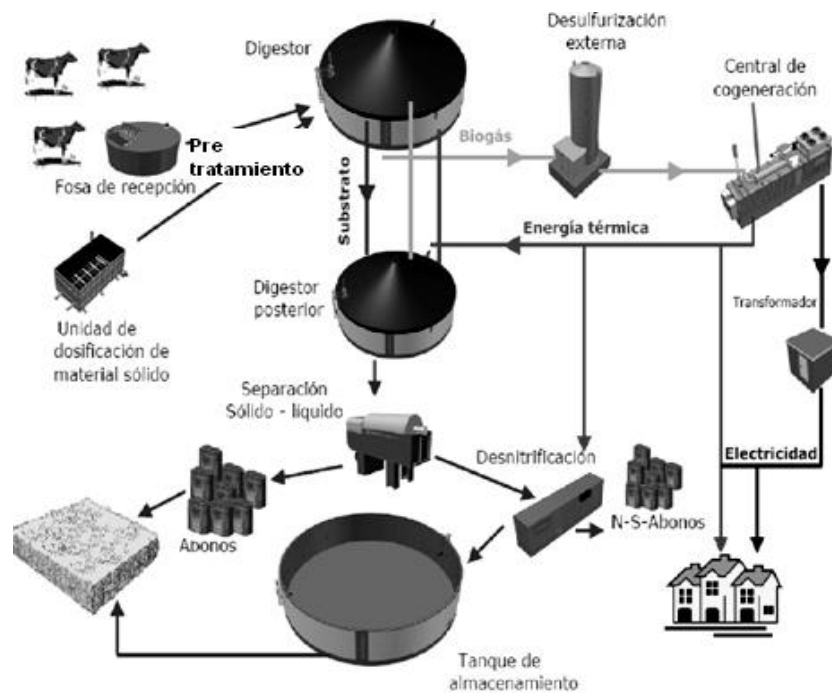


Figura 4.2: Aprovechamiento de la biomasa

También hay que analizar la existencia de otras fuentes alternativas de energía en la instalación. Se debe analizar los requerimientos de biogás para la producción de energía eléctrica y los usos o forma de aprovechamiento de fertilizante.

“Bajo condiciones ambientales óptimas para la digestión, la cantidad de biogás producido es proporcional a la cantidad de residuos agregados” (Schügel, “Bioreaction engineering”, 1985). Los materiales que pueden ser degradados fácilmente se estabilizarán más rápido que los resistentes, necesitando un tiempo de retención más corto y un digestor de menor tamaño. El volumen necesario del digestor está dado por el volumen de la suspensión de la biomasa multiplicado por el tiempo de retención conveniente según el tipo y tamaño de los desechos, la temperatura de operación y la carga orgánica volumétrica.

El dimensionamiento de la planta de biogás comprende el cálculo del volumen de los tanques de alimentación, digestores, tanques de descarga y almacenamiento de biogás, de las tuberías de alimentación, sistema de descarga de bio-abono y lodos, captación y conducción de biogás, sistema de reducción de H_2S , sistema de agitación y unidad de generación de energía eléctrica y calor.

Como se mencionó anteriormente, la construcción de la planta de biogás representa una gran inversión. Dicha inversión puede ser recuperada con la venta o aprovechamiento de la energía eléctrica y del fertilizante. Por eso es importante ya en la fase de diseño analizar las posibilidades de comercialización y/o aprovechamiento en la misma hacienda. Para evitar cualquier tipo de problema es importante que previo a la construcción de la planta de biogás se realice el estudio de factibilidad, los diseños detallados y se realice el estudio financiero en donde se justifiquen las necesidades de energía y fertilizante.

4.1 BIODIGESTORES

4.1.1 PROCESO DE OPERACIÓN

“El biogás se produce por medio de la fermentación anaeróbica en el digestor, bajo condiciones específicas de hábitat.” (Twidell, “Renewable energy resources”, 1986). El volumen de los digestores depende de la cantidad y tipo de biomasa, de la carga orgánica volumétrica y del tiempo de retención seleccionado. Para el diseño de los digestores hay que considerar los siguientes aspectos mínimos e instalaciones:

- Deben ser herméticamente sellados y no permitir el escape de biogás ni filtraciones de biomasa.
- Se deben construir con materiales que mantengan la temperatura de proceso o deben tener un aislamiento para que mantengan y soporten las variaciones de temperatura.
- Deben tener un sistema de agitación para la mezcla de la biomasa al interior del digestor.
- Hay que prever instalaciones o tuberías para la descarga de sedimentos que se acumulan en el fondo del digestor.
- Se debe instalar tuberías de descarga de bioabono y lodos.

- Hay que prever instalaciones para la toma de muestra de biomasa al interior del digestor.
- Deben tener un sistema de captación de biogás y las respectivas válvulas de seguridad de sobre presión y supresión.
- Se debe instalar un sistema para la medición de temperatura, nivel, pH y un sistema para el control de todo el proceso.
- Deben tener instalaciones para la alimentación de biomasa con su respectivo medidor de caudal.

Aparte de estos requerimientos mínimos se debe prever que los materiales que se utilicen para la construcción del digestor sean adecuados para el medio en que van a operar. Se trata de un medio acuoso, con alta humedad en donde se forman gases que pueden ser agresivos para el hormigón, acero, etc. Como zonas problemáticas al interior del digestor hay que considerar la transición entre el nivel máximo de llenado y la zona en donde se almacena el biogás. En esta zona se deben utilizar solo materiales que sean resistentes a los ácidos y que no se corroan con facilidad. Si se construyen los digestores en hormigón se debe prever en esta zona el revestimiento con pinturas epóxicas o bituminosas, con paneles de cerámica o acero para que el hormigón no se degrade o se corra. Debido a estas condiciones se decidió utilizar materiales anticorrosivos.

4.1.2 UBICACIÓN DEL DIGESTOR

La planta de biogás será diseñada teniendo en cuenta las condiciones medio ambientales del lugar donde se ubica la extractora de palma Hacienda "Tarragona". Estas instalaciones se encuentran ubicadas en la región litoral del Ecuador, en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Esta zona geográfica presenta condiciones favorables para el proceso de digestión anaeróbica.

La topografía del lugar así como las características del suelo, tendrán influencia en el tipo de digestor, ubicación de las estructuras, técnica constructiva y

costos. En este caso se aprovecharan las lagunas de tratamiento tradicionales ya construidas en la extractora, para reducir costos de construcción y preparación del suelo.

Se dispondrá de una lona o carpa de protección del digestor contra los aspectos meteorológicos tales como lluvia, viento, sol, etc., que pueden provocar fallas por esfuerzos térmicos en la membrana de cubierta. También se debe tomar en cuenta que el digestor no se construya cerca de árboles para que sus raíces no dañen las estructuras o sus ramas u hojas no dañen la cubierta en caso de temporales.

4.1.3 SELECCIÓN

Para el tipo de efluente que se pretende utilizar en este proyecto, el modelo de biodigestor más adecuado es el de Laguna cubierta¹⁸.

El sistema tradicional de la industria de extracción de aceite de palma para tratar y disponer de sus efluentes contaminantes es el sistema de lagunas anaerobias, pues es de lejos el sistema de tratamiento de menor costo en áreas donde hay terreno disponible.

El modelo de laguna cubierta implica construir los digestores con fondo de geomembrana HDPE (Geomembrana de alta densidad) y cubierta de EPDM (Etileno, propileno, dieno, monómero).

Se escogió diseñar un digestor tipo “laguna cubierta” debido a sus bajos costos de construcción, a la disponibilidad de terreno (piscinas anaeróbicas previamente construidas para tratamiento de efluentes), debido a que las condiciones climatológicas y topográficas son adecuadas, y debido a que el tipo de biomasa utilizado es adecuado para su aprovechamiento en este tipo de digestores por su bajo contenido de sólidos. Los materiales seleccionados son anticorrosivos y existen en el mercado nacional.

a) Digestores de geomembrana HDPE

¹⁸ Sistema que permite recolectar el gas generado en el sistema de lagunas anaerobias de tratamiento de efluentes contaminantes.

“Este tipo de biodigestores se están construyendo con mucha frecuencia en Latino América” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004). Se utiliza esta tecnología por los bajos costos de inversión y la facilidad en la construcción. En el país se cuenta con la experiencia en la construcción de reservorios de agua realizados con geomembrana para uso agrícola.

“El biodigestor es la parte más sensible e importante de la planta de biogás” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005). Requiere de una especial atención en la construcción, para que el digestor quede sin huecos u hondonadas. La excavación para el digestor se efectúa generalmente con retroexcavadoras. Hay que prestar especial atención a la estabilidad de los taludes y el almacenamiento temporal de la tierra a una distancia mínima de 2 metros del borde de la excavación. El fondo del digestor debe tener una pendiente del 0,5 % hacia las tuberías de extracción de lodos.

“El suelo debe ser apisonado y compactado previo a la colocación de la geomembrana (10 kg/cm²)” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 445). El suelo como se dijo anteriormente es un lodo rojo que se compacta muy bien y sirve como aislante térmico. La subrasante para la geomembrana debe ser uniforme y libre de cualquier objeto filudo, piedras o con puntas que puedan dañar la geomembrana.

La instalación de la geomembrana es crítica, por tanto debe ser realizada por instaladores de probada experiencia e idoneidad, una empresa especializada en el tema. El instalador será el responsable de la distribución de paños, soldadura, parchado, pruebas y reparaciones, así como todas las demás actividades que amerite la instalación de las geomembranas.

El sellado de las juntas se lo hace por calor. Se debe tener cuidado que el fondo del digestor este bien apisonado y compactado. Las esquinas del digestor se redondean para que la geomembrana se asiente bien al suelo.

Hay que tener cuidado en los pasos de tubería por la geomembrana para que no haya fugas de biomasa o de biogás. Los pasos de las tuberías por la geomembrana pueden ser sellados por la empresa que la coloca.

El canal sello hidráulico en el cual se sujeta la geomembrana de cubierta es de hormigón armado. Este canal se asienta sobre la geomembrana. El enlucido de esta estructura debe ser liso y solo en cemento.

En las paredes interiores que dan al digestor se debe impregnar un compuesto epóxico tipo Emaco P22 y MASTERSEAL® 435¹⁹ de Degussa o similar para la protección del acero y del hormigón contra la oxidación. Para la aplicación de este revestimiento se debe referir a las especificaciones técnicas del fabricante.

Del lado interior que da al digestor, en la escuadra que forma el canal de hormigón con el piso de geomembrana, se debe llenar con un material sellante de iguales características o tipo DynaFLEX 88 o MASTERFLEX® 2000. Este proceso es importante para evitar fugas de biogás entre la base del canal y la superficie de la geomembrana.

Los postes de apoyo para los agitadores se deben asentar sobre una base de hormigón para no dañar la geomembrana. La plancha de hormigón que sirve de base para los postes, se asienta sobre la geomembrana. Debajo de la base de hormigón se coloca una capa adicional de geomembrana. Se debe asegurar que esta base quede firme en el fondo.

Hay que prever un absoluto sellado de las juntas en las zonas de transición entre geomembrana y estructuras de hormigón, como los pozos de los agitadores. No pueden quedar fisura o agujeros por donde se pueda escapar gas o biomasa. Las juntas se las debe sellar con material elástico tipo caucho líquido, silicona o similar. El relleno de las juntas puede realizarse también con un sello asfáltico tipo DynaFLEX 88, bandas flexibles para sellar juntas o similar que cumpla con las especificaciones ASTM D3405 y ASTM D3406.

¹⁹ Recubrimiento epoxi/bituminoso con resistencia química

La geomembrana consistirá de materiales nuevos de primera calidad. Los rollos de geomembrana no deben tener costuras, y deben ser de Polietileno de Alta Densidad (HPDE – densidad > a 0,94 g/cm), que no contenga plastificantes, debe estar libre de agujeros, ampollas o contaminantes y ser 100% libre de fugas. La geomembrana debe ser suministrada como un lienzo continuo, sin uniones de fábrica en los rollos. La geomembrana debe cumplir con los requerimientos de calidad mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 4.1: Especificaciones de Geomembrana de HDPE

Especificaciones mínimas geomembrana de HDPE			
Propiedad	Uds.	Método de ensayo	Valores
Espesor mínimo	mm.	ASTM D 751 UNE 53213-2	1,00
Tolerancia	%	-	±4
Propiedades de tracción (*)			
Resistencia en el límite elástico	N/mm	ASTM D 638 Tipo IV	36 (32)
Elongación en el límite elástico	%		13 (10)
Resistencia en la rotura	N/mm		66
Elongación en rotura	%		800 - 950 (>800)
Resistencia al desgarro	N	UNE 53516	>=280
Resistencia al punzonamiento estático (CBR)	KN	ISO 12236	5,3
Dureza Shore D (*)	-	ISO 868	58 (55)
Estabilidad dimensional	%	ASTM 1204 (1 h, 100 °C)	±2,0%
Densidad de la geomembrana	g/cm ³	ASTM D 792	0,944 – 0,952
Índice de fluidez	g/10min.	ASTM D 1238, 190/5,00 – 190/2,16	<=1,15 – 0,5

Especificaciones de Geomembrana de HDPE (continuación)

Dispersión de negro de carbono	-	ASTM D 5596 UNE 53131	A ₁ /A ₂ <=4
--------------------------------	---	-----------------------	---------------------------------------

Resistencia Stress Cracking ESCR/NCTL	h	ASTM D 1693 ASTM D 5397	>3000 >300
Absorción de agua	%	ISO 62	<=0,1
Coefficiente de dilatación lineal 10 ⁻⁴	1/°C	ASTM D 696	1,2

Fuente: Hobson P., "The treatment of agricultural wastes", 2002.

El biodigestor será construido la mitad de la profundidad bajo tierra y la otra mitad sobre tierra. Se construye en una plataforma. De esta manera se optimiza el volumen de excavación con el de relleno. Este tipo de construcción sobre plataforma, lo protege contra inundaciones en los fuertes inviernos y lluvias que ocurren con mucha frecuencia en esta zona del país. En caso de que esta solución no sea factible o se construya el digestor totalmente bajo el nivel del terreno, se debe prever que el borde del digestor se construya al menos 0,50 m. sobre tierra.

El EPDM es el material ideal para la construcción de las cubiertas de digestores de cualquier tipo, sean estos de acero, hormigón armado o geomembrana. Sus características físico químicas como la resistencia a aguas agresivas, gases, humedad, elongación, rasgado, etc. hacen que las cubiertas EPDM tengan una larga duración. "Las membranas de este material pueden estirarse hasta el 400 % de su tamaño sin sufrir daños" (Moncayo, "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás", 2008, pág. 445). Este material puede ser utilizado también para la construcción de los tanques de almacenamiento de biogás.

En caso de daños en la cubierta de EPDM, estos se reparan fácilmente con un pegamento especial y aditivos de los que se utilizan para la vulcanización de llantas. Las propiedades más significativas de esta membrana son las siguientes:

- La característica más apreciada es su resistencia a la oxidación. El dieno que se incorpora en la fase final de la polimerización, lo hace un elastómero difícilmente oxidable.
- Es destacable su resistencia a la intemperie y a los agentes atmosféricos.

- Es muy resistente al calor, oscilando su campo de temperaturas entre los -15 °C y los 130 °C.
- Resistencia muy notable al agua en general, y sobre todo a las aguas cloacales y residuales.
- Es muy fácil de procesar, fabricándose con suma agilidad piezas por extrusión, moldeo, transferencia y confección.
- La adherencia al metal es idónea, sobre todo cuando se efectúa por reticulación con calor, es decir, mediante autoclave.
- Aventura a todos los demás elastómeros en la resistencia al ozono, y en general es buen agente antiácido.

La geomembrana debe ser suministrada en una sola pieza, en lo posible soldada en fábrica y manufacturada a la medida para el digestor. En caso que esto no sea factible, el sellado debe ser realizado en sitio por una empresa especializada. Si el sellado no es realizado en forma correcta puede haber fuga de biogás a través de las uniones de la membrana. La membrana de cubierta se coloca al último de la construcción, cuando todas las pruebas de estanqueidad y funcionamiento de tuberías, agitadores y bombas se hayan realizado satisfactoriamente. Los bordes de la membrana para sujetarla deben ser reforzados y con dobladillo. Este dobladillo debe ser manufacturado en fábrica. Se debe asegurar con el fabricante que este borde resista el templado de la membrana.

Para la colocación de la membrana de cubierta en digestores de geomembrana, se debe llenar el digestor con agua. Este llenado sirve también para las pruebas de estanqueidad. La membrana reposa sobre el agua. Adicionalmente se pueden colocar vigas de madera en forma transversal apoyadas sobre el canal de amarre. Estas vigas sirven de apoyo para la membrana. Las vigas se van corriendo conforme va avanzando la colocación de la membrana. Después y antes de cubrir totalmente el digestor, se retira la última viga.

El sitio donde se asiente la membrana para la colocación de anillos debe estar limpio y sin piedras, sin material corto punzante. No se debe pisar la membrana.

El uso de membranas para la cubierta de los digestores tiene las siguientes ventajas:

- Evita la construcción separada de un gasómetro.
- Simplifica el mantenimiento del digestor, siendo fácilmente removible.
- Asegura un elevado grado de termo-ventilación en la parte superior del digestor.
- Permite acumular el biogás a la presión de uso de los generadores, evitando la instalación de unidades de compresión para el biogás.
- Es resistente a las precipitaciones y vientos.
- Permite una mayor acumulación de biogás.
- Favorece a deshumedecer el gas contenido, sobre todo en los meses más fríos, mediante la condensación del agua en contacto de la pared de la membrana.

Para el amarre de la cubierta en digestores de geomembrana existen varias alternativas. La más utilizada consiste en construir un pequeño canal de hormigón armado en el cual se colocan pernos sobre los cuales se asienta la membrana. La membrana se prensa con una platina que se sujeta con los pernos como se observa en los planos del ANEXO A. La membrana queda prensada entre el piso y la platina.

El canal de hormigón armado debe ser llenado con agua hasta una altura de 20 cm., que representaría la presión máxima que rige al interior del digestor. En caso de subir la presión en el digestor, se sale el biogás por este sello hidráulico. Adicionalmente es necesario que se instale una válvula de seguridad.

4.1.4 PARÁMETROS DE DISEÑO

El parámetro mas predominante para el cálculo del volumen del digestor es la selección adecuada del tiempo de retención de la biomasa y la carga orgánica volumétrica, estos dos parámetros deben ser seleccionados cuidadosamente.

Para el dimensionamiento del digestor se debe aplicar el siguiente diagrama de proceso:

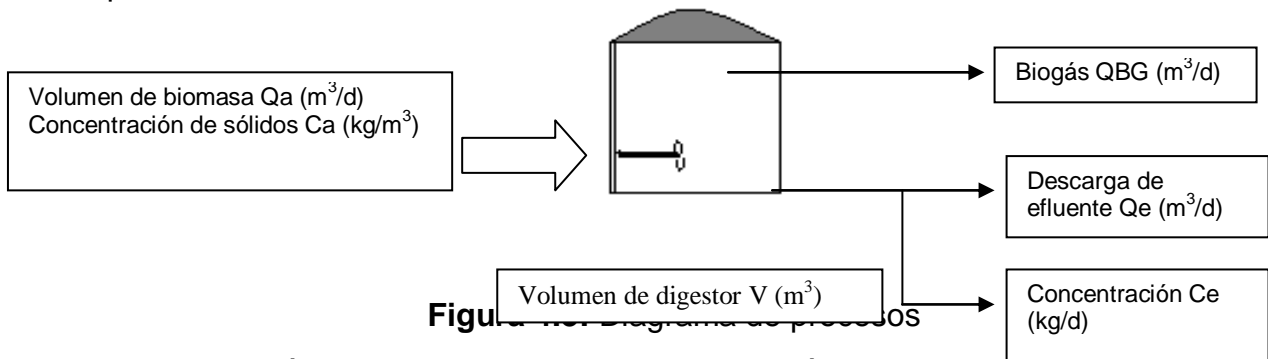


Figura 4.1 Diagrama de proceso

A continuación se presentan las ecuaciones de cálculo que se derivan del diagrama anterior:

Parámetros de carga

- Tiempo de retención promedio $TRH = V/Q_a$ (d) Ec. 4.1
- Carga hidráulica volumétrica $CHV = (Q_a \cdot C_a)/V$ ($kg/m^3 d$) Ec. 4.2
- Carga de lodos $CL = Q_a \cdot C_a / (V \cdot C_e)$ ($kg/kg. d$) Ec. 4.3

Parámetros de eficiencia

- Producción de biogás $BG = Q_{BG}/Q_a \cdot C_a$ (m^3/kg) Ec. 4.4
- Tasa de producción de biogás $TBG = Q_{BG}/V$ ($m^3/m^3 d$) Ec. 4.5
- Tasa específica de producción $BG_{esp} = Q_a/V \cdot C_e$ ($m^3/kg d$) Ec. 4.6

Para el dimensionamiento del digestor se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

- Tipo y disponibilidad de biomasa.
- Características físico-químicas de la biomasa.
- Temperatura de la biomasa y del medio ambiente.
- Geografía aspectos como la latitud, longitud y altitud.
- Energía que se quiere obtener.
- Carga orgánica volumétrica.
- Selección del tiempo de retención TRH.

a) Tipo y disponibilidad de biomasa

Es importante determinar previamente el tipo de biomasa disponible para la alimentación del digestor. Se debe determinar su volumen real y disponibilidad en el tiempo. En el caso del aprovechamiento del efluente de la extractora de palma africana “Hacienda Tarragona”, se debe determinar los volúmenes mínimos, medios y máximos.

La cantidad de residuos recolectado es crítica para el funcionamiento del digestor. Si la cantidad de residuos producidos diariamente es mayor que la capacidad de diseño se reducirá el tiempo de retención disminuyendo la producción de biogás.

Tabla 4.2: Producción de efluente de la extractora

generación de efluentes (m³/TRFF) =	0,7
---	------------

	TRFF	Volumen (m³)
anual	26400	18480
mensual	2200	1540
semanal	550	385
diario (4 días de proceso)	137,5	96,25

Nota: TRFF (tonelada racimo de fruta fresca procesada)

Fuente: Ing. Juan Carlos Álvarez, técnico de la hacienda “Tarragona”.

El caudal diario disponible de efluente de 96.25 m³/día, se mantendrá los días que opere la extractora. Se considera que los días que la planta no opera se puede re circular el biol almacenado en el tanque de descarga hacia el tanque de homogenización para su debido mezclado previo al ingreso al digestor, o simplemente no alimentar al digestor ya que en su interior aun habrá biomasa fresca. De esta forma se evita almacenar grandes cantidades de biomasa en el tanque de alimentación por varios días, lo cual produciría una degradación de la biomasa previa a su alimentación.

b) Características físico-químicas

En este caso como la biomasa a utilizarse es un efluente líquido, se deben determinar los valores de DBO₅, DQO y SST principalmente. Como ya se indico anteriormente estos valores fueron obtenidos mediante un análisis

físico-químico de muestras del efluente que se genera en la industria de extracción de aceite de palma (Ver tabla 3.1).

c) **Temperatura de la biomasa y del medio ambiente**

El efluente de la extractora de aceite de palma alcanza temperaturas entre 53 – 77 °C, con una media de 60 °C, por lo que previo a la alimentación de los digestores se debe reducir la temperatura hasta unos 40 °C por medio de un intercambiador de calor.

Para el dimensionamiento del digestor es importante conocer las temperaturas ambientales del sitio. Se deben recopilar y analizar las temperaturas mínimas, medias y máximas del medio ambiente. Estas temperaturas tienen gran influencia en la selección del tiempo de retención TRH. En base a estos datos se determina una temperatura media mensual que sirve como base para la selección del TRH.

Teniendo en cuenta que la ubicación del proyecto es en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, se han recopilado los datos de temperatura máxima, mínima y media más actualizados en dicha región. A continuación se presenta un resumen de las temperaturas ambientales promedio del lugar donde se pretende ubicar la planta de biogás:

Tabla 4.3: Temperaturas ambientales mínima, media y máxima de Santo Domingo de los Tsáchilas

	temperaturas 2008		
	mínima	Media	máxima
Enero	20,5	24,3	31,6
Febrero	21,5	24,7	32,1
Marzo	21	25,3	33,1
Abril	21,1	25,3	32,6
Mayo	20,5	24,5	32,4
Junio	19,5	24	31,6
Julio	19,6	24	31,6
Agosto	18,8	24,2	33
Septiembre	21,1	24,1	31,9
Octubre	20	24,4	32,4
Noviembre	20,5	24,2	32
Diciembre	21	24,6	31,6
	20,425	24,47	32,16

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e hidrología (INAMHI) resumen de boletines agro climatológicos mensuales.

Las condiciones climatológicas del lugar son convenientes para la construcción de un digestor tipo laguna cubierta ya que las variaciones de temperatura no son muy bruscas. La temperatura media ambiental permite un óptimo proceso de degradación anaeróbica sin el requerimiento de un equipo de calefacción, ni de aislantes térmicos.

Antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento del digestor, se debe evaluar el hecho de que a pesar de que la eficiencia y producción de biogás incrementa con la temperatura paralelamente aumentarán los costos de instalación y la complejidad de la misma.

El cuidado en el mantenimiento también debe extremarse a medida que se aumenta la temperatura, dada la mayor sensibilidad que presentan las bacterias a las pequeñas variaciones térmicas.

La temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (TRH). A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de digestor para digerir una misma cantidad de biomasa.

El rango de temperaturas que se ha seleccionado para el funcionamiento del digestor está entre 30 – 35 °C, teniendo en cuenta que la temperatura ambiente promedio es de 24 °C y que la temperatura de la biomasa a la salida del intercambiador será aproximadamente de 40 °C. La temperatura de funcionamiento en el interior del digestor se mantendrá gracias a la alimentación de biomasa a 40 °C durante el día. Mediante agitación se logra que la temperatura de la biomasa y la del medio ambiente se equilibren para que el digestor funcione en el rango de temperaturas requerido.

d) Selección del tiempo de retención hidráulico (TRH)

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los sistemas de carga discontinuos, donde el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. De acuerdo al diseño del

digestor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

La fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentar el TRH, sin embargo la producción volumétrica de metano (producción por unidad de digestor) disminuye, una vez superado el óptimo. Por esto para determinar el TRH que optimiza el proceso de digestión, nos basamos en referencias de plantas de biogás existentes que trabajan con este tipo de sustrato.

Como se mencionó anteriormente el TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. El TRH se determina en base a la temperatura de la biomasa y del medio ambiente. A menor temperatura ambiental mayor será el TRH necesario para la degradación de la materia orgánica. A mayor temperatura ambiental, menor el TRH.

Tabla 4.4: TRH – Temperatura del digestor

TRH en relación de temperatura del digestor	
Temperatura digestor	TRH
15	56
26	30
37	24
49	16

Nota: Esta tabla se basa en la grafica TRH – Temperatura del ANEXO D.

Fuente: Thomas Johansson, “Renewable Energy: Sources for fuel and electricity”, 1993.

El límite mínimo del TRH está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del digestor. El TRH máximo que se debe aplicar en zonas frías no debe ser mayor a 90 días, mientras que en zonas tropicales no debe ser menor a 14 días ni mayor a 45 días.

La selección de un TRH muy bajo da como resultado una COV demasiada elevada que puede sobrepasar el valor óptimo de 3 kg/m³.d. La mejor manera de lograr un buen dimensionamiento del volumen del digestor es seleccionar un TRH con el que se obtenga un COV <= 3 kg/m³.d.

La relación costo-beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura, el TRH y la COV resultante. En el presente proyecto se ha elegido un TRH de 28 días en base al tipo de sustrato que se pretende utilizar, su temperatura y la temperatura del medio ambiente. Este TRH también ha sido seleccionado en base a pruebas experimentales en biodigestores prototipo que contenían el sustrato que se utiliza en el diseño de la planta de biogás.

e) **Energía requerida**

“Casi todos los proyectos de diseño y construcción de plantas de biogás se ejecutan para la producción de biogás para aprovecharlo como combustible en la generación de energía eléctrica” (Murphy. J, McKeogh. E, Kiely. “Technical/economic/environmental analysis of biogas utilization”, 2003). Pevio al dimensionamiento del digestor es necesario conocer los reales requerimientos de energía eléctrica y determinar la potencia instalada requerida del proyecto en kW. Para la determinación de la potencia a instalar en kW se deben analizar los requerimientos de energía de todos los equipos eléctricos. Por otro lado y cuando se requiere biogás para uso en calderas u otros sistemas de combustión, es necesario determinar la cantidad de energía calorífica en BTU o kWh o los consumos de GLP u otro combustible. De esta forma se puede determinar la cantidad de biogás que deben producir los digestores.

En el caso de que los requerimientos de energía no sean determinantes, se debe analizar la producción de biogás que pueda ser aprovechada en el proyecto. No es rentable ni técnicamente procedente el utilizar toda la biomasa disponible en una instalación y generar grandes cantidades de biogás que no pueda ser utilizado para generar energía eléctrica y tenga que quemarse en antorchas.

Tabla 4.5: Energía eléctrica requerida

ENERGÍA REQUERIDA POR LA PLANTA DE BIOGÁS					
Equipo	Cant.	Potencia unitaria	Potencia total	Horas diarias de operación	Energía requerida
		kW	kW	h.	kWh/año

Agitadores	4	4,5	18	3	10368
Bombas	4	3	12	8	18432
Mezclador	1	0,5	0,5	4	384
Sopladores	3	0,4	1,2	4	921,6
Enfriadores	1	4,6	4,6	6	10074
Administración, casa de máquinas, alumbrado	Global		2	8	3072
TOTAL:					43251,6

Energía eléctrica requerida (continuación)

Energía requerida total		
Planta biogás	43251,6	kWh/año
Extractor de aceite	291600	kWh/año
TOTAL:	334851,6	kWh/año

Fuente: Ing. Juan Carlos Álvarez, técnico de la hacienda "Tarragona".

f) Carga orgánica volumétrica (COV)

La carga orgánica volumétrica es un factor determinante para el dimensionamiento del digestor. La COV puede aumentarse hasta un valor máximo determinado. A mayor COV mayor es el riesgo de inhibir el proceso, ya que se carga demasiada biomasa para las bacterias. En este caso el proceso se torna muy inestable y tiene que ser observado y analizado con más frecuencia. Generalmente la COV debe alcanzar valores entre 2 – 3 kgMV/m³ de digestor por día.

La COV es la medida de la concentración de componentes degradables y es un valor específico para cada tipo de biomasa y debe determinarse para cada sustrato. De esta manera se evita sobrecargas al digestor que pueden inhibir el proceso. En base a este valor y a la concentración de la biomasa se determina el tiempo de retención.

“A valores mayores a 3 kg/m³ se debe controlar constantemente el proceso y observar si no hay una disminución de la producción de biogás. A valores de COV entre 4-5 kgMV/m³ se observa una disminución del proceso de degradación de las bacterias y la consecuente disminución de biogás. Una COV de alrededor de 1-2 kgMV/m³ no da absolutamente ningún problema” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 378).

4.1.5 DIMENSIONAMIENTO DEL DIGESTOR

Una vez que se ha seleccionado el TRH, la COV máxima y se ha calculado el volumen de biomasa, se procede al cálculo del volumen del digestor.

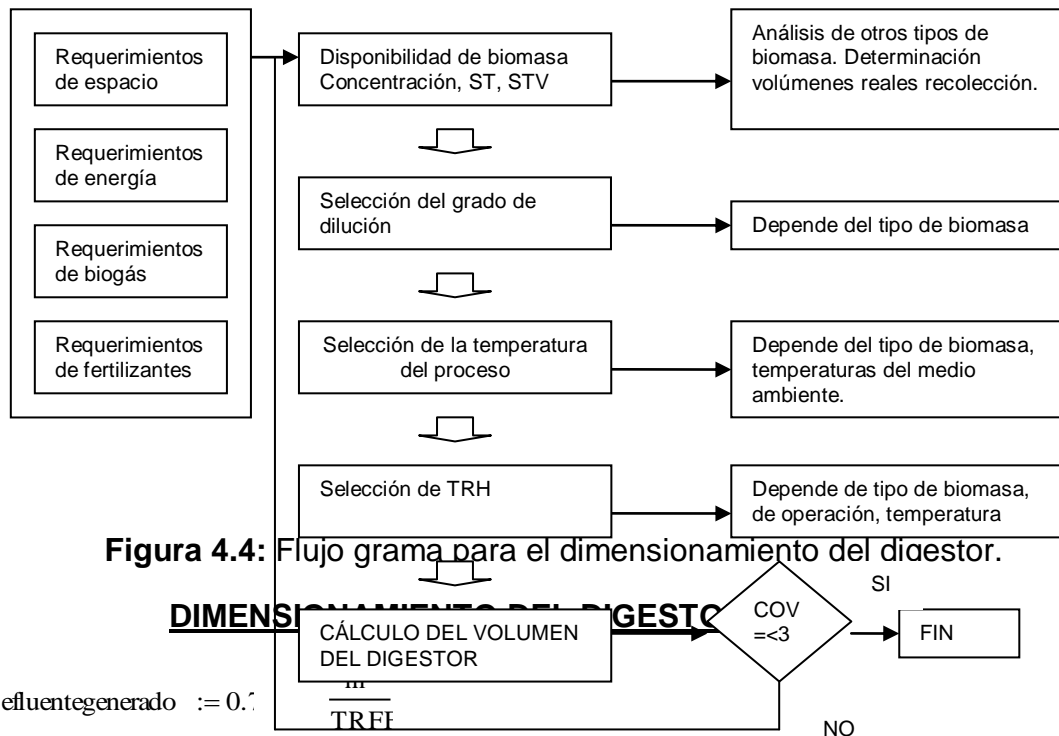


Figura 4.4: Flujo grama para el dimensionamiento del diaestor.

efluentegenerado := 0.1

frutoprosesado := 137.4

$Q_{diario} := \text{efluentegenerado} \cdot \text{frutoprosesado}$

$\text{volumendiariodisponible} := \frac{Q_{diario} \cdot \text{pesoespecifico}}{3}$

$\text{volumendiariodisponible} = 92.4$

Seleción de dilución: contenido de sólidos totales (aproximadamente 3,5%), no se requiere adicionar agua para la dilución de este tipo de biomasa con la que se alimentará al digestor.

TRH := 28 días

Seleccionado en base al tipo y a la temperatura de la biomasa y del medio ambiente.

$STV := 26.5 \frac{\text{kgSTV}}{\text{m}^3}$

Concentración de sólidos volátiles en el efluente

$V_d := Q_{diario} \cdot TRH$

$V_d = 2.695 \times 10^3 \text{ m}^3$

Volumen útil de digestor

$COV := \frac{(Q_{diario} \cdot STV)}{V_d} \frac{\text{kgSTV}}{\text{d} \cdot \text{m}^3}$

cxx

COV = 0.948

Carga orgánica volumétrica

La COV calculada es relativamente baja, pero se puede considerar como un valor aceptable ($COV \leq 3$). El volumen total del digestor comprende el volumen útil, más el volumen para almacenamiento del biogás y un % de seguridad (borde libre). Generalmente se debe asignar un borde libre de 1,00 m. o el equivalente a un 20% del volumen calculado. Se asigna este % de seguridad para cubrir eventuales variaciones en la producción de biomasa. El volumen mínimo para el almacenamiento de biogás en el digestor debe ser de 4-6 horas de producción de biogás. Posteriormente se presentará el cálculo detallado del volumen de biogás requerido y de tanques de almacenamiento de biogás.

Tabla 4.6: Dimensiones del digestor

Biodigestor		
Tipo:	Laguna cubierta	
Material:	Geomembrana	
Volumen requerido:	2749 *	m ³
Ancho	36	M
Largo:	24	M
Altura:	4,5	M

* Margen de seguridad 2%

4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Además del cálculo del volumen del biodigestor, el dimensionamiento de una planta de biogás consiste en la determinación de los volúmenes de las siguientes estructuras:

4.2.1 TANQUE DE ALIMENTACIÓN

El tanque de alimentación propuesto es construido bajo tierra por lo que la alimentación hacia el digestor se la realiza mediante un sistema de bombeo. Además debe preverse un sistema de mezcla para homogenizar a la biomasa. No existe una reglamentación o límites para la forma de alimentación del

digestor. El volumen de este tanque debe almacenar uno o dos días del volumen requerido para la alimentación del digestor. Las características de este tipo de tanques se presentan a continuación:

Tabla 4.7: Características del tanque alimentación

Tanques de mezcla y homogenización – alimentación	
Materiales de construcción	Hormigón, ladrillo reforzado enlucido a ambos lados. En lucido interior liso tipo pileta. Acero al carbón, acero inoxidable. Volumen de almacenamiento hasta 500 m ³ . Depende de volumen de alimentación diario del digestor.
Forma	Rectangular con esquinas redondeado o circular. Bajo nivel del terreno o sobre tierra.
Aplicación	Se utilizan para cualquier tipo de biomasa bombeable o que se alimente por gravedad al digestor.
Generalidades	Se consigue una buena mezcla y homogenización de la biomasa. Prever tuberías para la descarga de arena o material extraño que se deposite en el fondo. Prever una tubería de agua para la homogenización de la biomasa. Deben tener una rejilla antes de la descarga al pozo de bombeo al digestor.

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 280.

La pared del tanque de alimentación debe tener un espesor de pared de 0,20 m. La losa de cimentación es de hormigón armado de 30 cm. de espesor. Debe asegurarse una buena captación del suelo o del terraplén debajo de los tanques. Las paredes del tanque son enlucidas interior y exterior con cemento. El enlucido interior es de tipo pileta, liso. Se recomienda pintar las paredes interiores del tanque con un preparado antihongos. El piso del tanque debe tener una pendiente de 0,5% hacia la tubería de descarga de arenas y/o material inorgánico.

El tanque debe tener una tubería de descarga hacia el digestor. Esta tubería es de PVC y debe tener una rejilla de acero con una separación de barras de 50 mm. Debe ubicarse 50 mm. más arriba del fondo del tanque para que las arenas acumuladas en el fondo no descarguen al digestor. En esta tubería se debe instalar un medidor de caudal. Junto al tanque se debe prever la instalación de una llave de agua para el enfriamiento de la biomasa mediante un intercambiador de calor.

Para la descarga de biomasa hacia el digestor se debe prever llaves de paso, estas deben ser de excelente calidad y no de metales “dulces” como el cobre o el bronce.

Debido a las características del proyecto, a la topografía del terreno, a costos de construcción y al tipo de sustrato se decidió construir el tanque de alimentación en hormigón armado. El tanque es cilíndrico y tendrá un mezclador en la parte interior del tanque, para homogeneizar la biomasa previa a su alimentación. Además posee un intercambiador de calor, que reducirá la temperatura de la biomasa a 40 °C para su alimentación.

En este caso el tanque de alimentación se dimensiona para el volumen diario de alimentación del digestor. La mezcla se la realiza una vez al día y se programa para que toda esta carga se alimente al digestor en 8 -10 tandas en forma automática o manual. Este volumen incluye el volumen de la biomasa y de agua que se utiliza para la dilución. El volumen de agua que se debe adicionar para la dilución de la biomasa depende del porcentaje de sólidos totales de la biomasa. Al aprovechar el efluente de una extractora de palma, no se debe adicionar agua para la dilución de la biomasa ya que el contenido de sólidos totales de la misma está por debajo del 5%.

En algunos casos se prefiere dimensionar el tanque de alimentación para que almacene la mezcla de biomasa con agua requerida en un período de 1-2 horas. Es decir se mezcla cada vez solo la biomasa requerida para este período. La desventaja de esta selección es que se mezcla la biomasa varias veces al día. La ventaja es que se reduce el volumen del tanque de alimentación.

El llenado horario del tanque significa una reducción de los volúmenes del tanque de alimentación pero aumenta los costos de personal y la logística de transporte de biomasa se complica, por lo que para el presente proyecto se la descarta como alternativa más factible.

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALIMENTACIÓN

$$\text{efluentegenerado} := 0.7 \frac{\text{m}^3}{\text{TRFI}}$$

$$\text{frutoprocesado} := 137.4 \frac{\text{TRFI}}{\text{dia}}$$

$$\text{Qdiario} := \text{efluentegenerado} \cdot \text{frutoprocesado}$$

$$\text{Qdiario} = 96.25 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \quad \text{cxxxiii}$$

Debido al bajo contenido de sólidos totales (aproximadamente 3,5%), no se requiere adicionar agua para la dilución de este tipo de biomasa con la que se alimentará al digestor. Por este motivo el volumen útil del tanque de alimentación depende únicamente del volumen diario de biomasa con la que se alimenta al digestor, así:

Volumen útil del tanque de alimentación = **96,25 m³**

Tabla 4.8: Dimensiones Tanque de alimentación		
Forma:	Circular	
Volumen:	96,25	m ³
Diámetro:	6	M
Profundidad:	3,5	M

4.2.2 TANQUE DE DESCARGA

La biomasa soluble forma un líquido acuoso que representa aproximadamente las 2/3 partes del digestor. Este líquido acuoso denominado biol o bioabono debe extraerse del digestor y descargarse a un tanque.

El tanque de descarga se dimensiona para que almacene el biol o fertilizante que se descarga del digestor. Gran parte de la masa seca se degrada en el digestor, por lo que se obtiene una reducción de los volúmenes diarios de carga. Pero es recomendable que para el cálculo del volumen del tanque de descarga y por razones de seguridad, no se considere esta reducción de volumen.

El tanque de descarga debe ubicarse en una zona baja del terreno, aguas abajo del digestor. La descarga desde el digestor será por gravedad. La profundidad recomendada de este tanque es de 1,5 m. debido a la topografía del terreno.

El tanque de descarga debe ser dimensionado para que almacene como mínimo 1-2 días el volumen de biomasa que se carga al digestor. Este volumen debe ser determinado de acuerdo a los usos que se da al bioabono. En este caso se lo pretende aprovechar en las instalaciones de la hacienda donde se encuentra la extractora y el restante comercializar en la zona.

La captación de biol se la realiza por medio de tuberías de PVC. En el proyecto se eligió una tubería de 12 pulg. debido a su disponibilidad en el mercado y para evitar taponamientos. La ubicación debe ser seleccionada de tal forma

que la descarga se la realice en el tramo 1/3 superior del digestor. Se debe prever un sifón para que no se escape el biogás por esta tubería. También hay que instalar un deflector para que no se introduzcan basuras o espumas en la descarga u obstruyan el flujo de biol.

En este caso en el que el biol se utiliza en las mismas instalaciones como fertilizante, se debe prever de volúmenes mayores de almacenamiento para tener mayor flexibilidad. Generalmente en este tanque no se descargan los lodos que se depositan en el fondo del digestor.

El tanque de descarga se lo construirá en geomembrana debido a los bajos costos de construcción, al tipo de biomasa a utilizar (95 % agua), y a las ventajas anteriormente expuestas que se obtienen con dicho material. Se lo construye en forma de piscina similar al digestor, para aprovechar las instalaciones ya existentes en la localidad (piscinas anaeróbicas de tratamiento). Estos tanques no tienen que ser cubiertos. Se debe prever un pozo de bombeo para la extracción de los lodos que se asientan al fondo del tanque. Los lodos se bombean al lecho de secado de lodos. Dependiendo del uso que se le dé al bioabono, se deberá prever las respectivas instalaciones y equipos como bombas y estructuras de descarga.

En el caso del proyecto y conociendo que la ubicación del mismo dispone de un clima tropical, se puede descargar parte de este fertilizante al lecho de secado de lodos para su deshidratación, en caso que no se pueda aplicar en los cultivos.

Se ha considerado que en base al aprovechamiento del fertilizante en la agricultura o en su comercialización, el volumen del tanque de descarga será equivalente al volumen de almacenamiento de tres días de afluente al digestor, así:

Volumen afluente del digestor = $96,25 \text{ m}^3/\text{día}$

Volumen tanque de descarga = $96,25 \text{ m}^3/\text{día} * 3 \text{ días} = \mathbf{288,75 \text{ m}^3}$

Tabla 4.9: Dimensiones Tanque de descarga		
Volumen:	288,75	m^3
Largo 1:	16	m
Largo 2:	14	M
Ancho 2:	14	m
Ancho 2:	12	M

Profundidad:	1,5	M
--------------	-----	---

4.2.3 LECHO DE SECADO DE LODOS

Dependiendo del tipo de biomasa habrá una mayor o menor producción de lodos. Todos los componentes orgánicos o no orgánicos no solubles, las arenas, restos de biomasa no digerida, basuras, etc. se depositan al fondo del digestor.

La descarga de los lodos que se forman se la realiza del fondo del digestor. La tubería de lodos debe tener un diámetro mínimo de 300 mm. En este caso en el que parte del digestor será construido bajo tierra se debe prever la instalación de bombas para la descarga de lodos. Estas bombas se pueden instalar a un costado del digestor en un pozo de lodos. Se estima que se requieren dos pozos para la descarga de lodos del digestor. Dicha selección se realizó en base a la cantidad de masa seca que se carga al digestor. “Se calcula que aproximadamente el 20% de esta masa seca se puede asentar al fondo del digestor y formar lodos” (Vesilind, Hartman, Skene, “Sludge management and disposal for the practicing engineer”, 1986). Estos lodos se descargan preferentemente a un lecho de secado de lodos para su adecuación y aprovechamiento como fertilizante.

Los lechos de secado de lodos son celdas con paredes de ladrillo u hormigón. El piso de los lechos se construye con filtros de grava y arena. Sobre la capa de arena se colocan ladrillos sobrepuestos. Debajo de la grava se instalan tuberías de drenaje con un diámetro mínimo de 100 mm. Estas tuberías se construyen con una pendiente de 1 % o mayor. El alto de las paredes es de hasta 0,60 m. Se debe prever al menos la construcción de 2 celdas. De esta manera cuando una celda esta en mantenimiento o limpieza la otra celda sigue en operación. El área de cada celda es de aproximadamente 60 m². Cada celda debe tener una pequeña rampa para la extracción de lodos con carretilla o tractor pequeño. Debajo de la descarga de las tuberías se debe construir una loseta de hormigón para que los lodos golpeen en esta estructura y no dañen la cubierta de ladrillo.

El dimensionamiento de los lechos de secado se lo realiza en base a la cantidad de lodos que se extraen diaria o semanalmente de los digestores y a

la tasa de aplicación de lodos (TAL) que se aplica al lecho en kg/m² de área. La tasa de aplicación de lodos depende de la temperatura del medio ambiente y de la evaporación. “Para climas fríos con temperaturas ambientales promedio menores a 21 °C la TAL es de aproximadamente 25 kg/m². Para temperaturas del aire mayores a 21 °C y que alcanzan picos de hasta 30 °C la TAL puede llegar hasta 50 kg/m²” (Ibíd.). Para el proyecto se eligió una TAL de 40 kg / m², debido a que el promedio de temperaturas del aire es aproximadamente 24 °C. Para la estimación de la cantidad de lodos que se extraen del digestor hay que tomar en cuenta el tipo de biomasa, el porcentaje de dilución y el período o lapso de tiempo en que se realiza la descarga. Si la descarga se realiza diariamente se requiere menos área que si la descarga se realiza semanalmente.

La eficiencia de secado de los lechos depende de la temperatura del medio ambiente, de la tasa de evaporación, de las características del lodo, de su contenido de agua, etc. No hay una fórmula exacta para el cálculo de las dimensiones de los lechos. Las dimensiones que se obtienen son estimadas y deberán corregirse de acuerdo a las condiciones climatológicas y a las características de los lodos.

DIMENSIONAMIENTO DEL LECHO DE SECADO DE LODOS

$$Q_{\text{diario}} := 96.2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$ST := 3050 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{cargaentrada} := \frac{ST}{1000000} \cdot (Q_{\text{diario}} \cdot 1000)$$

$$\text{lodos} := \text{cargaentrada} \cdot 0.2$$

$$\text{cargaentrada} = 2.936 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\text{lodos} = 587.202$$

El 20% de la masa seca se puede asentar al fondo del digestor y formar lodos. Libro "Biodigestores" pag. 493

$$TAL := 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Tasa de aplicación de lodos. Seleccionado en base a la temperatura ambiental.

$$\text{lechosecado} := \frac{\text{lodos}}{TAL}$$

$$\text{lechosecado} = 14.68 \frac{\text{m}^2}{\text{d}}$$

Se considera que la descarga de lodos se la realiza semanalmente (4 días de proceso)

$$\text{Arealecho} = 58.72$$

$$\text{Arealecho} := \text{lechosecado} \cdot 4$$

Área:	58,7	m ²
Largo:	9,5	m
Ancho	6,2	m

4.2.4 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ^m² BIOGÁS

La producción de biogás es discontinua y variable, mas no su aprovechamiento, el consumo de biogás depende de la capacidad del generador de energía eléctrica y puede ser constante durante el día. Gran parte del biogás que se produce en una planta de biogás se almacena al interior de los digestores en la cúpula o cubierta de membrana.

Para contrarrestar estas variaciones en el consumo es necesaria la instalación de tanques para almacenar biogás. Los tanques deben ser dimensionados para que puedan almacenar una cierta cantidad de biogás que suple las variaciones de la producción-consumo de biogás y no debe ser sobre dimensionado debido a los costos que ocasionaría su construcción.

Los tanques de almacenamiento de biogás deben ser cerrados, impermeables a las fugas de biogás, resistentes a los rayos UV, a altas temperaturas y a condiciones climatológicas adversas. Previo a su operación deben realizarse pruebas de estanqueidad.

El volumen de almacenamiento de biogás se calculó en base a la estimación de la producción de biogás y a los consumos horarios de los generadores de energía eléctrica. Se considera que aproximadamente un 30% del biogás se almacena en el mismo digestor debajo de la cúpula formada por la membrana de cubierta. El resto del biogás que no se consume durante el día también es almacenado en tanques que deben tener como mínimo un volumen que cubra la producción de biogás de por lo menos 4 horas.

Por razones de seguridad en los tanques se deben instalar válvulas de seguridad para el control de presiones máximas y subpresiones. De esta manera se puede evitar altas presiones que puedan dañar el tanque y evitar fugas de biogás.

Los tanques de almacenamiento de biogás seleccionados son de baja presión y se los construye de membrana EPDM debido a su resistencia a la oxidación, a su resistencia a la intemperie y debido a que la presión del biogás al interior del digestor es de apenas 20 mbar.

▪ **Tanques de baja presión**

La mayoría de tanques de almacenamiento de biogás se construyen en baja presión con un rango de 20 a 50 mbar (de presión de agua). Exteriormente tienen forma de almohada o sacos. Para la protección climática, estos se instalan bajo cubiertas sencillas.

Tabla 4.11: Características de los tanques de almacenamiento de biogás

Especificaciones para la construcción de tanques de almacenamiento de biogás de EPDM	
Volúmenes	Almacenamiento hasta 2000 m ³ o más. La membrana debe permitir como máximo fugas de biogás de 5% por día.
Presión	Presión de trabajo 0-50 mbar. Se puede aumentar la presión de estos tanques poniendo pesos encima de la membrana.
Seguridad	Si se instala en espacios cerrados, estos deben ser bien ventilados para evitar mezclas de biogás con oxígeno.

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 563.

TANQUE DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS

Vbiogas := 1314.55	$\frac{m^3}{\text{día}}$	volumen estimado
CapGen := 200	kW	capacidad del generador
Htrabajo := 12	h	horas de trabajo del generador
Congen := 35.67	$\frac{m^3}{h}$	Consumo de combustible del generador

$V_{olgen} := C_{ongen} \cdot H_{trabajo}$		
$V_{olgen} = 428.04$	$\frac{m^3}{\text{dia}}$	requerimiento de combustible
$V_{oltan} := V_{biogas} - V_{olgen}$		+
$V_{oltan} = 886.51$	$\frac{m^3}{\text{dia}}$	Biogás no consumido por generador
$V_{oldig} := V_{oltan} \cdot 0.3$		
$V_{oldig} = 265.953$	$\frac{m^3}{\text{dia}}$	Volumen almacenado en digestor 30%
$V_{oltanalm} := V_{oltan} - V_{oldig}$		
$V_{oltanalm} = 620.557$	m^3	Volumen del tanque de almacenamiento

Para el almacenamiento de biogás se dispondrá de dos tanques de geomembrana de 350 m³. Estos tanques serán ubicados sobre apoyos de cemento dentro de un galpón de protección.

4.3 SELECCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los materiales de construcción se eligieron principalmente en base a su disponibilidad en el mercado nacional y en base a la relación costo-beneficio. El biodigestor será construido en geomembrana y cubierta EPDM. Además su estructura está compuesta de un canal sello hidráulico construido en hormigón. El tanque de alimentación es de hormigón y el de descarga de geomembrana al igual que el digestor. Las tuberías son de PVC, debido al alto grado de corrosión que puede ocasionar el biogás. Es necesario utilizar materiales de excelente calidad no corrosibles.

Convenientemente se debe seleccionar un proceso y tipo de digestor que cumpla con los siguientes requerimientos:

- Bajo impacto visual.
- Carga de la biomasa por gravedad.
- Construcción de digestores y obras auxiliares con materiales disponibles en el medio.
- Alta durabilidad de materiales de construcción y equipos.

- Escaso mantenimiento de obras y equipos.
- Reducidos costos de construcción.
- Simple en su operación, mantenimiento y control.

Tabla 4.12: Listado de materiales de construcción

ESTRUCTURAS	UN	CANT
HORMIGON $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$	m3	55
ACERO REFUERZO $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	3300
ENCOFRADO	m2	240
ENLUCIDO PISOS Y PAREDES	m2	270
ARENA LECHO DE SECADO DE LODOS	m3	45
GRAVA LECHO DE SECADO DE LODOS	m3	53
ADITIVOS, REVESTIMIENTOS, MEMBRANAS		
REVESTIMIENTO EPOXICO DIGESTOR (MASTERSEAL 435)	m2	82
JUNTAS DE ESTANQUEIDAD (masterflex 2000 tipo JC o similar)	m2	12
ADITIVO EPOXICO Concrecive 1430 de Degussa o similar	galón	8
ADITIVOS HORMIGON	galón	1
GEOMEMBRANA HPDE PARA FONDO DE LAGUNA 1 mm	m2	1250
MEMBRANA EPDM PARA CUBIERTA 1 mm	m2	1642
TUBERIAS Y ACCESORIOS		
TUBERIAS DE PVC 300 mm 1 Mpa	m	150
CODOS DE 45° PVC 300 mm 1 Mpa	u	2
CODOS DE 90° PVC 300 mm 1 Mpa	u	13
T DE PVC DN 300 a 200 mm 1MPa	u	5
VALVULA DE CIERRE 300 mm	u	8
MANOMETROS 300 mm	u	6
VALVULA CHECK 300 mm	u	6
VALVULA DE DESCARGA CONDENSADOS 25,4 mm	u	4
MEDIDOR DE CAUDAL (BIOGAS) 25,4 mm	u	4
VALVULA DE SEGURIDAD SOBREPRESION Y SUBPRESION	u	4
FILTRO DE CARBON ACTIVADO	u	1
FILTROS DE REMOCION DE H ₂ S	u	3
TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE BIOGAS COMPLETOS	u	2
PINTURA AMARILLA PARA TUBERIAS DE BIOGAS	global	1
ACCESORIOS VARIOS, LLAVES MENORES, CODOS, T, etc.	global	1
EQUIPO ELECTROMECHANICO		
BOMBAS DE 0,80 Kw	u	5
AGITADORES 4,5 KW	u	2
MEZCLADOR 0,5 KW	u	1
GENERADORES DE ELECTRICIDAD 200 kW	u	1
SOPLADOR/BLOWER DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO 20 mbar	u	2
EQUIPO DE MONITOREO pH , T, Metano	u	1

CAPÍTULO 5

ESTRUCTURAS Y SISTEMAS AUXILIARES

5.1 ESTRUCTURAS AUXILIARES

5.1.1 TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE SUSTRATO

Las tuberías se dimensionan hidráulicamente para los volúmenes de carga máxima y considerando todas las pérdidas del sistema. El diámetro seleccionado para las tuberías será el mínimo requerido ya que la biomasa que se va a conducir es mayormente agua. Las tuberías deben instalarse con una pendiente mínima del 0,5 % para permitir que se vacíen por gravedad. Se debe prever la instalación de accesorios para limpieza en casos de obstrucción. Estos accesorios puede ser una T con un tapón ciego en la bifurcación.

Para el cierre del flujo se debe utilizar llaves de paso de cierre rápido y de media vuelta. Todas las válvulas y accesorios deben instalarse con llaves de cierre para permitir su cambio rápido o limpieza en caso de obstrucciones.

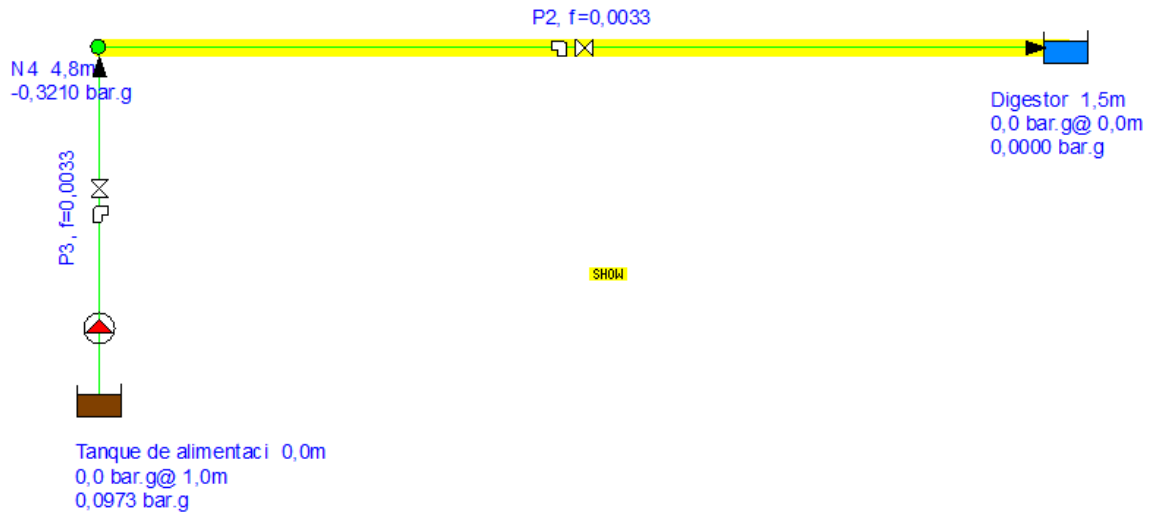
La biomasa homogenizada en el tanque de mezcla se conduce al biodigestor por medio de tuberías. La impulsión se la realiza por medio de bombas. Estas tuberías serán de PVC debido a su alta disponibilidad en el mercado. El diámetro mínimo debe ser DN=300 mm, ya que con un diámetro menor puede haber peligros de obstrucción o pérdidas mayores de presión por fricción.

Las tuberías de descarga de lodos, de rebose y descarga de lixiviados desde el digestor también deben tener un diámetro mínimo de DN=300 mm. La descarga de lodos se la realiza desde el digestor mediante unos pozos de bombeo que se conectan con el fondo del digestor donde se acumulan éstos lodos. Las bombas requeridas para la extracción de lodos se seleccionarán posteriormente en este capítulo.

Las tuberías de conducción requeridas han sido diseñadas en base al programa Pipe Flow Expert. Cabe mencionar que para dicho diseño se ha escogido como fluido de trabajo al agua ya que la biomasa a ser alimentada al digestor es hasta en un 95% agua. A continuación se presentan los resultados:

Tabla 5.1: Tubería de alimentación de biomasa

Propiedades del fluido utilizado (agua)	
Temperatura °C	40
Presión bar.g	0
Densidad kg/m ³	992



Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter mm	Roughness Mm	Length m	Total K	Mass Flow kg/sec	Flow m³/sec	Velocity m/sec	Entry Elevation M	Exit Elevation m	Reynolds Number	Flow Type	Friction Factor	Friction Loss m.hd	Fittings Loss m.hd
P2	Water	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	0,005	15	5,4	3,2736	0,0033	0,046	4,8	1,5	21050	Turbulent	0,02561	0	0,001
P3	Water	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	0,005	4,8	2,29	3,2736	0,0033	0,046	0	4,8	21050	Turbulent	0,02561	0	0

Pipe	Total K	Description	K Value	Imperial Size	Metric Size
P2	5,4	Open pipe Exit	1	12"	300 mm
		Globe Valve	4,4	12"	300 mm
P3	2,29	Check Swing Valve	1,4	12"	300 mm
		Pipe Entry Sharp Edged	0,5	12"	300 mm
		Standard Bend	0,39	12"	300 mm

Pipe Name	Pump Name	Speed rpm	Flow In/Out m³/sec	Velocity m/sec	Suction Pressure bar.g	Pump Head (+) m.hd Fluid
P3	Pump	Set Flow Rate	0,0033	0,046	0,0973	0,501

Node Type	Node	Elevation m	Total Flow In M³/sec	Total Flow Out m³/sec	Mass Flow In kg/sec	Mass Flow Out kg/sec
Tank	Tanque de alimentaci	0	0	0,0033	0	3,2736
Join Point	N4	4,8	0,0033	0,0033	3,2736	3,2736
Tank	Digestor	1,5	0,0033	0	3,2736	0

Tabla 5.6: Tubería de descarga de biol

Propiedades del fluido utilizado (agua)	
Temperatura °C	35
Presión bar.g	0
Densidad kg/m ³	994

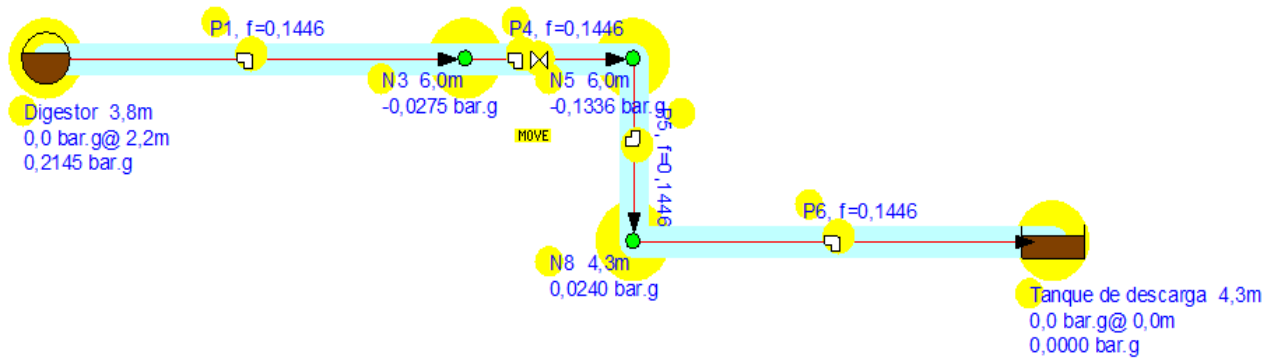


Tabla 5.7: Resultados en accesorios

Pipe	Total K	Description	K Value	Imperial Size	Metric Size
P1	1,2	Elbow 45 °	0,21	12"	300 mm
		Pipe Entry Projecting	0,78	12"	300 mm
P4	5,18	Globe Valve	4,4	12"	300 mm
		Branch Tee	0,78	12"	300 mm
P5	0,39	Standard Bend	0,39	12"	300 mm
P6	1	Open pipe Exit	1	12"	300 mm

Tabla 5.8: Resultados en nodos

Node Type	Node	Elevation m	Total Flow In m ³ /sec	Total Flow Out m ³ /sec	Mass Flow In kg/sec	Mass Flow Out kg/sec
Tank	Digestor	3,8	0	0,1446	0	143,7047
Join Point	N3	6	0,1446	0,1446	143,7047	143,7047
Join Point	N5	6	0,1446	0,1446	143,7047	143,7047
Tank	Tanque de descarga	4,3	0,1446	0	143,7047	0
Join Point	N8	4,3	0,1446	0,1446	143,7047	143,7047

Tabla 5.9: Resultados en tuberías

Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter (mm)	Roughness Mm	Length m	Total K	Mass Flow Kg/sec	Flow m³/sec	Velocity m/sec	Entry Elevation m	Exit Elevation m	Reynolds Number	Flow Type	Friction Factor	Friction Loss m.hd	Fittings Loss m.hd
P1	Water	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	0,005	4,5	1,2	143,7047	0,1446	2,002	3,8	6	839242	Turbulent	0,01233	0,037	0,245
P4	Water	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	0,005	3,5	5,18	143,7047	0,1446	2,002	6	6	839242	Turbulent	0,01233	0,029	1,059
P5	Water	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	0,005	0,5	0,39	143,7047	0,1446	2,002	6	4,3	839242	Turbulent	0,01233	0,004	0,08
P6	Water	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	0,005	5	1	143,7047	0,1446	2,002	4,3	4,3	839242	Turbulent	0,01233	0,042	0,204

Tabla 5.10: Tubería de extracción de lodos

Propiedades fluido utilizado	
Temperatura (°C):	35
Densidad(kg/m³):	994

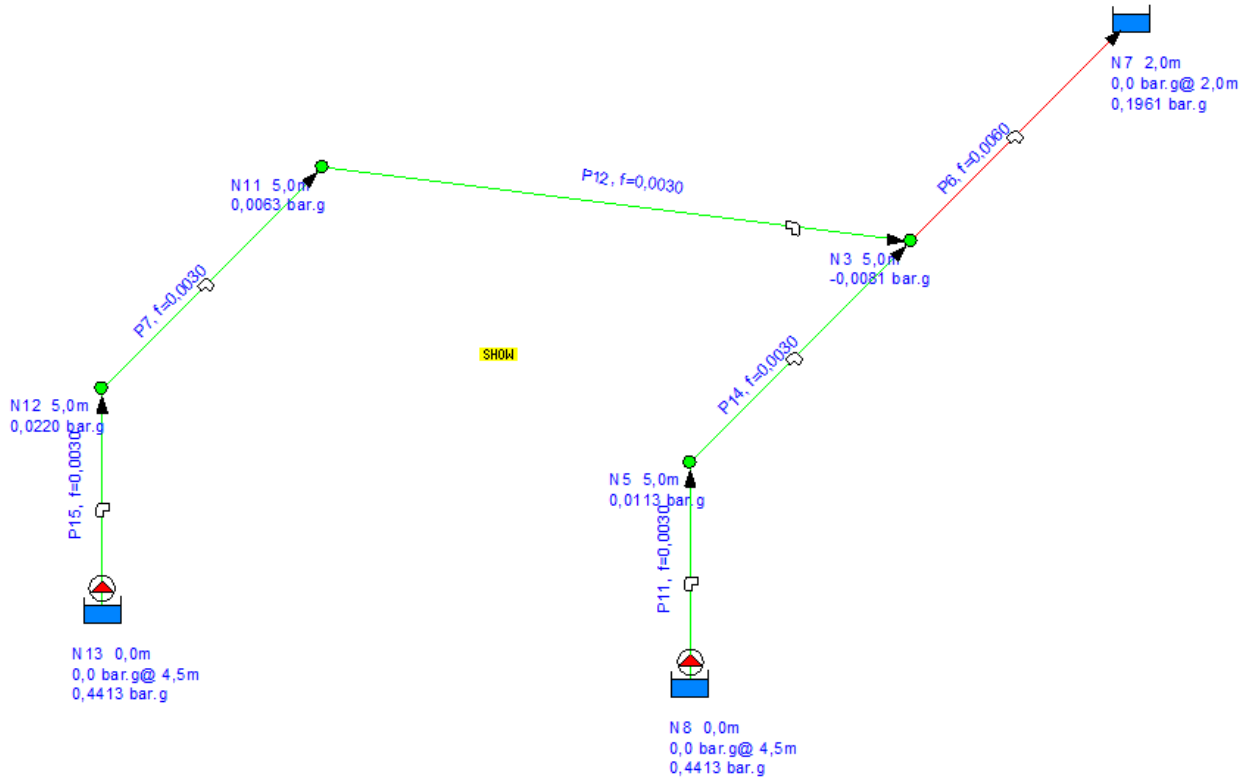


Tabla 5.11: Resultados en nodos

Node Type	Node	Total Flow In m³/sec	Total Flow Out m³/sec	Mass Flow In kg/sec	Mass Flow Out kg/sec
Join Point	N3	0,006	0,006	5,964	5,964
Join Point	N5	0,003	0,003	2,982	2,982
Tank	lecho de secado	0,006	0	5,964	0
Tank	Biodigestor	0	0,003	0	2,982
Join Point	N11	0,003	0,003	2,982	2,982
Join Point	N12	0,003	0,003	2,982	2,982
Tank	Biodigestor	0	0,003	0	2,982

Tabla 5.12: Resultados en tuberías

Pipe Name	Material	Inner Diameter mm	Length m	Total K	Mass Flow kg/sec	Flow m³/sec	Velocity m/sec	Reynolds Number	Flow Type	Friction Factor	Friction Loss m	Fittings loss m
P6	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	10	5,4	5,964	0,006	0,083	34830	Turbulent	0,02274	0,000	0,002
P7	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	19	0,39	2,982	0,003	0,042	17415	Turbulent	0,02683	0,000	0,000
P11	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	4,5	2,57	2,982	0,003	0,042	17415	Turbulent	0,02683	0,000	0,000
P12	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	26	0	2,982	0,003	0,042	17415	Turbulent	0,02683	0,000	0,000
P14	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	19	0,26	2,982	0,003	0,042	17415	Turbulent	0,02683	0,000	0,000
P15	12" PVC (ANSI) Sch. 40	303,225	4,5	2,57	2,982	0,003	0,042	17415	Turbulent	0,02683	0,000	0,000

Tabla 5.13: Resultados en accesorios

Pipe	Total K	Description	K Value	Imperial Size
P6	5,4	Open pipe Exit	1	12"
		Globe Valve	4,4	12"
P7	0,39	Standard Bend	0,39	12"
P11	2,57	Standard Bend	0,39	12"
		Pipe Entry Projecting	0,78	12"
		Check Swing Valve	1,4	12"
P12	0	No Fittings		
P14	0,26	Through Tee	0,26	12"
P15	2,57	Standard Bend	0,39	12"
		Pipe Entry Projecting	0,78	12"
		Check Swing Valve	1,4	12"

Tabla 5.14: Resultados de bombas

Pipe Name	Pump Name	Speed rpm	Flow In/Out m³/sec	Velocity m/sec	Suction Pressure bar.g	Pump Head (+) m.hd Fluid
P11	Pump	Set Flow Rate	0,003	0,042	0,0975	2,003
P15	Pump	Set Flow Rate	0,003	0,042	0,0975	2,003

5.1.2 TUBERÍAS DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE BIOGÁS

La captación del biogás que se produce en los digestores se la realiza por medio de tuberías. El material seleccionado para las tuberías es PVC. Los diámetros y números de tuberías han sido seleccionados en base a la producción de biogás. Se ha previsto de al menos dos puntos de captación de biogás ubicados en lados opuestos.

“En muchos países latinoamericanos no existen normas técnicas o reglamentos que contengan una especificación detallada de los requisitos mínimos de seguridad para el diseño, fabricación, construcción, instalación, inspección, pruebas, operación y mantenimiento de redes de transporte y distribución de gas natural o biogás” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005). Por este motivo se decidió tomar en consideración las especificaciones dadas por el estándar nacional estadounidense ASME B 31.8 – Edición 1999 (Revisión de ASME B 31.8). Este código trata específicamente de “Sistemas de tubería para transporte y distribución de gas”, por lo que se recomienda revisarlo detalladamente previo a la construcción del sistema de tubería a ser instalado según el diseño y las recomendaciones que se presentan a continuación.

La instalación de las tuberías de biogás debe realizarse con mucho cuidado por personal especializado. “Alrededor del 60% del mal funcionamiento de los biodigestores se debe a fallas en la instalación de estas tuberías” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004, pág. 267).

Los problemas que presentan son los mismos que cualquier instalación de gas, con el inconveniente adicional de que el biogás está saturado por un 100 % de vapor de agua y contiene ácido sulfhídrico. Por este motivo se seleccionó tuberías de PVC para evitar corrosiones y remplazos constantes en las tuberías dando así para en el proceso.

Todas las tuberías se deben instalar con una pendiente de mínimo 0,5 % para que puedan ser drenadas las aguas de condensado que se forma en su interior, por excesiva humedad en las líneas. En cada tramo con cambio de pendiente se deberá instalar una llave de cierre para eliminación de aguas de condensado.

Durante la instalación de tuberías de gas se debe prestar atención a los siguientes aspectos:

- Impermeabilidad de las juntas o uniones de accesorios y tuberías.
- Puntos de drenaje de la línea de conducción: con una trampa de agua situada en el punto más bajo de las tuberías para vaciar aguas acumuladas.
- Protección contra impacto mecánico.

Para evitar presiones mayores a 20 mbar y presiones negativas dentro del digestor, es importante la instalación de dos válvulas de control de presiones. Una para limitar la presión en el digestor a un máximo de 20 mbar y otra para evitar presiones negativas. En caso de presiones negativas puede aspirarse oxígeno al interior del digestor y causar explosiones si es que el biogás alcanza niveles críticos de mezcla. Es importante que la instalación de estas dos válvulas se la realice técnicamente y por personal capacitado, para evitar que en el paso de las tuberías de la membrana queden agujeros o vacíos por donde se escape el biogás. Se debe sellar bien las zonas de paso o cruce de tuberías para evitar fugas de gas.

Todas las tuberías de biogás deben pintarse de amarillo con una flecha que indique la dirección de flujo. Las tuberías de captación de biogás se conducen a una tubería principal que transporta el biogás a los sistemas de purificación y aprovechamiento.

El diseño del sistema de tubería para transporte de biogás se lo realizó con el programa Pipe Flow Expert. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 5.15: Tubería de captación y conducción de biogás

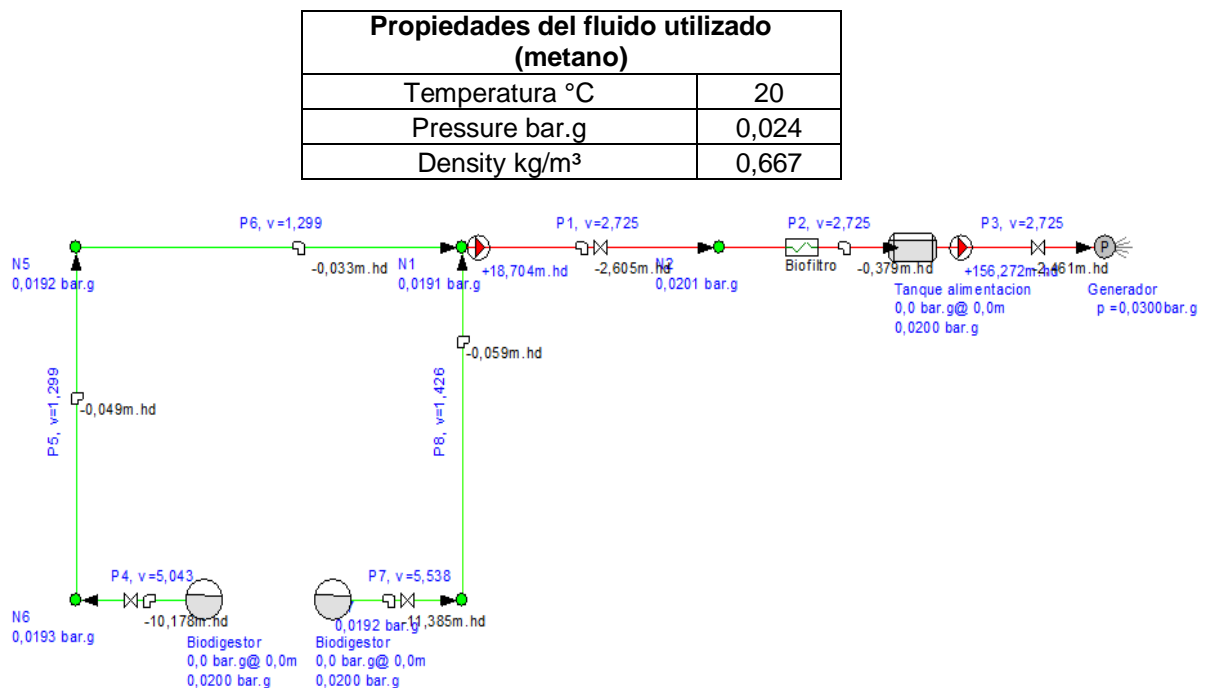


Tabla 5.16: RESULTADOS EN ACCESORIOS				
Pipe	Total K	Description	K Value	Imperial Size
P1	6,88	Globe Valve	6,5	2"
		Through Tee	0,38	2"
P2	1	Pipe Exit to Container	1	2"
P3	6,5	Globe Valve	6,5	2"
P4	7,85	Standard Bend	0,57	1"
		Globe Valve	6,5	1"
		Pipe Entry Projecting	0,78	1"
P5	0,57	Standard Bend	0,57	2"
P6	0,38	Through Tee	0,38	2"
P7	7,28	Pipe Entry Projecting	0,78	1"
		Globe Valve	6,5	1"
P8	0,57	Standard Bend	0,57	2"

Tabla 5.17: RESULTADOS DE BOMBAS (SOPLADORES)						
Pipe Name	Pump Name	Speed rpm	Flow In/Out m³/sec	Velocity m/sec	Suction Pressure bar.g	Pump Head (+) m.hd Fluid
P1	Pump 1	Set Flow Rate	0,0059	2,725	0,0191	18,704
P3	Pump 2	Set Flow Rate	0,0059	2,725	0,02	156,272

Tabla 5.18: RESULTADOS EN TUBERÍAS

Pipe Name	Fluid Zone	Material	Inner Diameter mm	Roughness mm	Length M	Total K	Mass Flow kg/sec	Flow m³/sec	Velocity m/sec	Entry Pressure bar.g	Exit Pressure bar.g	Reynolds Number	Flow Type	Friction Factor	Friction Loss m.hd	Fittings Loss m.hd
P1	Methane	2" PVC (ANSI) Sch. 40	52,502	0,005	4	6,88	0,0039	0,0059	2,725	0,0191	0,0201	8676	Turbulent	0,03224	0,93	2,605
P2	Methane	2" PVC (ANSI) Sch. 40	52,502	0,005	5	1	0,0039	0,0059	2,725	0,0201	0,02	8676	Turbulent	0,03224	1,162	0,379
P3	Methane	2" PVC (ANSI) Sch. 40	52,502	0,005	4	6,5	0,0039	0,0059	2,725	0,02	0,03	8676	Turbulent	0,03224	0,93	2,461
P4	Methane	1" PVC (ANSI) Sch. 40	26,645	0,005	0,3	7,85	0,0019	0,0028	5,043	0,02	0,0193	8147	Turbulent	0,03291	0,48	10,178
P5	Methane	2" PVC (ANSI) Sch. 40	52,502	0,005	19	0,57	0,0019	0,0028	1,299	0,0193	0,0192	4135	Turbulent	0,03965	1,234	0,049
P6	Methane	2" PVC (ANSI) Sch. 40	52,502	0,005	25	0,38	0,0019	0,0028	1,299	0,0192	0,0191	4135	Turbulent	0,03965	1,624	0,033
P7	Methane	1" PVC (ANSI) Sch. 40	26,645	0,005	0,3	7,28	0,0021	0,0031	5,538	0,02	0,0192	8948	Turbulent	0,03211	0,565	11,385
P8	Methane	2" PVC (ANSI) Sch. 40	52,502	0,005	19	0,57	0,0021	0,0031	1,426	0,0192	0,0191	4541	Turbulent	0,03858	1,448	0,059

Tabla 5.19: RESULTADOS EN NODOS

Node Type	Node	Surface Press. bar.g	Press. at Node bar.g	Total Flow In m³/sec	Total Flow Out m³/sec	Mass Flow In kg/sec	Mass Flow Out kg/sec
Join Point	N1	N/A	0,0191	0,0059	0,0059	0,0039	0,0039
Join Point	N2	N/A	0,0201	0,0059	0,0059	0,0039	0,0039
Tank	Tanque alimentacion	0,02	0,02	0,0059	0,0059	0,0039	0,0039
Demand Pressure	Generador	0,03	0,03	0,0059	0	0,0039	0
Join Point	N5	N/A	0,0192	0,0028	0,0028	0,0019	0,0019
Join Point	N6	N/A	0,0193	0,0028	0,0028	0,0019	0,0019
Join Point	N7	N/A	0,0192	0,0031	0,0031	0,0021	0,0021
Tank	Biodigestor	0,02	0,02	0	0,0031	0	0,0021
Tank	Biodigestor	0,02	0,02	0	0,0028	0	0,0019

5.1.3 AISLAMIENTO DEL DIGESTOR

Las condiciones climatológicas de la región donde se pretende instalar la planta de biogás son muy favorables, por lo que no es necesario aislar a los digestores. Sin embargo, al tratarse de un digestor medio enterrado, se considera que el suelo sirve como aislante térmico natural para evitar grandes pérdidas de calor. En la zona de contacto con la tierra se utiliza geomembrana, lo que permite soportar condiciones de humedad.

Si por alguna circunstancia se requiere aislar al tanque de alimentación o al digestor se recomienda la utilización de materiales de origen natural para abaratar costos. Lo mejor es tratar de conseguir materiales de procedencia local, de esta forma los costos de transporte serán menores, se conseguirá una mejor integración con el entorno del proyecto y se sabrá que el material elegido tiene menos probabilidades de presentar problemas de adaptación a las condiciones ambientales del lugar en el que se pretende instalarlo, debido a que es un material que se desarrolla o produce sin problemas en la zona climática en la que se desea emplearlo.

5.1.4 AGITADORES

A través de la agitación se logra una mejor distribución de la temperatura de los nutrientes, la remoción de las burbujas de biogás producidas por las bacterias metanógenas y un mezclado de sustrato fresco con la población bacteriana existente en el digestor. Adicionalmente se evita la formación de costras sobre la superficie de la biomasa y la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.

“Algunos tipos de digestores pueden funcionar bien sin ningún sistema de agitación. Los sistemas de agitación son imprescindibles para sustratos con muy alto contenido de sólidos o sobre sustratos básicamente solubles” (Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005).

Existen varios procesos para lograr una agitación de la biomasa. La agitación puede ser mecánica, hidráulica o neumática. La velocidad de agitación es un parámetro que puede influir en el desarrollo del proceso, siendo necesario un equilibrio entre la buena homogenización y la correcta formación de agregados bacterianos.

Los requerimientos de energía de los agitadores dependen del tipo de sustrato, del volumen de los digestores y de las condiciones operativas. Este requerimiento energético se puede estimar entre 10 y 100 Wh/m³d.

Los agitadores son una de las partes críticas de un digestor. Se seleccionó agitadores mecánicos horizontales considerando el volumen del digestor, tipo de biomasa y materiales de construcción disponibles localmente. Existe la opción de lograr agitación mediante la inyección de biomasa o biol al interior del digestor, sin embargo, se considera que este sistema no es factible por la dificultad de instalación en este tipo de digestores. “Los agitadores mecánicos son los más utilizados en plantas de biogás” (Ibíd.). Se diseñaron agitadores mecánicos de hélice y paleta.

- **Agitadores horizontales:**

Los agitadores horizontales se pueden instalar en digestores de acero, hormigón o geomembrana. Estos se instalan transversalmente a la dirección de flujo en el digestor. La velocidad de giro es bastante baja y bordea los 60 rpm. Las dimensiones del digestor permiten cubrir todo el ancho del tanque con cuatro agitadores, dos en cada eje. Las aspas tienen formas de remos y se instalan asimétricamente arriba y abajo del eje. El diámetro de acción de cada remo alcanza los dos metros.

La potencia de arranque de estos agitadores es bastante baja, ya que únicamente parte de las aspas están sumergidas en la biomasa. La potencia de los motores depende del volumen del digestor y del tamaño de las aspas. “La potencia de los motores para un digestor de 100 m³ es de aproximadamente 1 a 1,5 kW” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 524). Estos agitadores operan en periodos de 10 minutos y se prenden 12 veces por día. Este procedimiento depende obviamente del tamaño de los biodigestores y del tipo de biomasa. Los motores se los instala exteriormente.

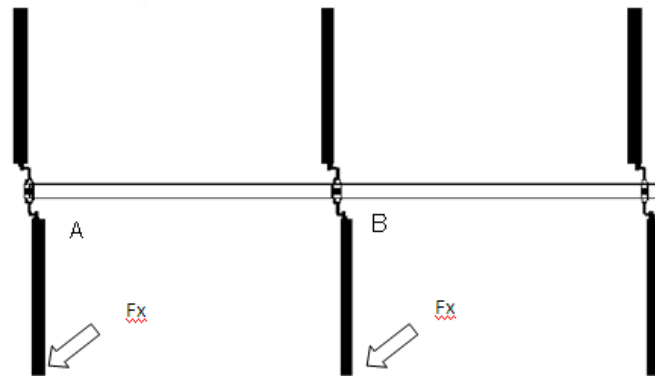
Se debe poner mucha atención a la cimentación de los soportes de los agitadores, para evitar cortes en la geomembrana. Se debe construir un plinto donde se cimenta el soporte. En lo posible se debe prever tres puntos de apoyo tipo trípode para el eje del agitador. La longitud de eje de este tipo de agitadores debe ser de máximo 6 m. El paso del eje del agitador por la pared de los tanques debe realizarse de tal forma que no haya filtraciones de líquidos o biogás hacia el pozo de motores.

El diseño de los sistemas de agitación reviste mucha atención. Hay que diseñar agitadores apropiados que se puedan construir localmente y sin que se tenga

que importar muchas partes. Los pozos de los motores de los agitadores se ubican a los costados del digestor.

DISEÑO DE AGITADORES

Pot := 4.4	kW	Potencia del motor y tableros eléctricos
ngiro := 60	rpm	Velocidad de giro rotor
ηrot := 90	%	Eficiencia mecánica del rotor
$M := \frac{Pot \cdot \eta_{rot} \cdot 9.556}{n_{giro}}$		
M = 64.503	Nm	Par de giro del rotor
drot := 2	m	Radio de los remos



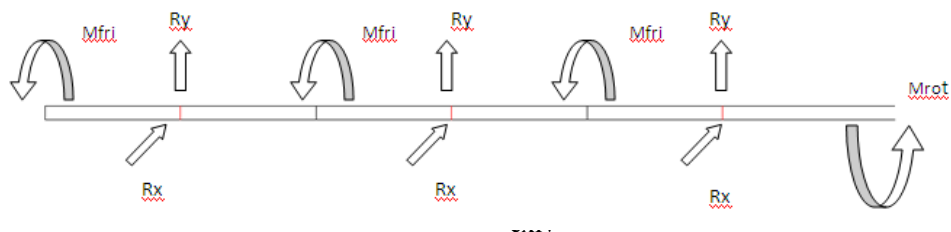
$\Sigma M_x = 0$ pos

$F_{fric} := \frac{M}{drot}$ Fuerza de fricción

nrot := 3 3 remos tipo pala

$F_{frict} := \frac{F_{fric}}{nrot}$

Ffrict = 10.751 N Fuerza de fricción generada por 3 remos



$\Sigma F_x = 0$
 $R_x := C$ N

Fuerza de rodamientos

$$\Sigma F_y = 0$$

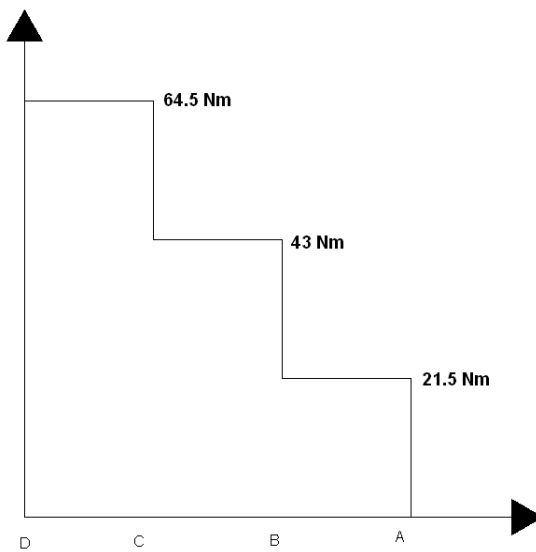
$$\text{pesotot} := C \quad \text{kg}$$

peso despreciable no influye en el diseño

$$R_y := \frac{\text{pesotot}}{n_{rot}}$$

$$R_y = 0 \quad \text{N}$$

Diagrama de torques



material Acero inoxidable 303 recocido

Tabla E - 22 Shigley

$$S_y := 241 \quad \text{Mpa}$$

$$S_u := 601 \quad \text{Mpa}$$

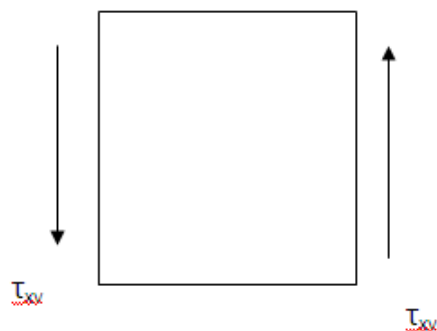
La sección C-B se analizara y tiene un torque constante de 43 Nm

$$T_{or} := 43000 \quad \text{Nm}$$

$$\rho := \frac{\text{diam}}{2}$$

$$J := \frac{\pi \cdot \text{diam}^4}{32}$$

$$\tau_l := \frac{T_{or} \left(\frac{\text{diam}}{2} \right)}{\left(\frac{\pi \cdot \text{diam}^4}{32} \right)}$$



$$\tau_{fl} := 0.5 S_y$$

Teoría del esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{adm} := \frac{\tau_{fl}}{2.5}$$

Factor de seguridad de 2.5

$$\tau_{adm} = 48.2$$

Mpa

$$diam := 2$$

cm

El diámetro del eje es de 1 pulg

La sección D-C se analizara y tiene un torque constante de 64.5 Nm

$$T_{or} := 64500$$

Nmm

$$\rho := \frac{diam}{2}$$

$$J := \frac{\pi \cdot diam^4}{32}$$

$$\tau_l := \frac{T_{or} \left(\frac{diam}{2} \right)}{\left(\frac{\pi \cdot diam^4}{32} \right)}$$

$$\tau_{fl} := 0.5 S_y$$

Teoría del esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{adm} := \frac{\tau_{fl}}{2.5}$$

factor de seguridad de 2.5

$$\tau_{adm} = 48.2$$

Mpa

$$diam := 1.8$$

cm

El diámetro del eje es de 1 pulg

Por facilidad de compra se dispondrá de un eje de 1 pulgada

Selección de los rodamientos (Catalogo SKF web)

Las especificaciones de los rodamientos seleccionados se pueden observar en el Anexo E.

5.1.5 SOPLADORES

Para aumentar la presión de flujo del biogás y suplir las pérdidas de carga en los filtros de remoción de H₂S se debe prever la instalación de sopladores (blowers). “Se estima que las pérdidas de carga en el biofiltro biológico de remoción de H₂S serán de 15-20 mbar” (Ibíd.). El soplador que se instala previo a la alimentación de los generadores de energía se debe adquirir según los requerimientos de presión del biogás que necesiten los generadores. Se seleccionaron dos sopladores centrífugos MB 630 – B de 110 V y 60 Hz. Los sopladores se colocarán uno previo a la purificación del biogás, y el otro antes de la entrada al generador para evitar pérdidas de presiones dentro del filtro y en las tuberías. La selección se realizó en base a la velocidad de flujo del biogás que debe ser menor a 3.5 m/s para evitar mayores pérdidas en el sistema y para que el biogás se purifique completamente dentro de los filtros. Las especificaciones de los sopladores seleccionados se encuentran en el ANEXO F.

5.2 SISTEMAS AUXILIARES

5.2.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA ADECUACIÓN DE LA TEMPERATURA DE BIOMASA

En este caso en el que se utiliza como biomasa el efluente de una extractora de palma africana, cuya descarga tiene temperaturas de fluido entre 60 - 75 °C, no se requiere de calefacción dentro del digester. Para lograr una óptima degradación de la materia orgánica al interior del digester y teniendo en cuenta las temperaturas seleccionadas para el proceso de digestión anaeróbica y las condiciones climatológicas del lugar, se vio necesario reducir dicha temperatura de alimentación de 60 a 40 °C mediante el uso de un intercambiador de calor sustrato – agua, ya que temperaturas de biomasa mayores a 60 °C pueden calcinar las bacterias e inhibir el proceso. Para mantener una temperatura casi constante y alrededor de los 35 °C dentro del digester, se alimenta biomasa a 40 °C por periodos durante el día, aceptando pequeñas oscilaciones.

El intercambiador de calor que se ha diseñado consiste en un tubo en serpentín sumergido en el tanque de alimentación, el cual permite el enfriamiento del afluente al digester por medio del paso de agua al interior del tubo. A continuación se presenta un esquema y el diseño del mismo:

INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA UN FLUIDO AL INTERIOR DE UN TANQUE CON AGITACIÓN MECÁNICA ENFRIADO POR UN TUBO EN SERPENTÍN SUMERGIDO:

DH := 5.1 m Diámetro de la hélice (serpentin)

$$DHf := \frac{5.5100}{30.48} \text{ pie}$$

Do := 0.06032 m Tubería comercial (Tamaño nominal 2" cedula 40)

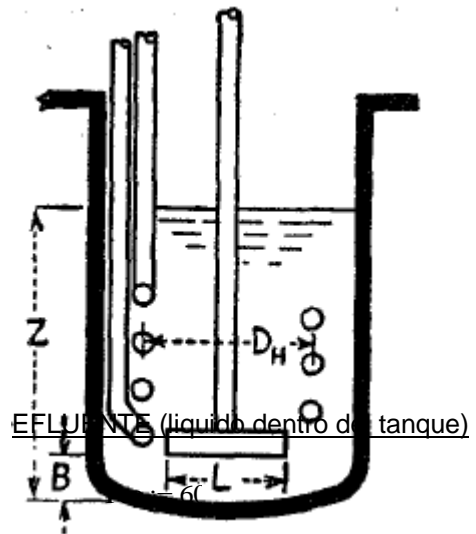
Di := 0.05250 m

AGUA (interior del serpentín)
L := 2 m Longitud de paleta (mezclador)

N := 3.33 rev/s Velocidad agitador

Dt := 27 m Diámetro tanque

$$ma := 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



$$Tcs := 40$$

$$me := 1.07 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Tme := \frac{Tce + Tcs}{2}$$

$$Tme = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Propiedades del agua a T=27. Tabla A6

$$cpa := 4178 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\mu_a := 867 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$ka := 0.61 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

Propiedades del efluente a T=50 °C

$$cpe := 4175.1 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\mu_e := 556 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

$$ke := 0.64 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$\rho_e := 960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Balance global de energía para el efluente:

$$q := me cpe \cdot (Tce - Tcs)$$

$$q = 8.993 \times 10^4 \text{ W}$$

Temperatura salida del agua:

$$T_{EMTD} = \frac{q (Tce - Tfs) - (Tcs - Tfe)}{me cpe} \quad \text{cxlix}$$

En consecuencia, el uso de $T_{ma}=27^\circ\text{C}$ para evaluar las propiedades del agua fue una buena
 Tercera Edición, 1973, McGraw-Hill, 18 libro Process Heat Transfer, Donal Q. Kern

Coefficiente de transferencia de calor en el interior del tubo (hi):

$$Re := \frac{4 \cdot m_a}{\pi \cdot Di \cdot \mu_a}$$

Re = 4.196 × 10⁴ En consecuencia el flujo al interior de tubo es turbulento (Re > 4000)

$$hi := \frac{ka}{Di} \cdot 0.027(Re)^{0.8} \cdot \left(\frac{c_{pa} \cdot \mu_a}{ka}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot (1)^{0.14}$$

Ecuación 6.2 del libro Process Heat Transfer, Donald Q. Kern para flujo turbulento. Se asume que el término $\phi = (\mu/\mu_w)^{0.14} = 1$, debido a que se trata de enfriamiento de un fluido no viscoso.

$$hi = 2.839 \times 10^3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$hio := hi \cdot \frac{Di}{Do}$$

$$hio = 2.471 \times 10^3$$

$$hiocorregido := hio \cdot \left[1 + 1.35 \left(\frac{Di}{DH}\right)\right]$$

$$hiocorregido = 2.502 \times 10^3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Re_o := \frac{4 \cdot m_a}{\pi \cdot Do \cdot \mu_a} = 10^4$$

Coefficiente de transferencia de calor exterior al tubo sumergido en serpentín (ho):

$$h_o = 1.159 \times 10^4 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$U_c := \frac{h_{i\text{corregido}} \cdot h_o}{h_{i\text{corregido}} + h_o}$$

$$U_c = 2.058 \times 10^3 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$R_d := 0.00$$

$$h_d := \frac{1}{R_d}$$

$$U_d := \frac{U_c \cdot h_d}{U_c + h_d}$$

$$U_d = 286.868 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$A := \frac{q}{U_d \cdot \text{LMTD}_{\text{corregido}}}$$

$$A = 15.34 \quad \text{m}^2$$

$$A_{ft} := \frac{A \cdot 100^2}{30.48^2}$$

$$A_{ft} = 165.118 \quad \text{pie}^2$$

$$\text{superficieextenaporpielineal} := 0.62 \cdot \frac{\text{pie}^2}{\text{pie}}$$

Tabla 11. Process of Heat Transfer Kern. Tubería 2" cedula 40

$$\text{superficieporvuelta} := \pi \cdot \text{superficieextenaporpielineal} \cdot \text{DHf}$$

$$\text{superficieporvuelta} = 35.26 \quad \text{pie}^2$$

$$\text{numerovueltas} := \frac{A_{ft}}{\text{superficieporvuelta}}$$

$$\text{numerovueltas} = 4.683$$

5.2.2 SISTEMA DE BOMBEO

La alimentación de biomasa hacia el digestor se la realiza por bombeo. Para esto debe preverse la instalación de 2 bombas (funcionan alternamente) de acero inoxidable para que no se oxide o corroa con facilidad. Se instalan bombas para la impulsión de aguas residuales o lodos. Estas bombas deben tener un sistema de trituración incorporado. En el pozo de bombeo se deben prever válvulas de cierre y anti retorno, medidores de caudal y manómetros. Antes de la descarga de la biomasa al pozo de bombeo se debe prever la instalación de una rejilla con 5 cm de separación entre barras. El control y operación de las unidades de bombeo se la debe realizar desde un mismo punto para todas las unidades.

El tamaño o la potencia del sistema de alimentación dependen de la rutina diaria de alimentación. Si los períodos de alimentación son mayores se reduce la potencia de los sistemas. En el caso de la alimentación por bombeo, si se bombea la biomasa en 8 tandas por día, se reduce la potencia de las bombas comparando con el caso que se alimente el digestor únicamente en 4 tandas.

También se ha previsto la instalación de bombas para la descarga de lodos. Estas bombas se instalaran a un costado del digestor en el pozo de lodos. Se estima que se requieren dos pozos para la descarga de lodos del digestor. Dicha selección se realizo en base a la cantidad de masa seca que se carga al digestor. "Se calcula que aproximadamente el 20% de esta masa seca se puede asentar al fondo del digestor y formar lodos" (Vesilind, Hartman, Skene, "Sludge management and disposal for the practicing engineer", 1986). Estos lodos se descargan a un lecho de secado de lodos para su adecuación y aprovechamiento como fertilizante.

La selección de las bombas requeridas en el proyecto se la realiza en base a los requerimientos de las bombas de descarga de lodos que son las de mayor relevancia ya que el resto de bombas trabajan con biomasa 95% líquida. Las bombas requeridas para alimentación de biomasa, recirculación de biol y agua para intercambiador, serán del mismo tipo que las requeridas para la descarga de lodos desde el digestor ya que estas cubren la demanda diaria de caudal.

A continuación se presenta el cálculo requerido para la selección de la potencia de las bombas a instalar:

CÁLCULO DE LA POTENCIA DE BOMBAS A INSTALAR

$Q := 0.02$	$\frac{m^3}{s}$	Caudal de extracción de lodos
Diametro tubería := 0.1	m	Tubería de extracción de lodos
$V := \frac{4Q}{\pi \cdot D^2}$	$\frac{m}{s}$	Altura geométrica entre el nivel inferior y superior de líquido de flujo
$N = 0.325 \cdot D^5 \cdot V^3$		

$$\text{gravedad} := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$H := h + \text{perdidas} + \frac{v^2}{2 \cdot \text{gravedad}}$$

Altura dinámica total de bombeo

$$H = 6.005 \text{ m}$$

$$\text{perdidas} := 1 \text{ m}$$

Sumatoria de todas las pérdidas (tanto en tubería recta como en accesorios) que sufre el fluido entre el nivel de succión y el de descarga. Valor obtenido de las tablas de diseño de tuberías.

$$Q_{\text{ps}} := (Q \cdot 1000)$$

Caudal de extracción de lodos en litros/segundo

$$Q_{\text{ps}} = 23 \frac{1}{\text{s}}$$

$$n := 50$$

Eficiencia de la bomba, que a los efectos del cálculo teórico se estima en 50%

$$HP := \frac{Q_{\text{ps}} \cdot H}{\left(75 \cdot \frac{n}{100}\right)}$$

$$HP = 3.683$$

Potencia de la bomba

$$HP_{\text{motor}} := 1.5 \text{ HP}$$

Potencia del motor eléctrico monofásico que acciona la bomba.

$$HP_{\text{motor}} = 5.525$$

En base de los cálculos realizados se seleccionan 6 bombas de 4 HP tanto para la alimentación y recirculación de biomasa como para la extracción de lodos del digestor. Las especificaciones de las bombas seleccionadas se adjuntan en el ANEXO G.

5.2.3 SISTEMA DE CONTROL DEL PROCESO

Para que las bacterias aseguren su ciclo biológico en el proceso de digestión anaerobia es necesario el control diario de los siguientes parámetros mínimos de operación:

- a) Volúmenes de biomasa: se debe registrar la cantidad diaria de biomasa que ingresa al digestor. Se debe registrar el peso o volumen de la biomasa. Con estos datos se estima la producción de biogás y la carga orgánica volumétrica (COV). Solamente cuando se tiene estos valores se puede determinar si el valor medido de la producción de biogás es correcta o errada.
- b) Contenido de sólidos: Es importante medir y/o calcular la cantidad de masa sólida que ingresa al digestor para determinar el % de degradación de la materia orgánica.
- c) Medición de temperatura en el digestor y en el tanque de alimentación: Para la medición de la temperatura se instalan varios sensores dentro del digestor y del tanque de alimentación. Estos sensores deben enviar la señal a un PC. El envío de señal debe ser continuo. De igual manera se debe medir la temperatura de entrada del agua al intercambiador de calor y a la salida del digestor.
- d) Control del pH: el pH del sustrato al interior del digestor debe ser alcalino bajo con valores alrededor de 7-8. Se debe instalar un medidor automático del pH que envíe también la señal a la caseta de control. De igual manera se debe controlar la capacidad buffer alcalina de la biomasa para soportar variaciones de pH y los ácidos orgánicos volátiles. Si la capacidad de amortiguamiento del sustrato empieza a bajar es una señal de que el proceso se está volviendo inestable. En este caso se deben tomar medidas inmediatas para mejorar el proceso de digestión.
- e) Medición de la producción de biogás, metano, H₂S en el digestor: la cantidad de biogás que se produce en el digestor, es una medida para determinar la operación y rendimiento de un digestor. Esta producción de biogás debe mantenerse estable y constante si el proceso ha alcanzado su madurez. Toda señal de reducción en la producción de biogás es una señal de la inestabilidad en el proceso. De igual manera corresponde a la medición de H₂S. Si aumenta el contenido del H₂S es una señal de inestabilidad del proceso. De igual procede con el contenido de gas metano y CO₂. La medición de gas metano puede realizarse en forma indirecta por medición de CO₂. En base a las mediciones de metano puede determinarse el potencial de rendimiento de la biomasa para la producción de biogás. También es importante conocer el contenido de CO₂ para la calibración de los motores de generación.

- f) Regularmente se recomienda también la realización de análisis físico químicos del efluente y del contenido de sustrato en los digestores para determinar los siguientes parámetros: DBO, DQO, amonios y amoníacos. Si aumenta el contenido de amonio a concentraciones mayores a 3 g/l es una señal de inestabilidad en el proceso. Los amonios pueden transformarse en amoníacos si aumenta la temperatura y el pH. Los amoníacos son inhibidores de la producción de biogás.

Para este control existen en el mercado varios tipos de sensores que deben estar conectados a una consola de control de proceso y a un PC. Todas las señales analógicas deben ser transformadas a digitales y a protocolo TCP/IP para que puedan ser enviadas por Internet.

Para la captación de datos se debe implementar un sistema de control y adquisición de datos tipo SCADA²⁰ o similar, mediante el cual se monitorean cada una de las variables temperatura, presión, nivel, pH, producción de biogás, etc. La aplicación de automatización en el proceso presenta ventajas como la disminución del pago de personal y el aumento en la eficiencia del sistema, de igual manera se obtiene un aumento de confiabilidad del proceso.

Para la automatización de los digestores se deben utilizar sistemas de alta tecnología que se basan en la utilización del control lógico programable (PLC) acoplados a un sistema de programación un control de supervisión y adquisición de datos tipo SCADA, SIMATIC WINCC o similar. Con este software se dispone de un programa de visualización que permite supervisar todos los aspectos de sus procesos de automatización. Este programa combina la arquitectura moderna de las aplicaciones de Windows con la sencillez de un programa de diseño gráfico. Incluye además, todos los elementos necesarios para controlar y supervisar procesos.

²⁰ (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Generalmente se refiere a un sistema de control industrial: un sistema computarizado de monitoreo y control de procesos.

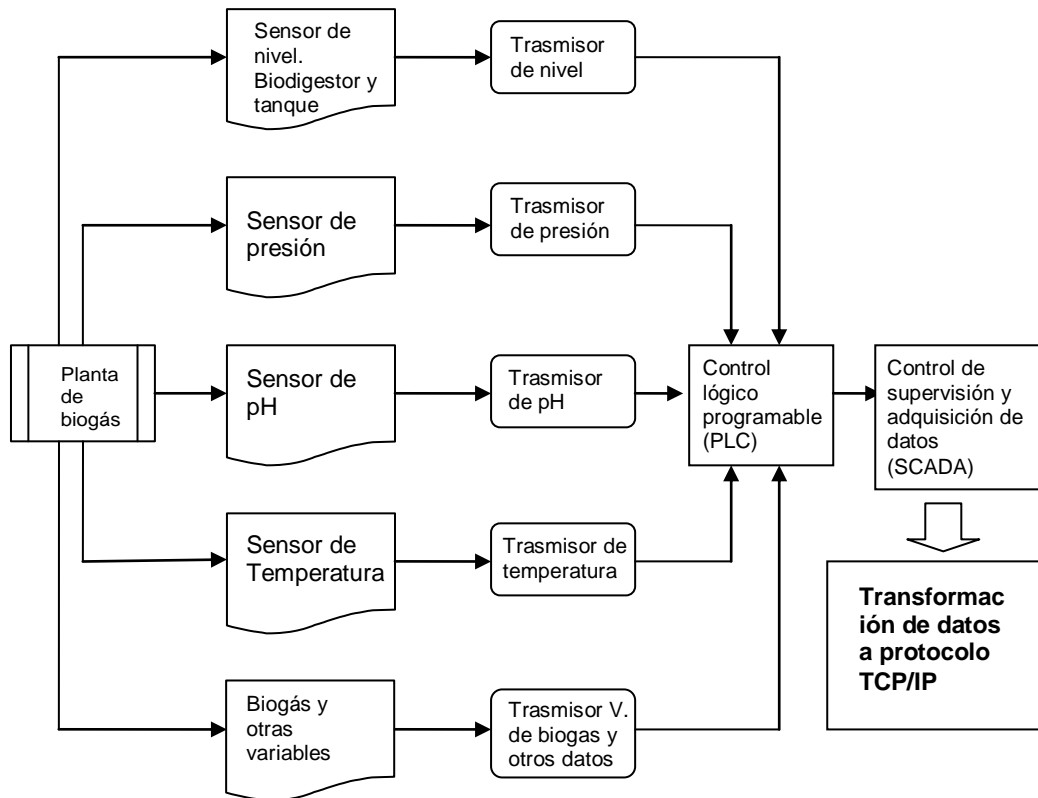


Figura 5.1: lasos mínimos de control previstos para el diseño de un sistema de automatización de una planta de biogás.

- **Lazo de control de nivel:** La función del lazo de control de nivel es la regulación del nivel del líquido en el tanque de mezcla, biodigestor y tanques de almacenamiento de biogás.
- **Lazo de control de presión:** El sistema regula la presión del gas en la parte superior del biodigestor. Comprende un transmisor de presión que percibe la presión en el biodigestor y transmite una señal al control de indicación de presión PIC.
- **Lazo de pH:** Indica el estado de acidez de la mezcla (agua /biomasa) del proceso. Para lograr el estado óptimo del ciclo fermentativo que ocurre en el transcurso del proceso, para así, llegar en el nivel de biogás una buena calidad tanto de gas como bioabono para las plantas.
- **Lazo de control de temperatura:** El objetivo de este sistema es mantener la temperatura del líquido (biomasa) en el digester en el nivel determinado que se desee.
- **Lazo de control volumen de biogás, CH₄, H₂S, CO₂:** Muestra las cantidades de biogás que se producen en la planta y sus componentes químicos. Variaciones bruscas de estos parámetros indican una inestabilidad del proceso.

5.2.4 TRAMO DE CALIBRACIÓN DE BIOGÁS

Previo al aprovechamiento del biogás en los generadores de energía eléctrica o en calderas hay que calibrar la presión y controlar la calidad del biogás en un tramo denominado “tren de calibración”. Este tramo contiene los accesorios para el control de presión, válvulas de sub presiones y sobre presión, unidades para medir la calidad del biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S , pH, temperatura, etc.), eliminación de condensados, medidor de caudal, manómetros y una válvula magnética de cierre.

- **Regulador de presión de gas de entrada:** El poder calorífico del biogás es variable y depende de la concentración de metano. El regulador mantiene la presión de entrada al carburador del motor, alcanzando un nivel que depende del poder calorífico del biogás entrante. Se encarga de reducir la presión de la línea de biogás hasta una presión ligeramente superior a la del aire de admisión.
- **Biofiltro:** El biogás contiene partículas extrañas como H_2S , halogenados, etc., que deben ser eliminados previo a su aprovechamiento en los generadores de energía. Este filtro se instala justo antes de la entrada de biogás a los generadores.
- **Medición de la calidad del biogás:** Es importante controlar la cantidad del biogás previo a su aprovechamiento. Se debe medir la temperatura, el contenido de CH_4 , CO_2 , y H_2S . El contenido de CH_4 es importante conocer ya que únicamente este componente es el que produce energía durante su combustión. De igual manera es necesaria la medición continua de los caudales de biogás con los que se alimentan los generadores. En base a estos valores se determina la eficiencia de producción de energía eléctrica en relación a los m^3 de biogás que se producen en los digestores.
- **Eliminación de condensados y válvulas de control de sobre presión:** Es recomendable que antes de los tanques de almacenamiento de biogás y antes del “tren de calibración” se prevea la instalación de una trampa de condensados para la eliminación de aguas que se acumulen en la tubería. La trampa de condensados consiste en un tanque en el cual se descarga el agua de condensados a través de un sifón, sin que se filtre el biogás. Este sifón se debe aprovechar también como válvula de seguridad para mantener una presión máxima en las tuberías de biogás. La presión en las tuberías de biogás, en el digestor y en los tanques de almacenamiento de biogás esta dada por la profundidad con que se hunde la tubería en el recipiente de agua. La magnitud de presión debe regularse alzando o bajando muy despacio el sifón. Ver plano en el ANEXO A del pozo de eliminación de condensados.

La presión máxima que debe soportar un tanque de almacenamiento de biogas que opera a baja presión debe ser de máximo 15 a 20 mbar (15-20 cm. de columna de agua). De igual forma la presión que debe regir en los digestores debe ser así mismo de máximo 20 mbar. A presiones mayores puede ser que se rompa la membrana de EPDM, se rasgue o se suelten o aflojen los amarres de la membrana de cubierta del digestor. De igual manera si se trabajan con presiones mayores a 20 mbar, puede suceder que el sellado de la membrana de cubierta se despegue o que se abra.

Para el control de las presiones de operación se utilizan válvulas de seguridad que deben ser instaladas en los tanques de almacenamiento y en el digestor. A pesar de que son instalaciones sencillas deben ser controladas diariamente para garantizar una buena operación y evitar sobre presiones en el sistema. En caso de que no se instalen este tipo de trampas de condensados combinados con válvulas de presión se debe instalar una válvula de seguridad industrial que no pueda bloquearse.

El sistema de calibración de biogás se trata con más detalle en el capítulo referente al acondicionamiento de biogás.

5.2.5 SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los requerimientos energéticos de la extractora son: 291600 kWh/año, además la planta debe cubrir su propia demanda de energía eléctrica para los equipos de bombeo, recirculación, agitadores, sopladores, etc., que serán instalados en la planta de biogás. Tal demanda es de aproximadamente 43251,6 kWh/año. La energía total requerida del proyecto es de 334851,6 kWh/año.

Teniendo ya los datos de requerimientos de electricidad, se procede con la selección del equipo más adecuado para la instalación. Para ello se tendrá en cuenta la tasa de cobertura que el equipo ofrecerá cuando este en funcionamiento.

El cálculo de la potencia para la instalación de un generador de energía eléctrica consiste en:

- a) Estimar la producción de biogás
 - b) Determinar el porcentaje de gas metano contenido en el biogás en m³/d
 - c) Estimar la eficiencia de producción de energía eléctrica del motor y generador
 - d) Calcular la producción específica de energía eléctrica por m³ de gas metano
- Datos requeridos para el cálculo
 - I. Producción de biogás en los digestores. Este valor debe ser calculado muy eficazmente y en base a datos confiables. Este valor debe indicar la producción real que se va obtener en la planta de biogás.
 - II. Grado de eficiencia total del módulo de generación, incluye eficiencia del motor y generador. Por lo general este porcentaje de eficiencia bordea el 85%.
 - III. Porcentaje de gas metano contenido en el biogás. El porcentaje se lo calcula considerando el volumen de biogás que produce cada biomasa y su respectivo % de gas metano. El % de gas metano es de aproximadamente 55-75%.

- IV. Grado de eficiencia eléctrica del generador. Este valor indica el grado de eficiencia del generador para generar energía eléctrica. Este valor es de máximo 35% y puede variar entre el 30-35%. Este coeficiente debe ser verificado posteriormente durante la adquisición del generador.
- V. Grado de eficiencia para producción de energía calorífica. Este valor está en el orden del 65-70 %. Por lo general la energía que se produce en el motor y generador es mucho mayor que la energía eléctrica.
- VI. Es recomendable que el generador que se instale sea en un 20% de mayor potencia que la calculada para el generador. De esta manera la unidad de generación tendrá más potencia para cubrir picos de demanda de energía durante el día.
- VII. Para la estimación de la potencia a instalar hay que considerar las horas diarias de operación.
- VIII. Para la producción de energía eléctrica en kWh/año hay que considerar las horas reales de operación (factor de planta). Se debe restar las horas por mantenimiento y eventuales falles en el sistema.

Fuente: Enríquez, Gilberto, "El libro practico de los generadores, transformadores y motores electrónicos", 2000).

Es importante que la selección del suministrador de los generadores se la realice considerando la disponibilidad del servicio de posventa, capacitación, horas de vida de los equipos, intervalos y costos de mantenimiento.

Previo a la alimentación de los generadores el biogás debe ser purificado y calibrado para alcanzar los requerimientos de calidad y presión de los generadores. Los gases de combustión y el calor que se genera en los motores pueden ser captados y aprovechados por el calentamiento de agua para las calderas de cocción de fruta utilizados en el proceso de extracción de aceite.

El sistema de generación se compone de las tuberías de captación del biogas, los sopladores, las unidades de reducción de H₂S, el tramo de calibración y los tanques de almacenamiento.

Según la capacidad de los generadores se debe construir las respectivas casas de maquinas o los galpones para los motores.

- Casa de máquinas.

La casa de maquinas para la instalación de generadores debe ser completamente ventilada. Además, debido a la radiación térmica y acústica, producida por el sistema de

generación, este deberá estar confinado en una edificación aislada del exterior, siendo conveniente el cerramiento total de esta. Los motores y generadores tienen un nivel de ruido de hasta 106 db. Los motores deben apantallarse con los elementos propios constructivos de la sala de maquinas, como hormigón y mortero de arena, aunque no se descarta instalar algún aislante específico. Los motores se deben apuntalar al piso mediante elementos constructivos en la sala de maquinas, especialmente instalados para evitar vibraciones que pueden ser perjudiciales para el propio motor y sus sistemas auxiliares. La altura de construcción de los galpones o casa de maquinas debe ser mínimo 6m. para lograr una buena ventilación.

En este caso se considera la opción de aprovechar las instalaciones de la hacienda para ubicar al sistema de generación. La extractora posee una serie de galpones que se pueden utilizar para ubicar al sistema de generación de la planta de biogás. En el área donde se ubica el generador se deben instalar alarmas para detectar fugas de gas.

Hay que prever un sistema de recolección de aceites para recolectar los desechos que ocurran durante la tarea de mantenimiento y cambios de aceite. Estas descargas deben ser tratadas en un separador de agua-aceite. Las unidades de generación deben ubicarse de tal forma que puedan ser accesibles por lo menos por tres lados. La separación de los generadores debe ser de mínimo 3 m.

- Diseño de circuito de salida de los gases de escape del generador.

Los gases de combustión salen al exterior de los cilindros a través de las válvulas de escape. Se deberá tener en cuenta la contra presión de los gases al salir, puede descender el rendimiento de los motores. Estos dos parámetros se encuentran en relación inversa.

Para la evacuación de los gases de escape, se dispondrá de tubo flexible para evitar dilataciones, por medio de juntas, provocadas por la temperatura innecesaria en las uniones por vibración del motor. El aislamiento del conducto de escape será obligatorio para evitar radiaciones de calor a la sala de máquinas, elevando la temperatura ambiente de esta, pudiendo afectar sensiblemente al rendimiento del motor.

a. Aprovechamiento en motores y generadores

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como a diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido. En los motores de ciclo Otto el carburador convencional es remplazado por un mezclador de gases. “Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen funcionando con un 100% de biogás con una reducción

de la potencia máxima del 20% al 30%” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 575).

Tabla 5.20: Características de motores

Características de motores			
Característica	Motor de gasolina proceso Gas-Otto	Motor a Diesel Gas-Otto	Motor a Diesel ignición
Precios	Bajo	Muy alto	Alto
Grado de eficiencia	20-25%	30-35%	25-35%
Duración	Baja	Medio	Medio
Nivel de ruido	Medio	Alto	Alto
Hollín en gases	-	-	Si
Grado de mantenimiento	Alto	Medio	Alto
Utilización de diesel para encendido	-	-	5-20%
Combustible de reemplazo en caso de fallas en suministro de biogas	Gasolina	GLP	Diesel
Potencia	5-30	>150	30-150

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 274.

El biogás es poco lubricante, presenta un alto contenido de humedad, bajo PCI²¹ (es poco detonante), tiene un carácter corrosivo fuerte y puede dar problemas de contaminación atmosférica. Por ello, los motores de combustión interna que trabajan con biogás deben sufrir algunas modificaciones. Tanto los motores de encendido por compresión (ciclo diesel) como los motores por encendido provocado (ciclo Otto) deberán de estar dotados de un carburador para suministrar la mezcla de aire-gas.

Debido a su bajo contenido energético, esta mezcla es difícil de detonar en los motores MEP²² con la bujía. Una solución consiste en disponer una cámara de pre combustión en la cual la mezcla aire gas esta enriquecida. Esta cámara requiere una alimentación de biogás a alta presión. En el caso de los motores a Diesel, debido a la alta resistencia del metano a la auto ignición, que aumenta por la presencia del CO₂, las condiciones de temperatura y presión que se alcanzan en el cilindro son insuficientes. La mezcla de aire-gas ya comprimida debe de detonarse mediante la inyección de fuel. Un motor Diesel también puede trabajar con biogás.

Debido a las variaciones en el contenido de metano del biogás, el sistema de carburación debe ajustar en continuo la mezcla aire-gas, por ejemplo mediante una sonda que detecte el exceso de aire en los humos. Ello a menos que minimicemos las fluctuaciones del contenido del metano aguas arriba, mediante un adecuado sistema de control. El valor del contenido de

²¹ Poder calorífico inferior

²² Motores de encendido provocado

metano debe ser superior al mínimo especificado por el fabricante de los motores así, por ejemplo, los motores MEP suelen especificar un valor mínimo de metano de 35% vol. El uso del biogás en motores de combustión interna puede acarrear importantes problemas de corrosión interna debido a la presencia de compuestos orgánicos halogenados y de sulfuro de hidrogeno.

- Eficiencia de motores y unidades de cogeneración

Para el cálculo de rentabilidad o análisis financiero de plantas de biogás es de crucial importancia la determinación del grado de eficiencia de las unidades de generación de energía eléctrica. Pequeños porcentajes mayores o menores a 1% grado de eficiencia de las unidades de generación representan mayor o menor utilidad por la generación de energía eléctrica. “Un 1% de diferencia en el grado de eficiencia para una unidad de generación de 100 kW puede representar ingresos anuales menores o mayores en el orden de 5000 dólares” (Jelen, “Cost and Optimization Engineering”, 1997).

- I. Grado de eficiencia del motor

Es la relación entre la energía mecánica que genera el motor y el contenido de energía del combustible que se utiliza. Algunas veces se equiparará el grado de eficiencia mecánica con el grado de eficiencia eléctrica, lo que no es correcto. El grado de eficiencia mecánica depende del tipo de motor, de su construcción y tamaño. Este grado de eficiencia es aproximadamente 45% para motores de combustión interna tipo Otto y para motores de ignición.

- II. Grado de eficiencia del generador

En el generador se transforma la energía mecánica que genera el motor en energía eléctrica. El grado de eficiencia eléctrico de generadores esta en el orden de 90 a 97% dependiendo de la potencia de la unidad. El resto de la energía se transforma en calor.

- III. Grado de eficiencia térmica

A parte de la energía mecánica se obtiene también energía térmica. Esta se obtiene a través de los gases de escape, aguas de enfriamiento, radiación de calor, etc. el grado de eficiencia térmica es siempre mayor al grado de eficiencia eléctrica, y depende del tipo de motor y construcción. “Puede alcanzar valores de hasta el 55%” (Enríquez, Gilberto, “El libro practico de los generadores, transformadores y motores electrónicos”, 2000). Hasta hace

algunos años no se daba mucha importancia al grado de eficiencia térmica, pero actualmente, con los altísimos precios de los combustibles fósiles se está utilizando esa energía para el calentamiento de agua para los sistemas comunitarios de calefacción.

IV. Grado de eficiencia total la unidad de generación

El grado de eficiencia total de generación se lo calcula como la suma de eficiencia eléctrica y térmica.

Grado de eficiencia eléctrica = 32%

Grado de eficiencia térmica = 53%

Grado de eficiencia total de la unidad = 85%

Se recomienda considerar los siguientes aspectos para la valoración del grado de eficiencia de los motores de ignición y combustión interna así como de unidades de cogeneración.

- i. El grado de eficiencia eléctrica depende de la potencia de una unidad de generación, pero no aumenta linealmente con la potencia.
 - ii. El grado de eficiencia térmica de una unidad de generación no depende de la potencia de la unidad.
 - iii. El grado de eficiencia térmica es mayor en unidades pequeñas que en de mayor potencia.
- Aprovechamiento en motores diesel

Los motores diesel se han utilizado para adecuarlos a su uso con biogás debido a su robustez y porque son equipos pesados y bien contruidos para cargas extremas. Estos trabajan con una alta compresión. Las adecuaciones consisten básicamente en el cambio del ciclo termodinámico, es decir que los motores pasaran de trabajar con ciclo diesel para pasar al ciclo Otto.

A los motores de ciclo diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás - diesel y pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro, lo cual los hace muy confiables. En el caso de conversión de un motor a diesel para que funcione con diesel/biogás se mantiene el ciclo diesel original y se añade el sistema de combustible biogás, por lo cual el motor puede pasar a trabajar con diesel y biogás simultáneamente. Su principal ventaja es el menor costo de adecuación para operar con biogás, aunque su costo operativo y las emisiones de escape podrían superar a un motor delicado.

Este sistema "mixto" conserva el ciclo termodinámico diesel original y trabaja aspirando una mezcla de aire y gas natural y usando una inyección piloto de gasoil para generar la combustión. "La relación de trabajo diesel/biogás varía en función del régimen de trabajo del motor y en el común de los casos, el contenido de gasoil por gas natural podría ser por ejemplo de un 20 % para bajas revoluciones, hasta llegar a un 80 % como regímenes nominales, dependiendo de los ciclos de servicio." (Moncayo, "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás", 2008, pág. 581).

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

$V_{\text{biogas}} := 1314.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$	<p>Obtenido previamente en base a un promedio entre la producción de biogás a partir de la concentración de DQO y a partir de la concentración de sólidos volátiles.</p>
$PC_{\text{biogas}} = 6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$	<p>Poder calorífico del biogás. Obtenido del libro "Biodigestores" pag. 278</p>
$\eta_{\text{generador}} := 0.85$	<p>Grado total de eficiencia de unidad de generación</p>
$E_{\text{bruta}} := V_{\text{biogas}} PC_{\text{biogas}} \eta_{\text{generador}}$	
$E_{\text{bruta}} = 6.704 \times 10^3 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$	
$\eta_{\text{eléctrica}} := 0.3$	<p>Eficiencia eléctrica sistema de generación</p>
$E_{\text{elec}} := E_{\text{bruta}} \eta_{\text{eléctrica}}$	
$E_{\text{elec}} = 2.011 \times 10^3 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$	
$h_{\text{oper}} := 12$	<p>Horas de operación por día del generador</p>
$P_{\text{ele}} := \frac{E_{\text{elec}}}{h_{\text{oper}}}$	
$P_{\text{ele}} = 167.605 \text{ kW}$	

Se ha seleccionado un generador de 200 kW que representa un 20% más de la potencia calculada. De esta manera la unidad de generación tendrá más potencia para cubrir picos de demanda de energía durante el día

Potencia calorífica

$$\eta_{\text{calorífica}} := 0.66$$

$$E_{\text{cal}} := E_{\text{bruta}} \eta_{\text{calorífica}}$$

Grado de eficiencia calorífica del sistema

$$E_{cal} = 4.425 \times 10^3 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

$$P_{cal} := \frac{E_{cal}}{h_{oper}}$$

$$P_{cal} = 368.731 \text{ kW}$$

Las especificaciones del generador seleccionado se encuentran en el ANEXO H.

b. Sistema de seguridad

En todos los digestores o plantas de biogas se deben instalar sistemas de seguridad. No importa si se trata de digestores domésticos o industriales. Siempre hay que tener en cuenta que los digestores son plantas de producción de combustible.

En toda planta de biogás hay que instalar el siguiente equipamiento:

- válvulas control de sobre presión y sub presiones.
- Eliminación de condensados.
- Válvulas de cierre
- Sopladores
- Medidor de flujo
- Sistema corta llamas
- Tramo de calibración de biogás
- Para rayos.

Estas son las seguridades mínimas que debe tener un digestor. Adicionalmente y para cada caso hay que diseñar el sistema de seguridad correspondiente.

- Control de bajas presiones y ausencia de biogás

Todo el sistema debe protegerse para evitar la succión de oxígeno. Este control es muy importante en la casa de máquinas, en el tramo de succión de biogas para los motores.

Todos los sopladores y bombas deben protegerse con válvulas de sub presión para evitar la succión de oxígeno a las tuberías o tanques de almacenamiento. En la tubería principal de captación de biogas de los digestores hay que instalar tanques o válvulas corta llamas. Para su instalación, se debe seguir rigurosamente las indicaciones del fabricante.

Antes y después de cada sistema de aprovechamiento de biogas, sopladores, bombas, tanques de reducción de H₂S, etc., se deben instalar válvulas de cierre para aislar estos equipos en caso de emergencias.

Al interior de edificaciones en el cuarto de maquinas se debe instalar tuberías de acero. Todas estas tuberías deben pintarse de pintura amarilla. Todos los cambios de tuberías de PVC a acero deben realizarse en tramos bajo tierra y al exterior de las edificaciones. Al interior de edificaciones y en la casa de maquinas no se deben instalar válvulas ni accesorios de PVC.

Todas las instalaciones eléctricas deben ser ejecutadas por personal especializado. Los tanques de almacenamiento de biogas, digestores, casas de maquina deben protegerse con para rayos.

- Zonas de seguridad

Previo a la puesta en marcha y operación de una planta de biogás hay que fijar las zonas de riesgo. Se pueden clasificar las zonas de seguridad en tres grados de riesgo de explosión, y en función de cada grado se tomaran las medidas necesarias para prevenir accidentes. Se debe definir un plan de operación y control, disponer de un plan de emergencias en caso de accidentes y capacitar a los operadores en este aspecto. Se debe realizar previamente un análisis de riesgos en todas las áreas de la planta de biogas. En particular en el área de los digestores, tanques de carga, descarga y casa de máquinas, para disminuir las consecuencias en caso de accidentes.

Tabla 5.21: Zonas de seguridad

Zonas de seguridad		
Zonas de riesgo	Observaciones	Sitios
1	Zona de alto riesgo, por respiración de biogás, CO ₂ , H ₂ S. Peligro de explosión de biogás si se produce fuego no controlado.	Radio de 10 m. digestor, pozos de bombeo, filtro de remoción de H ₂ S, tanques de almacenamiento de biogas, quemador de biogas, casa de maquinas.
2	Posibilidad de accidentes, caídas, peligros por respiración de biogas.	Radio de 5 m. tanques de mezcla y descarga, pozos de bombeo.

Zonas de seguridad (continuación)

3	Daños a la salud por manipuleo de desechos y lodos, equipos eléctricos, motores.	Radio de 5 m. tanques de mezcla y descarga, generadores de energía, desechos de tanque de reducción de H ₂ S, casa de máquinas, taller mecánico, lecho de secado de lodos.
---	--	---

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 603.

- Precauciones generales para el uso de biogás

Se debe prevenir que no se produzcan mezclas de gas con aire con un contenido mayor al 10%. Si se produce esta mezcla la combustión del biogas puede comenzar por una chispa producida por un interruptor de luz, herramientas, cigarrillo encendido, flash fotográfico, etc. Los ambientes deben ser bien ventilados dado que la toxicidad del biogas es muy parecida a la del gas natural.

Cuando se pone en marcha al digestor, las tuberías están llenas de aire, que hay que eliminar primero. Después de haber purgado el gasómetro o el digestor, los primeros gases generados, cuando ya se tiene la producción normal, hay que dejar correr el gas por todas las tuberías y dejarlo escapar a la atmosfera, antes de intentar encenderlo.

Se debe mantener siempre una presión positiva en el digestor, gasómetro y línea de distribución. De esta manera se evita la entrada de aire. Periódicamente se debe controlar en las instalaciones la existencia de pérdidas en la línea de gas, en todas las uniones, acoplamientos, válvulas, etc.

- Recomendaciones generales

En cada tanque donde se produce o almacena biogás se debe instalar una válvula para el control de sobre presión y baja presión. Estas válvulas deben ser probadas en su operación y mantenimiento previo a su instalación.

Si se utilizan líquidos para el control de presión, se debe controlar que estos no se evaporen por el calor o se congelen por bajas temperaturas. Se debe controlar que el líquido que controla la presión no se descargue por la válvula en caso de operación. De esta manera se evita el escape incontrolado de biogás.

Las válvulas de control de sobre presión se instalan de tal forma que el biogás de exceso se descargue al exterior y no retorne a edificaciones o se quede en la caja de válvulas. La descarga del gas de exceso se debe ubicar por lo menos 3m. sobre el nivel del suelo, y se debe proteger contra la entrada de basuras y lluvia. Se debe verificar su operación como mínimo una vez por semana.

Los digestores deben tener un control para evitar un sobrellenado, deben tener tuberías de rebose y un control del nivel. Los tanques de almacenamiento de biogás deben construirse a una distancia mínima de 5 m. de edificaciones y a 20 m. de la casa de máquinas.

No usar el gas inmediatamente después de vaciar el digestor. Al realizar esta operación de descarga puede producirse eventualmente un efecto de presión negativa que puede tener las siguientes consecuencias: devolver la llama al digestor, provocando una explosión o introducir

aire al digestor, lo cual sería nocivo para el proceso. Por ello se recomienda compensar el sistema alimentado al digestor una cantidad igual (carga diaria) al volumen de efluente retirado del tanque. Efectuada esta operación se deja transcurrir un tiempo prudencial (no más de media hora) para que se establezca la presión positiva antes de usar el gas.

- **Sistemas de seguridad para los generadores**

La seguridad en la operación de los generadores se basa en la detección de anomalías en el funcionamiento del mismo y en la actuación automática por medio de elementos de regulación y control de los elementos de parada del motor (interrupción de la alimentación de aire y combustible). Las situaciones por las que se pueden dar paradas son: baja presión del aceite, alta temperatura del agua de refrigeración, alta temperatura del aceite de lubricación, alta presión en el aire de admisión, bajo nivel de aceite, baja presión del gas combustible en la admisión, exceso de velocidad y exceso en la temperatura de gases de escape.

Todo sistema de generación dispondrá de una válvula de accionamiento manual para la parada de emergencia del suministro de gases combustibles. En el cuadro eléctrico se dispondrá de un pulsador que provoque igualmente la parada del motor. Así como de los elementos de regulación y control que vengán equipados en el propio motor.

- **Sistema corta llamas**

Para prevenir la propagación de llamas en caso de accidentes en la casa de máquinas es necesario la instalación de tanques o sistemas corta llamas. Estos sistemas se componen de un tanque, que generalmente está medio lleno de agua o ripio. Los dos materiales sirven como amortiguadores o enfriadores de la llama y la apagan. Por un extremo del tanque ingresa el biogás por debajo de un sello de agua y sale sobre la superficie del nivel de agua en el tanque. Estos tanques se construyen en acero inoxidable. El dimensionamiento se lo realiza en base al flujo de biogás. El tiempo de retención del biogás en estos tanques es de 1-2 segundos.

CAPÍTULO 6

ACONDICIONAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS

El biogás es un combustible natural, de alto poder calorífico dependiendo del contenido del gas metano. El aprovechamiento del biogás comprende básicamente su uso como combustible para la generación energía eléctrica en generadores, turbinas, calderas, para la alimentación a la red de gas natural y como combustible para vehículos.

6.1 CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS

“El poder calorífico del biogás es de 4700 a 5500 Kcal/m³ ó 5 a 7 kWh/m³ dependiendo del contenido de gas CH₄ y puede generar una cantidad equivalente a 22000 BTU/m³ ó 21.5 MJ/m³ valor que puede variar entre 19.7 y 23 MJ/m³. Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varía de 650 – 750 °C. El biogás no purificado produce de 20 a 23 MJ/m³ (4700 a 5500 kcal/m³). Un m³ de biogás que se aprovecha en un generador de energía eléctrica es suficiente para generar 2 kWh de electricidad, generar 20 horas de luz equivalente a un bombillo de 100 W, o hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas.” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004). Todos estos valores dependen de la eficiencia de los equipos que se utilizan para aprovechar el biogás.

Tabla 6.1: Composición del biogás

Componentes	Unidad	Contenido
Metano	%	60 - 70
Dióxido de carbono	%	30 - 40
Hidrógeno	%	5,0 - 10,0
Composición del biogás (continuación)		
Nitrógeno	%	1,0 - 2,0
Oxígeno	%	0,1
Sulfuro de hidrógeno	%	0 - 1
Saturación con vapor de agua	%	80 – 100

Fuente: Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004.

Tabla 6.2: Características más relevantes del biogás en relación con otros gases.

Características de biogás y comparación con otros gases						
Tipos de gas	Unidad	Biogás	Gas Natural	Propano	Metano	Hidrogeno
Poder calorífico	kWh / m ³	6	10	26	10	3
Peso específico	kg / m ³	1,2	0,7	2,01	0,72	0,09
Relación de densidad al aire		0,9	0,54	1,51	0,55	0,07

Temperatura de encendido	°C	700	650	470	600	585
Contenido de oxígeno para explosión	Vol.-%	6,0 - 12,0	4,4 - 15	1,7 - 10,9	4,4 - 16,5	4,0 - 7,0

Fuente: Alvarez, "Producción anaeróbica de biogás", 2004.

De la tabla podemos entender que la densidad del Biogás es de 1,2 kg/m³ y menos pesado que el aire, por lo que hay que tener muy en cuenta cuando se ingresa a zonas en donde hay fugas de biogás, ya que el biogás no se acumula en el suelo sino que tiende a subir a la superficie rápidamente y se mezcla con el aire formando una mezcla explosiva. La temperatura de encendido del biogás es relativamente alta, alrededor de 700 °C. La velocidad de encendido es de 0,25 m/s. Debido al contenido de CO₂ del biogás se puede quemar cuando se mezcla con oxígeno entre un contenido de 6 – 12 %. El propano e hidrogeno necesitan de menores porcentajes de oxígeno para encenderse.

El contenido de gas CH₄ y CO₂ que se produce de la materia orgánica depende del tipo de sustrato que se utiliza en el biodigestor.

Tabla 6.3: Contenido de CH₄ y CO₂

Contenido de CH ₄ y CO ₂					
Gases	Desechos Agrícolas	Lodos cloacales	Desechos Industriales	Rellenos Sanitarios	Características
Metano CH ₄	30 - 80 %	40 - 80 %	40 - 80 %	45 - 65 %	Inflamable, Inodoro
Contenido de CH ₄ y CO ₂ (continuación)					
CO ₂	30 - 50 %	20 - 50 %	30 - 50 %	30 - 55 %	Forma ácido, inodoro, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H ₂ S	100 - 7000 ppm	0 - 1000 ppm 0-1 %	0 - 1000 ppm 0-1 %	0 - 500 ppm	Inflamable tóxico, olor
Hidrógeno H ₂	0 - 2 %	0 - 5 %	0 - 2 %	0 - 1 %	Inflamable , inodoro
Amoniaco NH ₃	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	Corrosivo, irritante
Nitrógeno N ₂	0 - 15 %	0 - 3 %	0 - 1 %	0 - 30 %	Inerte, inodoro, asfixiante
Oxígeno O ₂	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 5 %	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	0 - 5 ppm	10 ppm	Corrosivos, olores

Fuente: Alvarez, "Producción anaeróbica de biogás", 2004.

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en varios equipos o artefactos. El requerimiento potencial para que el biogás se quemara totalmente es de 5,7 m³ aire por m³ de biogás. "En la práctica se necesita un excedente de aire de 20 a 30 % adicional para lograr la mezcla de aire – biogás que se puede quemar en los generadores de energía eléctrica." (Ibíd.).

Tabla 6.4: Características de los componentes del biogás

Características de los componentes del biogás						
	Unidad	CH₄	CO₂	H₂S	CO	H
Peso específico	kg/m ³	0,72	1,85	1,44	1,57	0,084
Relación de densidad con el aire		0,55	1,53	1,19	0,97	0,07
Temperatura de encendido	°C	600,0	-	270	605	585
% de O ₂ para explosión	Vol. - %	4,4 - 16,5	-	4,3 - 45,5	10,9 - 75,6	4,0 - 77,0

Fuente: Alvarez, "Producción anaeróbica de biogás", 2004

El biogás no se quema o explota fácilmente. No se puede quemar solo, necesita una mezcla de aire-biogás para que se encienda. Debe ser una mezcla homogénea para que se pueda quemar. Por lo que es poco probable que se encienda el biogás con un fósforo debido a una fuga por un agujero de membrana de cubierta de un digestor. El fósforo se apaga inmediatamente al entrar en contacto con el biogás por falta de una mezcla adecuada de oxígeno. Hay que tener mucho cuidado cuando sale biogás por una rasgadura en la membrana de cubierta o por alguna fuga en un tanque de almacenamiento, cuando este biogás tiene el tiempo suficiente para mezclarse con suficiente oxígeno y alcanza a formar una mezcla explosiva con un contenido de aire de 6 – 12%.

▪ **Propiedades de los gases**

Toda compresión de un gas significa una reducción de su volumen y recíprocamente, que toda expansión del gas implica una reducción de su presión. Al comprimir fuertemente un gas no sólo se produce una reducción de su volumen, sino que simultáneamente se eleva su temperatura. Si se calienta un gas, aumenta al mismo tiempo su presión y volumen. A temperatura constante, los volúmenes que ocupa una determinada masa de gas son inversamente proporcionales a las presiones que soporta. Esto se ajusta a la Ley general de estado gaseoso. Esta ley rige las variaciones simultáneas de presión y volumen que experimenta una masa de gas cuando su temperatura varía. Los gases que se someten rigurosamente a esta ley se llaman gases ideales, por lo que se le da también el nombre de Ecuación de estado de los gases perfectos. La presión normal es de 1 atm y la temperatura normal es de 273 °K. En consecuencia, el volumen normal de una masa de gases es aquél que ocupa a 1 atm de presión a 273 °K de temperatura.

i. Cálculo del Biogás a TPN (Temperatura y presión normales)

El volumen de los gases cambia en función de la temperatura y la presión. Además el poder calorífico cambia inversamente proporcional al aumento del volumen. Si aumenta el volumen disminuye el potencial calorífico. El aumento o disminución de volumen por cambio de

la temperatura o presión puede llegar al 20% en el biogás. Para poder comparar volúmenes de biogás se define el volumen a temperatura y presión normal (TPN).

ii. Parámetros que se deben medir.

Para calcular el biogás a volumen normal TPN hay que medir los siguientes parámetros:

- Volumen
- Temperatura
- Humedad
- Presión del biogás

iii. Características físico químicas del H₂S

El ácido sulfhídrico H₂S es un gas sin color, de gusto azucarado y olor a huevo podrido. Su peso específico es de 1,45 kg/m³ (1,013 bar y 15°C), volumen específico 0,699 m³/kg (1,013 bar y 21°C) y su peso molecular es de 34,08 mol. Arde y forma una mezcla explosiva cuando su concentración llega a 6%.

6.2 ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS

Debido a su alto contenido de humedad y otros gases contaminantes el biogás debe tratarse y acondicionarse previo a su aprovechamiento en las unidades de producción de energía eléctrica o calor. Estas características deben acondicionarse para el uso del biogás:

- Reducción de CO₂
- Reducción y/o eliminación del H₂S y trazas de otros gases, purificación
- Eliminación de condensados
- Corrección, calibración y control de presión

Los fabricantes de motores, calderas, etc. tienen requerimientos mínimos para la calidad del biogás que se debe usar en sus unidades. Estos requerimientos de calidad deben mantenerse para garantizar los intervalos de mantenimiento y vida útil de los equipos.

Tabla 6.5: Requerimientos mínimos del biogás para su aprovechamiento

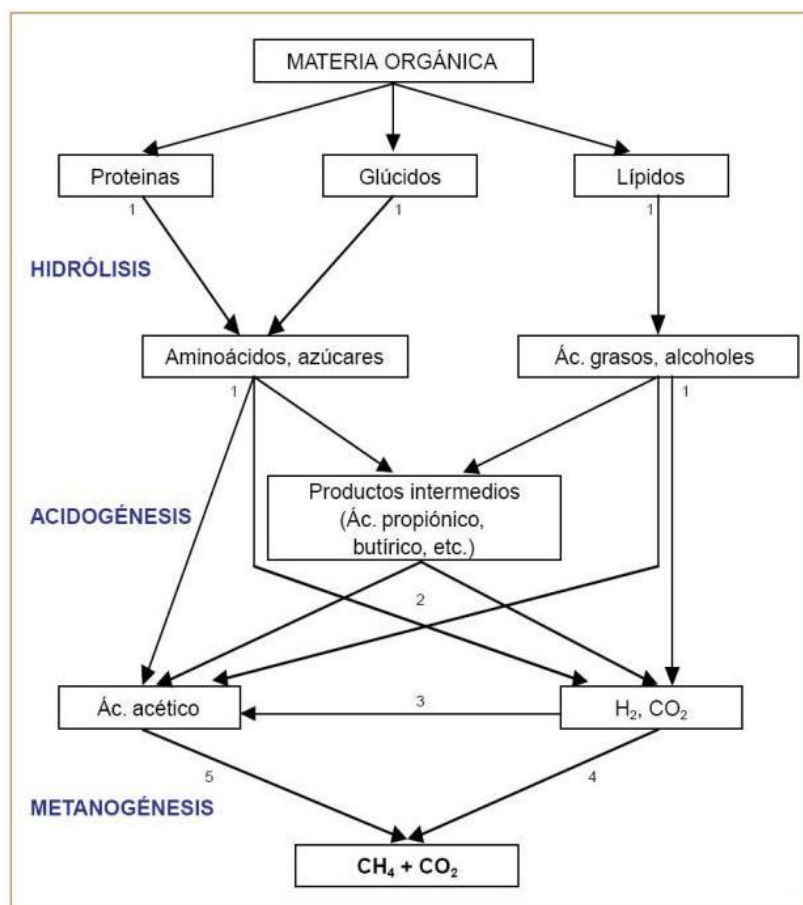
Requerimientos mínimos del biogás para su aprovechamiento energético		
Capacidad calorífica (mínimo)	Hu	> 4 kWh/m ³
Contenido de sulfuro de hidrogeno (total)	S	< 2.2 g/m ³ CH ₄
Contenido de H ₂ S	H ₂ S	< 0.15 Vol .- %
Contenido cloruros (total)	Cl	< 100 mg/m ³ CH ₄

Floruros (total)	F	< 50 mg/m ³ CH ₄
Suma de cloruros y floruros	(Cl+F)	<100 mg/m ³ CH ₄
Partículas de polvo (3 ... 10 ppm)		10 mg/m ³ CH ₄
Humedad relativa	P	< 90 %
Presión de flujo en tramo de calibración	PGas	20 ... 100 mbar
Variaciones en la presión		< ± 10 % del requerido
Temperatura	T	10 ... 50 °C
Carbono (>C ₅)		< 0.4 mg/m ³ CH ₄
Silicios (Si > 5 mg/m ³ CH ₄)	Si	< 10 mg/m ² CH ₄
Número metano (Biogás 135)	NM	> 135

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 286.

6.3 PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

El biogás está compuesto mayormente de gas metano CH₄, CO₂, en proporciones 55 – 65 % a 40 – 45 % aproximadamente y variedad de otros gases como el H₂S. El biogás contiene un 0,1 – 1 % aproximadamente de sulfuro de hidrogeno (H₂S).



1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas;
 2) bacterias acetogénicas; 3) bacterias homoacetogénicas; 4) bacterias metanogénicas hidrogenófilas;
 5) bacterias metanogénicas acetoclasticas.

Figura 6.1: Fases de la fermentación anaerobia

La mayoría de los generadores de energía eléctrica que utilizan biogás como combustible, requieren de un contenido máximo de H₂S de 200 - 500 ppmv. Durante el proceso de combustión el H₂S se transforma a ácido sulfhídrico que es altamente corrosivo para los metales.

Tabla 6.6: Gases contaminantes del biogás

Componentes Principales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CH₄ gas metano 40 – 70 % ▪ CO₂ dióxido de carbono 30 – 50 % ▪ N₂ nitrógeno 0 – 20 % ▪ O₂ oxígeno 0 – 5 %
Contaminantes principales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ H₂S sulfuro de hidrogeno 0 -3000 ppm ▪ Mercaptanos 0 -100 ppm

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 286.

6.3.1 AGRESIVIDAD DEL H₂S

El H₂S es fácilmente soluble en agua. Es más venenoso que el monóxido de carbono, pero su característico olor lo hace menos peligroso. Irrita las vías nasales y los ojos y ataca el sistema nervioso. Con un contenido de 0,05 % de H₂S produce un envenenamiento peligroso en media hora y con 0,1 % rápidamente viene la muerte. Las concentraciones máximas permisibles de los lugares de trabajo que muchos países fijan son de 0,002 % por volumen durante una exposición de 8 horas. Cuando una persona se envenena por H₂S, la sangre y la piel cambian a un color verdoso. El tratamiento a seguir es respiración artificial de oxígeno.

La emisión de compuestos de azufre, como el SO₂ (dióxido de azufre) resultante de la combustión masiva de combustibles con azufres, es responsable de daños importantes a la vegetación. Este fenómeno tiene como nombre "lluvia ácida". El SO₂ se transforma en ácido sulfúrico, que luego regresa a la superficie con la lluvia en las zonas cercanas de la emisión, donde la concentración de SO₂ es alta.

El H₂S es extremadamente corrosivo para los metales usados en los contactos eléctricos y en los motores generadores de energía eléctrica. Asimismo, es corrosivo para el acero de las cañerías y recipientes que lo contienen, lo que se soluciona adaptando sobre espesores de corrosión normales. Si el biogás transporta agua libre, CO₂ y H₂S la corrosión será evitada con un recubrimiento epóxico bien aplicado. Además, el H₂S reacciona con los óxidos de hierro del acero formando sulfuro de hierro.

Por otro lado, la corrosión por H₂S en medio acuoso, es responsable de fisuras en el material base y en soldaduras, por varios mecanismos: SSC (Sulfide Stress Cracking), HIC (Hydrogen Induced Cracking) y SOHIC (Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking). "Se considera que estos mecanismos de fisura se producen a partir de 300 ppmv de concentración de H₂S." (Moncayo, "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás", 2008, pág. 238). Estos mecanismos de falla son estudiados recientemente debido a fallas en recipientes sometidos a presión. La concentración del H₂S en el aire o en un gas es:

- 1 grano = 0,064798 g
 - Peso Molecular del H₂S = 34,08
 - Ppm(V) = % (V) * 104
 - Miligramos/m³ = (5.2)
-
- **Problemas que causa el alto contenido de H₂S**

Aunque el contenido de H₂S es generalmente menor al 0,5 % del volumen del biogás hay que reducirlo debido a las siguientes razones:

- Toxicidad

- Corrosión de metales por presencia de H_2S y CO_2
- En la combustión se puede formar SO_2 que es altamente toxico y corrosivo
- Disminución del poder calorífico del gas
- Formación de hidratos

Los compuestos sulfurados (mercaptanos (RSR), sulfuros de carbonilo (SCO) y disulfuro de carbono (CS_2)) tienen olores bastante desagradables y tienden a concentrarse en los líquidos que se obtienen en las plantas de gas; estos compuestos se deben remover antes de que el biogás sea utilizado.

El ácido sulfhídrico (H_2S) es el más venenoso de los gases naturales; se produce durante los procesos biológicos e industriales; es 6 veces más letal que el monóxido de carbono. Cuando aparece como gas libre es cuando resulta más peligroso. Al tratar el H_2S es posible emplear diferentes unidades para medir su concentración, el estándar es ppmv – partes por millón volumen para las concentraciones de gas.

Propiedades físico químicas del sulfuro de hidrogeno

- Extremadamente toxico
- Incoloro de olor repulsivo (olor a huevo podrido)
- Forma una mezcla explosiva con una concentración de entre 4.3 y 46 % por volumen. Esto comprende de una gama extremadamente amplia. La combustión espontánea se produce a los 260 °C. Arde con una flama azul y produce dióxido de azufre (SO_2), el cual es menos tóxico que el acido sulfhídrico pero es muy irritante a los ojos y pulmones y puede provocar daños severos.
- Es soluble tanto en agua (4 volúmenes de gas en 1 volumen de agua a 0°C) y en hidrocarburos líquidos.
- Produce irritación en los ojos, garganta y el sistema respiratorio.
- Es corrosivo a todos los metales de la serie electroquímica.
- Punto de ebullición es de 62 °C.
- Punto de fusión es de 116 °C.

Si se quema gas con H_2S , (en motores, antorchas, quemadores, hornos, etc.) se producirá SO_2 como subproducto de la combustión. Este gas es también tóxico, produciendo irritación del tracto respiratorio superior, inflamación de mucosas, tos, y ardor en los ojos en concentraciones de hasta 100 ppmv. Puede producir bronquitis, neumonía crónica o muerte por asfixia en concentraciones mayores y exposiciones prolongadas.

El H_2S en condiciones normales de presión y temperatura se encuentran en estado gaseoso, tiene una presión de vapor de 2026 kPa y una solubilidad en agua de 0,4 % p/p a 25,5 °C. Es un gas incoloro, inflamable a concentraciones mayores de 4,3 % por unidad de volumen, es

más denso que el aire y tiene un umbral de detección olfativo en 0,13 ppm (0,18 mg/m³). Sus efectos sobre la salud son variados, a concentraciones mayores de 0.1 ppm genera irritaciones en los ojos y en el sistema respiratorio, a concentraciones de sobre 100 ppm se deja de percibir debido a fatiga olfativa, a concentraciones de exposición mayores de 300 ppm y periodos de inhalación de minutos produce inconsciencia y paro respiratorio.

Si no se elimina el H₂S, la mayor parte de los componentes del sistema de aprovechamiento se correrían con gran facilidad. Los elementos más dañados serán aquellos que están en contacto directo con la llama del biogás, puesto que cuando se quema u oxida el biogás también se oxida el ácido sulfhídrico a ácido sulfúrico, que es altamente corrosivo.

El H₂S es uno de los principales causantes de malos olores en los biodigestores y tiene un efecto corrosivo en los generadores de energía eléctrica, motores, válvulas, tuberías y en general en todo equipo electromecánico que conforma la planta de biogás. A concentraciones elevadas (>1000 mg/l) ya se percibe el mal olor y puede causar envenenamiento. Todas las áreas con operaciones de biogás deben estar ventiladas.

Tabla 6.7: Concentraciones de H₂S y efectos que produce en la salud

Concentraciones de H₂S y daños a la salud	
Concentración	Daños y afectaciones
0,03 – 0,15 ppm	El biogás huele a huevos podridos
15 – 75 ppm	Irrita los ojos y dificulta la respiración, da mareos, vómitos y desmayos
120 – 300 ppm	Paraliza los sentidos del olfato
> 375 ppm	Causa la muerte por envenenamiento en pocas horas
> 750 ppm	Causa desmayos y la muerte en 30 a 60 minutos
> 1000 ppm	Causa la muerte instantánea en unos minutos

Fuente: http://ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=122, Efectos del H₂S en la salud

El peligro principal es el de la muerte por inhalación. Cuando la cantidad de gas absorbido por la corriente sanguínea excede a la oxidación natural, se provoca el envenenamiento del cuerpo, con una acción general sobre el sistema nervioso. Se produce rápidamente una respiración trabajosa y es posible que se presente una parálisis respiratoria inmediatamente a concentraciones de 700 ppm y superiores a esta. Entonces se produce la muerte por sofocación (asfixia) a menos que la persona expuesta sea llevada inmediatamente a donde haya aire fresco y se le estimule la respiración a través de respiración artificial. Niveles bajos de exposición pueden ocasionar los siguientes síntomas: dolor de cabeza, mareo, agitación, náusea o problemas gastrointestinales, sequedad y sensación de dolor en la nariz, garganta y pecho, tos, somnolencia, etc.

6.3.2 REDUCCIÓN DE CO₂

En granjas y comunidades rurales no es muy práctico ocuparse de la remoción del CO₂, debido a que no es justificable porque no se requiere de un biogás de tan buena calidad. Los campesinos prefieren tener un gas menos eficiente y no preocuparse de la remoción, por lo que esta labor se considera innecesaria. Para grandes plantas de biogás donde los aspectos técnicos son más controlados, existen justificaciones económicas para la purificación.

El método químico más simple y eficiente de remoción del CO₂ es su absorción en agua de cal. El método necesita mucha atención por cuanto el agua de cal se agota y necesita recambiarse frecuentemente. Otra alternativa es utilizar otro residual fuertemente alcalino como medio de absorción de estos gases como son los de efluentes de cultivos de microalgas. Esta agua se hace atravesar en contracorriente al biogás. El agua que queda como resultado de esta reacción contiene carbonato de hidrógeno la cual es rehusada en el cultivo de las algas.

Debido que el contenido de CO₂ en el biogás no es un contaminante perjudicial se aprovechará el filtro de remoción de H₂S para también remover en gran parte dicho contenido. El dióxido de carbono es bastante soluble incluso en agua neutral bajo presión atmosférica y a 20 °C, así que el lavado con agua ordinaria es el método más sencillo de eliminación de impurezas. El CO₂ es soluble en agua mientras que el CH₄ no lo es. A alta presión, la solubilidad del CO₂ aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de metano en el biogás se incremente. El biofiltro al tener entrada de biomasa (agua) removerá el CO₂.

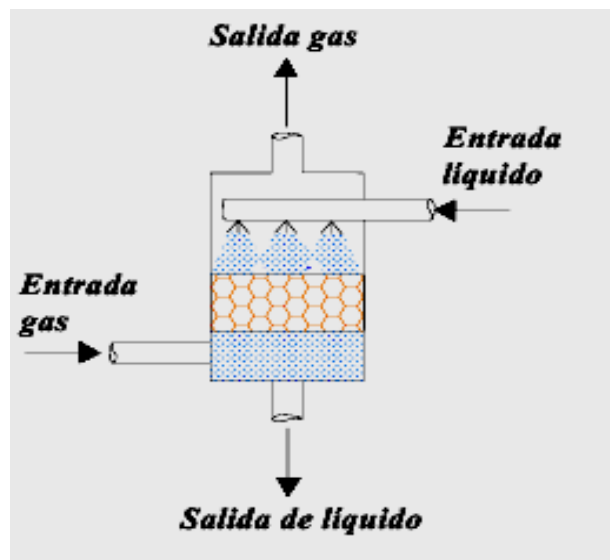


Figura 6.2: Esquema biofiltro

6.3.3 SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DEL H₂S

Los sistemas de tratamiento para la reducción o eliminación de H₂S y en general para compuestos que generen malos olores se clasifican en tratamientos físico-químicos y biológicos. Dentro de los sistemas de tratamiento físico-químicos para la reducción del H₂S se encuentran la absorción, la adsorción, (filtros de carbón activado), la oxidación química o catalítica, la centrifugación que elimina partículas y/o aerosoles, la filtración y electro filtración, etc.

Los tratamientos físico-químicos son más costosos que los biológicos cuando se trata de gases con bajas concentraciones de compuestos que producen mal olor y altos flujos de biogás. Además los procesos químicos generan siempre otro producto que puede ser más contaminante que el elemento que se requiere eliminar. Los procesos físico-químicos pueden reducir eficientemente el H₂S dentro de ciertas condiciones con la necesidad de adición de productos químicos, lo que adiciona costos de operación bastante elevados si se comparan con los tratamientos biológicos. En general, las ventajas de los procesos biológicos son: la transformación de los contaminantes a sustancias no peligrosas sin acumulación de subproductos o desechos de difícil manejo, bajos costos de operación y balance energético adecuado.

Sistemas de remoción de H₂S:

- Reducción biológica de H₂S
- Filtros biológicos
- Filtros biolavadores
- Filtros de carbón activado
- Tratamiento químico por oxidación

▪ Selección del proceso más adecuado

Para la selección del proceso más adecuado para la reducción del H₂S se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Nivel de H₂S en el biogás
- Volumen de H₂S
- Contenido de H₂S ppmv
- Peso del H₂S
- Q, Caudal del gas

Los criterios de selección más importantes se basan en la cantidad de H₂S a remover, la inversión inicial y el costo operativo del proceso. Existen otros factores que deben tenerse en cuenta a la hora de la selección tales como, la simplicidad para la operación, la sencillez y el tamaño de las instalaciones y los equipos requeridos, la continuidad y la certeza de las condiciones de proceso y de los niveles de contaminante, la urgencia con la cual se requiere solucionar el problema de contaminación, así como también las características ambientales del producto tanto en su forma reaccionada como sin reaccionar y los cuidados que deberán tener en cuenta las personas que manipulen el producto. Los tratamientos biológicos son ambientalmente amigables y requieren bajos costos de inversión, de operación y mantenimiento. Los procesos de biofiltración requieren de bajos costos operativos y pueden aplicarse para varios límites de remoción de H₂S. La reducción de H₂S por medio de esponjas o limaduras de hierro no es ecológicamente amigable.

Otro compuesto que se debe eliminar son los siloxanos (enlaces Silicio-Oxígeno) pues se forman depósitos de sílice en los componentes de los equipos provocando su abrasión. Actualmente no existe un método estándar para la eliminación de siloxanos del biogás. Los sistemas de tratamiento actuales se basan en métodos físicos como son la condensación, adsorción o absorción, con numerosas desventajas (alta demanda de energía, elevados costes de regeneración y necesidad de eliminación del material contaminado en el caso de la adsorción).

Se seleccionó como tratamiento del biogás una combinación de varios sistemas tales como el de reducción biológica mediante la inyección de oxígeno, conjuntamente con un filtro biológico y un filtro de carbón activado si es necesario. El de mayor aporte es el filtro biológico, donde ocurre la mayor purificación del gas. Se seleccionó esta combinación de tratamientos debido al costo de fabricación, operación y mantenimiento, además de que son amigables con el medio ambiente. Se utilizara materiales filtrantes que existen en la misma hacienda para reducir costos. Se utilizara un lecho filtrante de cascarilla o cuesco de palma, al cual se inyectara biomasa del tanque de alimentación (biomasa a 40° C y homogeneizada). Esta biomasa será el hábitat para los microorganismos que eliminaran dichos componentes. Además la biomasa siendo muy liquida aportara con la humedad necesaria dentro del filtro. Esta combinación de procesos es muy efectiva pero se debe controlar ciertos parámetros tales como temperatura, acidez, cantidad de gas a tratar, humedad, presión, etc. Se inyectará oxígeno mediante un compresor dentro de los tanques de almacenamiento de biogás, esta mezcla ingresa al biofiltro para la reducción de H₂S y otros contaminantes en el biogás. No se inyectará dentro del digestor debido a que en ese caso se requiere de mayor control.

- **Purificación biológica del biogás – remoción de H₂S**

La purificación del biogás por medio del suministro o soplado de pequeños volúmenes de oxígeno al biogás es un proceso que se ha desarrollado efectivamente en los últimos 10 años y que se aplica frecuentemente para la purificación de biogás en biodigestores. Las bacterias oxidantes sulfobacter transforman el H_2S en azufre elemental y ácido sulfhídrico y agua a través del suministro de oxígeno. Durante este tratamiento se obtiene polvo amarillo de azufre que se deposita en el lecho filtrante. Este polvo de azufre se lo utilizará como fertilizante en dicha hacienda.

El suministro o soplado de oxígeno se lo realiza por medio de compresores o bombas de aire. Si la dosificación de oxígeno se realiza correctamente se pueden obtener reducciones de H_2S de hasta el 95 %. La cantidad de oxígeno que se suministra al tanque es tan baja que no hay problemas de explosión al interior del mismo.

Estas condiciones son obligatorias para la aplicación de este proceso:

- Las bacterias sulfobacter deben existir en la biomasa y no tienen que ser suministradas a la biomasa. Estas bacterias necesitan de oxígeno para reproducirse, crecer y para transformar el H_2S en azufre elemental. Estas bacterias necesitan de superficies húmedas y calientes para depositar en estas áreas el azufre elemental. Los nutrientes para su crecimiento los obtiene de la biomasa. Se requiere aproximadamente de 1 m^2 de superficie por cada m^3 de biogás que se debe purificar, dependiendo también del contenido de H_2S .
- Los volúmenes de oxígeno que se suministra al biogás están en el orden del 2,5 al 5 % del volumen diario de biogás que se debe tratar. Cantidades menores o mayores a estas cantidades son perjudiciales para este proceso. Hay que tener muy en cuenta que el volumen de oxígeno no supere el límite del 5 % ya que si aumenta este valor a un % del 10 – 12 % se forma una mezcla explosiva de oxígeno y biogás. También cantidades mayores al 5 % de oxígeno reduce la cantidad del biogás, aunque no se forme una mezcla explosiva.
- Para que este proceso biológico de óptimos resultados es importante que el suministro de oxígeno sea proporcional a la producción de biogás. Se debe instalar un sistema lógico de control para que el suministro de oxígeno sea regulado de acuerdo a la producción de biogás.

La mezcla de biogás y oxígeno del tanque de almacenamiento pasa por un proceso de biofiltración. Para ello, se utiliza un lecho filtrante de cascarilla de palma (obtenida de la misma hacienda) en donde crece un biofilme que purifica el H_2S . Además se suministra una mezcla de biomasa (obtenida del tanque de alimentación) en sentido contrario al flujo de biogás. Esta mezcla acuosa sirve de nutriente para las bacterias y aporta la humedad necesaria.

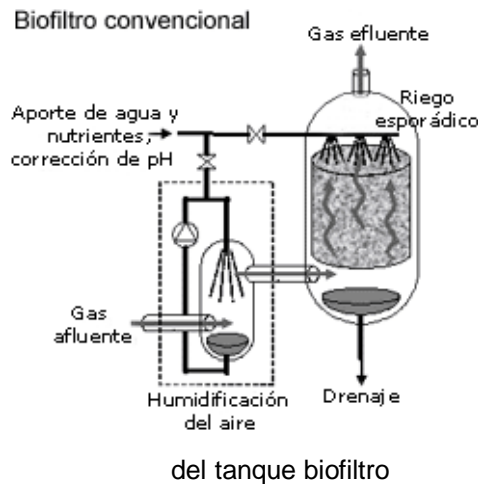


Figura 6.3: Esquema

de humidificación del gas y

del tanque biofiltro

i. Bases Técnicas para el diseño.

Durante la reducción de H_2S por medio del suministro de oxígeno, se reduce el H_2S a azufre elemental. La reducción química se presenta en la siguiente ecuación, en la cual se oxida el ácido sulfhídrico (H_2SO_3).



“La demanda estequiométrica de oxígeno en moles para la reducción del H_2S es de 0,5 a 1,5 mol por mol de H_2S .” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 303). Esto significa que como mínimo hay que suministrar entre 0,5 – 1,5 veces la cantidad de oxígeno por la cantidad de H_2S que hay que eliminar. Por ppm de H_2S se requieren 1,5 ppm de oxígeno. Este valor corresponde a un volumen de 0,00151 litros de oxígeno por m^3 de biogás para reducir 1 ppm de H_2S .

Resumiendo, el cálculo del requerimiento mínimo para la reducción del H_2S se lo debe realizar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Aire_{\min} = ((1,5 \times 10^{-6}) / 0,21) \times H_2S \times V_{biogas} \quad (m^3_{aire}/h) \quad (6.3)$$

Donde:

- H_2S : Es la cantidad de sulfuro de hidrogeno que se requiere reducir en ppm
- $V_{biogás}$: Es el volumen de biogás en (m^3/h)

Las bacterias reductoras de H_2S pueden asimilar el oxígeno, nutrientes y reducir el H_2S únicamente si esta se encuentra en forma disuelta. El oxígeno que se inyecta tiene que transferirse a la fase líquida para que este disponible para las bacterias reductoras de H_2S .

ii. Superficies para la fijación de azufre elemental

Si las bacterias reductoras de H_2S no encuentran las condiciones óptimas para aprovechar el aire u oxígeno inyectado, este oxígeno se descargará conjuntamente con el biogás. Las bacterias se forman y crecen únicamente donde exista oxígeno, H_2S y nutrientes, mayormente en la superficie de la biomasa.

Adicionalmente hay que tener en cuenta que las bacterias reductoras de H_2S son más eficientes a temperaturas de aproximadamente $35\text{ }^\circ\text{C}$. Por esto se vio la necesidad de inyectar biomasa del tanque de alimentación debido a su homogeneidad y temperatura.

La formación del oxígeno disuelto es proporcional al contenido de oxígeno en la fase gaseosa. El oxígeno requerido en la fase gaseosa lo determina la concentración de H_2S .

▪ **Filtros biológicos**

“El tratamiento biológico de gases contaminados ha emergido como una alternativa a los sistemas convencionales de tratamiento de gases especialmente cuando los compuestos contaminantes se encuentran en una baja concentración y el flujo a tratar es elevado” (Álvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004). El principal componente del biofiltro es el medio filtrante donde los compuestos indeseables en el biogás son absorbidos para poder ser degradados posteriormente por microorganismos que se forman en el medio filtrante. El biogás es introducido al lecho filtrante por medio de un soplador. La biofiltración de emisiones gaseosas es un proceso que utiliza poblaciones microbianas puras o mixtas establecidas sobre el soporte orgánico de elevada porosidad.

El filtro para la biofiltración consiste en un tanque relleno con un medio filtrante que es cascarilla o cuesco de palma. Este material se obtiene del mismo proceso industrial. La función del lecho es dar soporte y en algunos casos sirve como fuente de nutrientes a los microorganismos. La fracción de espacios vacíos alta (producido por el material abultante) favorece a una baja caída de presión del gas en la cama así como a una adecuada oxigenación del filtro y distribución del flujo de gas. El medio posee la superficie y los nutrientes necesarios para que en ella se desarrolle un biofilme de microorganismos que serán los responsables de la degradación del H_2S . Este lecho debe mantenerse húmedo a través de la aspersión con agua o biomasa sobre la superficie del mismo.

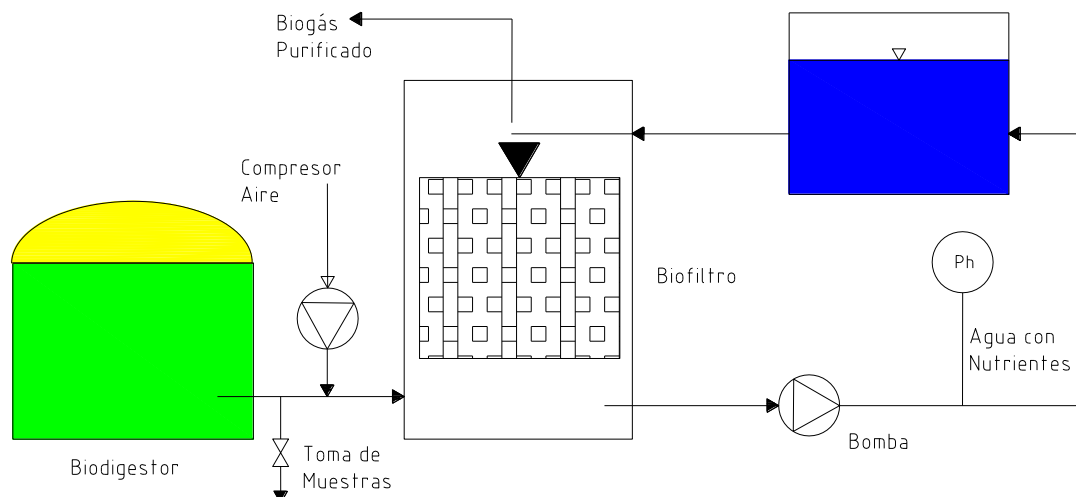


Figura 6.4: Esquema de sistema de purificación de biogás

Durante el proceso de biofiltración el biogás contaminado pasa a través de los macro poros del material filtrante. La aplicación de este proceso implica producción de biomasa y la oxidación parcial o total del contaminante. A su vez, la biomasa, bajo ciertas condiciones sufre una oxidación por respiración endógena. De esta manera, los procesos de biofiltración dan lugar a una descomposición completa de los contaminantes, creando productos no peligrosos. A medida que el gas atraviesa el lecho poroso, los contaminantes son degradados por la biomasa activa, que los utiliza como fuente de nutrientes y/o energía.

La remoción biológica de H_2S puede ser llevada a cabo por gran variedad de microorganismos. Estos microorganismos han sido reportados en sistemas de biofiltración inoculados, con lodos activados y lodos de desechos de plantas de tratamiento de aguas residuales. “Particularmente convenientes para la bio-oxidación de H_2S , son las bacterias del género *Thiobacillus*, que usan compuestos asulfados reducidos como aceptores finales de electrones y además son autótrofas, esto es, utilizan el anhídrido carbónico como fuente de carbono. Dentro del género *thiobacillus* se encuentran las bacterias ácido filas, como *Th. Ferrooxidans*, *Th. Teoxidans*, *Th. Denitrificans* y *Neutrofilas* como: *Th. Tiparus*, siendo esta última particularmente interesante debido a sus capacidades degradativas sobre otros compuestos sulfurados reducidos volátiles” (Alvarez, “Producción anaeróbica de biogás”, 2004).

Los biofiltros han sido aplicados en el tratamiento de malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales así como en plantas de compostaje (eliminación de HS). También han sido igualmente exitosos en el tratamiento de compuestos como amoníaco, monóxido de carbono, acetona, benceno, butanol, acetato de butilo, dietilamina disulfuro de dimetilo, metanol, hexano, etilbenceno, butialdehido, metanol, metil etil cetona, estireno, isopropanol, metilmercaotano, mono-coma.di triclorometano, óxido de nitrógeno, dióxidos de nitrógeno, pentano, sulfuro, entre otros.

Las bacterias desempeñan las principales funciones tanto en procesos oxidativos como los reductores del ciclo. Las bacterias oxidadoras del sulfuro y el azufre que a menudo son quimiolitótrofas²³, producen sulfato y las bacterias las usan como aceptor de electrones en la respiración anaeróbica, produciendo sulfuro de hidrogeno. Por lo que es importante la reducción de sulfato en el proceso.

i. Parámetros de diseño de un sistema de biofiltración

Este tipo de biofiltro se va construir en PVC. Los principales parámetros de diseño de un sistema de biofiltración son:

- a. **Características del gas contaminante** (concentración, flujo, presencia de partículas, temperatura): Las características del biogás a tratar son muy importantes en la determinación de la eficiencia de remoción de un sistema de biofiltración. En base a la concentración del gas contaminante se puede seleccionar el tipo de biofiltros. Respecto a la temperatura del gas contaminante, si es mayor a 40 °C será necesario un proceso de pretratamiento para reducirla, pues puede verse afectado el proceso metabólico de los microorganismos responsables del proceso de descontaminación. Los sistemas humidificadores tienen en estos casos la doble función de aumentar la humedad relativa y de reducir la temperatura del gas a tratar. El biogás contiene 2000 ppmv de H₂S que tiene que ser removido hasta un valor aproximado entre 200 - 500 ppmv, para ser aprovechado en el generador de energía eléctrica. Su temperatura es de aproximadamente 25 °C.

²³ Bacterias que obtienen energía de la oxidación de elementos inorgánicos como el azufre o el amoníaco.

b. Selección del material filtrante (lecho filtrante): El lecho filtrante será cascarilla de palma, debido a que se la obtiene de la misma planta, reduciendo así los costos. Esta cascarilla es utilizada como fuente o materia prima de filtros de carbón activado por lo que ayudará de mejor forma a la remoción de contaminantes. A pesar de que es un lecho con nutrientes naturales, se le inyectará biomasa para mejorar el hábitat microbiano. Son muchos los factores que tienen influencia en el desempeño del lecho: humedad, tasa de aplicación, composición del material de relleno del filtro, oxigenación del medio, rugosidad del material de relleno, composición del biogás, temperatura, pH, contenido de nutrientes, etc.

Tabla 6.8: Comparación entre lechos filtrantes

Parámetro	Compost	Turba	Suelo	Carbón activo, perlita	Material sintético
Densidad poblacional de microorganismos	Alta	Media-baja	Alta	Ninguna	Ninguna
Área superficial	Media	Alta	Baja - Media	Alta	Alta
Permeabilidad al aire	Media	Alta	Baja	Media-alta	Muy alta
Contenido de nutrientes asimilables	Alta	Media-alta	Alta	Ninguna	Ninguna
Absorción de contaminantes	Media	Media	Media	Alta	Alta
Tiempo de vida útil	2-4 años	2-4 años	>30 años	>5 años	>15 años
Costo	Bajo	Bajo	Muy bajo	Medio-alto	Muy alto

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008.

- c. Contenido de humedad del material filtrante:** El material filtrante debe tener una buena capacidad de retención de agua, el rango óptimo de humedad debe estar entre 40 y 60 %. Para esto se dispondrá de la inyección de biomasa proveniente del tanque de alimentación.

DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

$$H2S_{ppmv} := 2000 \quad ppmv$$

Contenido de H₂S en el biogás producido a partir del efluente de la extractora de palma

$$H2S := \frac{(H2S_{ppmv} \cdot 12.187 \cdot 34.08)}{(273.15 + 25) \cdot 1000}$$

$$H2S = 2.786 \quad \frac{g}{m^3}$$

$$V_{biogas} := 1314.55 \quad \frac{m^3}{d}$$

$$Aire_{min} := \left(\frac{1.5 \cdot 10^{-6}}{0.21} \right) \cdot H2S_{ppmv} \cdot V_{biogas}$$

$$Aire_{min} = 18.779 \quad \frac{m^3}{d}$$

Requerimiento mínimo de aire que se inyectará al biogás para su purificación.

$$V := 10800 \quad \frac{m}{h}$$

Velocidad de flujo de gas recomendada (3 m/s)

$$D := 0.05 \quad m$$

Tubería de biogás $\phi=2"$

$$A := \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$A = 1.963 \times 10^{-3} \quad m^2$$

Area sección transversal de tubería

$$Q := V \cdot A$$

$$Q = 21.206 \quad \frac{m^3}{h}$$

Caudal de biogás en base al cual se elige el soplador que conduce el biogás del digester al sistema de tratamiento y purificación.

DIMENSIONAMIENTO Y PARÁMETROS OPERACIONALES DEL BIOFILTRO

$EBRT := 60 \quad s$	Tiempo de residencia de la cama vacía. Valor obtenido en base a experimentación.
$V_{\text{filtro}} := \left(\frac{EBRT}{3600} \right) \cdot Q$	Volumen del biofiltro
$V_{\text{filtro}} = 0.353 \quad m^3$	Altura del biofiltro. Recomendación (1-4m)
$h := 2 \quad m$	
$D_{\text{filtro}} := \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{filtro}}}{\pi \cdot h}}$	
$D_{\text{filtro}} = 0.474 \quad m$	Diámetro del biofiltro
$A_{\text{filtro}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{filtro}}^2$	Área transversal del filtro
$A_{\text{filtro}} = 0.177 \quad m^2$	
$CV := \frac{Q}{V_{\text{filtro}}}$	Carga volumétrica
$CV = 60 \quad \frac{m^3}{m^3 \cdot hr}$	
$CS := \frac{Q}{A_{\text{filtro}}}$	Carga superficial. Con esta carga se consigue una eficiencia de remoción de H ₂ S de aproximadamente 90%
$CS = 120 \quad \frac{m^2}{m^3 \cdot hr}$	
$CM_s := \frac{Q \cdot H_{2S}}{A_{\text{filtro}}}$	Carga másica superficial
$CM_s = 334.328 \quad \frac{g}{m^2 \cdot hr}$	
$CM_v := \frac{Q \cdot H_{2S}}{V_{\text{filtro}}}$	Carga másica volumétrica
$CM_v = 167.164 \quad \frac{g}{m^3 \cdot hr}$	

Er := 90

Eficiencia de remoción

$$H2S_s := H2S_{ppmv} - \frac{Er \cdot H2S_{ppmv}}{100}$$

H2S_s = 200 ppmv

Contenido de H2S en el biogás después de su tratamiento y purificación. El generador de energía eléctrica tolera concentraciones de H2S entre 200 - 500 ppmv, por lo que el sistema es adecuado.

$\rho_{\text{filtro}} := 0.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Densidad del medio filtrante

%H := 50

Porcentaje de humedad recomendado dentro del lecho.

Agua := V_{filtro} · ρ_{filtro} · %H

Agua = 15.904 kg

Cantidad de biomasa que proporciona la humedad inicial requerida. Esto equivale a aproximadamente 17 litros de biomasa que se deben inyectar al lecho en un periodo de 5 minutos cada 2 horas.

El lecho filtrante será remplazado cuando la cantidad medida de la concentración de H₂S aumente de la cantidad normal de uso. Se removerá todo el lecho y se inyectará biomasa fresca.

▪ **Filtros de carbón activado**

El carbón activado “GAC” (carbón activado granular) se fabrica de cualquier material carbónico como la madera, el carbón mineral, la cáscara de coco, etc., el cual es clasificado según el tamaño, carbonizado y activado para crear la enorme área de superficie y la estructura interna del poro que define al carbón activado. La vida de servicio depende del tipo de carbón, de los contaminantes afluentes, de la capacidad de flujo, del tiempo de contacto, del diseño del sistema, etc. El carbón activado está asociado con la absorción, un proceso físico en el cual las moléculas disueltas se adhieren a la superficie del filtro de carbón. La filtración por carbón activado elimina cantidades muy pequeñas de sulfuro de hidrógeno, generalmente concentraciones bajo 0.3 mg/l.

Tabla 6.9: Características de los carbones activados

Características de los carbones activados			
Precursor	Denominación	Porcentaje activación	Área superficial (m ² /g)
Cuesco de palma	CACu	18	274

africana			
Cáscara de coco	CACo	21	282
Carbón mineral	CAM	28	435
Cascarilla de café	CACf	24	338
Bagazo de caña de azúcar	CAB	23	385

Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008.

Se debe tomar en consideración varios factores al diseñar un sistema absorbedor de GAC: las características del biogás, contenidos de H_2S , el volumen de flujo, el tiempo de contacto, la profundidad de la cama de GAC, la temperatura del biogás, el pH, los porcentajes de eliminación de H_2S , un solo absorbedor o en serie, la caída de presión, el procedimiento de muestreo, los requerimientos del prefiltro, el retrolavado, y los costos de operación y mantenimiento.

- Capacidad de flujo m^3/h , valores promedio y picos.
- Horas de operación (h/d).
- Características del biogás, contenidos de H_2S en mg/l o ppm.
- Requerimientos del efluente límites permitidos.
- Temperatura del biogás (los filtros de carbón activado funcionan óptimamente a 4 – 32 °C).
- pH del biogás (el GAC funciona mejor a un pH de 4 – 10).
- Pretratamientos disponibles, tratamientos biológicos, ajuste de pH, etc.

Para la construcción de los filtros de carbón activado se debe utilizar materiales no corrosibles como acero inoxidable, HDPE, PVC, fibra de vidrio, etc. Los filtros se pueden diseñar en serie o paralelo. Los sistemas en paralelo se aplican en el caso en el que el flujo a tratar es muy elevado, o en aquel en el que la caída de presión en un solo equipo, fuera a ser muy grande. Con un sistema en paralelo, la potencia de bombeo, compresión o ventilación es menor.

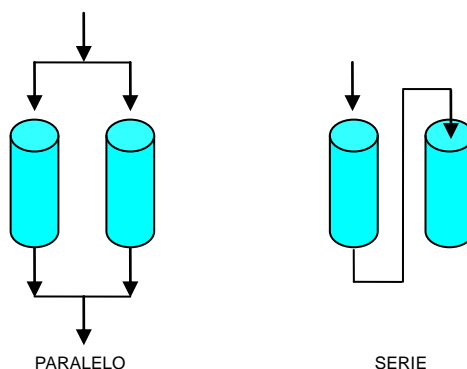


Figura 6.5: Esquema de disposición de filtros de carbón activado en serie y en paralelo

En los sistemas en serie, el efluente de una columna es el afluente de la columna siguiente. Su operación permite una alta pureza en el efluente y el aprovechamiento de toda la capacidad del carbón utilizado. Cuando se ha saturado el carbón de la primera columna en la serie, se

descarga para regenerarse o descartarse, y se conecta otra columna con carbón fresco al final de la serie. Los costos de operación de estos sistemas suelen ser menores que para los sistemas de una sola columna o los sistemas en paralelo que traten el mismo fluido. Un sistema combinado en serie – paralelo tiene, tanto las ventajas de mayor eficiencia de los sistemas en serie como las de baja caída de presión y practicidad de los sistemas en paralelo.

i. Bases técnicas para el dimensionamiento

Las características catalíticas del carbón activado ocasionan una división de las moléculas de H₂S en base a la siguiente ecuación:



Si es que el H₂S entra en contacto con un O⁻ Ion se forma agua y azufre elemental. El azufre elemental es adsorbido por el carbón activado.

Una de las ventajas de la remoción de H₂S por el carbón activado es que también remueve compuestos siloxanos y halogenados contenidos en el biogás.

La cantidad de reposición del carbón activado se calcula en base a la siguiente expresión:

$$Mca = (24 \times Ms \times (H_2S \times \rho_{H_2S} \times V_{biogás} \times 10^{-6})) / (Kca \times M_{H_2S}) \quad (6.5)$$

En donde:

Mca	Consumo de carbón activado (kg/día)
Kca	Carga permisible de H ₂ S por kg de carbón activado (0,2 – 0,5) (kgH ₂ S/kgca)
Ms	Masa molecular azufre (=32) (g/mol)
M _{H₂S}	Masa molecular H ₂ S (=32,08) (g/mol)
ρ _{H₂S}	Densidad del H ₂ S (mg/ml). La densidad del H ₂ S para una presión de 20 mbar (= 2000 Pa) y 35 °C (= 273,15 K + 35) es de ρ _{H₂S} = 1,371 g/l
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno reducido en el biogás (ppm) (diferencia de medición antes y después del filtro de carbón activado)
V _{biogás}	volumen de biogás a purificar (m ³ /h)

Una de las desventajas de los filtros de carbón activado es que no se puede regular el flujo en el interior del filtro y que después de que se haya saturado el carbón hay que cambiarlo.

Debido a que con los métodos previos de tratamiento del biogás se logra reducir hasta en un 95 % sus contaminantes, se considera que no es necesario disponer de un filtro de carbón activado.

6.4 REDUCCIÓN DE HUMEDAD

Cuando el biogás sale de los biodigestores está saturado al 100% con humedad. Llegando el biogás a alcanzar la sobresaturación en todo momento. Entre otros factores que influyen en este contenido de humedad se encuentran el tipo de biomasa y el % de dilución. Junto al vapor de agua en la corriente de biogás viajan partículas sólidas que no reaccionan o constituyen inertes en el proceso de biogasificación. Los dos elementos son perjudiciales para un aprovechamiento del biogás, por lo cual, se hace necesario una reducción de estos hasta valores adecuados para su uso como material energético.

Una parte de esta humedad se condensa en las tuberías de conducción y en el tanque de almacenamiento de biogás. Se debe prever que las tuberías no formen sifones en los tramos de conducción y no deben formar puntos bajos o puntos con pendientes en sentido contrario.

Las tuberías de captación de biogás se deben instalar de tal forma que el agua de condensados fluya de regreso al digestor o hacia los puntos de descarga de condensados. Para esto se debe instalar siempre con una pendiente mínima del 0,5%.

El agua de condensados y la humedad del biogás se reducen o eliminan por medio de unidades de enfriamiento de tuberías. Estas unidades se instalan antes del aprovechamiento del biogás en motores. Se han dado casos en que los motores que recién se instalan en plantas de biogás se descomponen a las pocas semanas de uso, debido a daños en el cigüeñal y en los pistones. Esto sucede por la acción de gases y componentes que se forman por el alto contenido de humedad. "Se presume que el contenido de amoníaco en el biogás es el que causa estos daños. Si se enfría el biogás a temperaturas de 0 – 5 °C se condensa la mayor parte de la humedad. Para una temperatura del biogás de 35 °C y un contenido de humedad del 100% se condensan cerca de 35g de agua por cada m³ de biogás" (Ibíd.). Si se tiene una producción de biogás de 1314,55 m³/d se obtienen 46 litros de agua. Con la descarga de condensados también se eliminan gases contaminantes como el H₂S, amoníaco y aerosoles.

Estos compresores (enfriadores) cuestan alrededor de 100 US \$ por cada kW de energía. Este tipo de soluciones combinadas con otras técnicas para la reducción de H₂S dan excelentes resultados y se obtiene un biogás de excelente calidad.

Los motores a biogás para la generación eléctrica tienen establecidos como límite máximo de contenido de humedad un rango comprendido entre el 70 y el 80 % HR en dependencia del fabricante del motor y de un contenido de partículas extrañas muy bajo. Por ello se hace desminuir, en dicha corriente, tanto el contenido de humedad como el de partículas hasta valores permisibles de uso. Todo esto indica que para un uso potencial del biogás como material energético se requiere un acondicionamiento previo que permita eliminar todas estas impurezas, garantizando un gas adecuado para su uso en la generación de energía eléctrica.

Para eliminar la humedad se dispondrá de enfriadores que se comprarán en el mercado. Los enfriadores requieren 4.6 kW de energía para funcionar y reducen la temperatura de la tubería a 5 °C, lo cual condensa y elimina impurezas. Las tuberías tendrán una pendiente de 5 % hacia el biofiltro o hacia los pozos de condensados. Además se instalarán trampas de vapor en las tuberías.

CAPÍTULO 7

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA DE BIOGÁS

La operación de la planta comprende la puesta en marcha, la operación diaria y los mantenimientos preventivo y correctivo.

Un manejo adecuado es la clave para el éxito de un sistema de producción de biogás. Muchos sistemas han fallado porque los operadores no tienen soporte técnico, tiempo, conocimiento o el interés requerido para mantener el sistema en óptima operación.

El propietario de la planta y su personal deberán familiarizarse con todos los detalles operativos de la planta y el mantenimiento en cuanto antes. Es importante que se familiarice con el funcionamiento teórico y también con el uso y operación de todas las partes y componentes electromecánicos. El manejo adecuado requiere las siguientes atenciones.

- **Soporte técnico:** Existen componentes claves del sistema con los cuales propietario/operador deben familiarizarse. El fabricante de los componentes debe capacitar a los técnicos en la operación y el mantenimiento de los sistemas instalados (bombas, mezcladores, agitadores, válvulas de biogás, filtros de remoción de H₂S, quemadores, generadores, etc.). El operador debe capacitarse con los estándares básicos en aspectos de ingeniería sobre la utilización del equipo. Además debe tener un conocimiento completo

sobre los aspectos de seguridad industrial para poder reconocer los problemas y resolverlos.

- **Mantenimiento:** Los conocimientos generales incluyen reparación de motores, mantenimiento y revisión, reparación y control de problemas y averías, tuberías y soldadura. Adicionalmente y dependiendo de la magnitud de la planta de biogás, debe instalarse un taller para el mantenimiento y reparación de los componentes electromecánicos. El mantenimiento de los generadores, bombas y equipos electromecánicos debe ser garantizado por el suministrador de estos equipos. Este aspecto es muy importante ya que solo se debe adquirir equipos electromecánicos para los cuales se ofrezca el servicio de mantenimiento preventivo y de reparaciones. Este es el caso de los generadores de energía eléctrica, ya que constantemente hay que realizar los cambios de aceite, filtros, etc.

Cuando se trata de generadores industriales con una potencia ≥ 200 Kw., es imprescindible que el mantenimiento sea realizado por una empresa especializada o por el vendedor de los equipos.

- **Tiempo:** El sistema requiere un tiempo de dedicación. El mantenimiento y monitoreo diario de una planta mediana de biogás (200 Kw.) requiere de aproximadamente 1-2 horas. Adicionalmente, también se requiere tiempo adicional para una eventual reparación o para el mantenimiento preventivo.
- **Biomasa:** Si bien la digestión anaerobia es un proceso complejo y largo, el cual puede ajustarse a pequeños cambios, los cambios drásticos de materia prima deben evitarse y se debe tener cuidado en realizar la mezcla con las cantidades de agua recomendadas.

A continuación se indican los parámetros de control que se debe tomar en cuenta durante la puesta en marcha y operación de los biodigestores:

- Masa seca
- Masa volátil
- Carga orgánica volumétrica
- Temperatura
- Control del pH

7.1 PUESTA EN MARCHA

Antes de iniciar la puesta en marcha de los digestores se debe verificar el funcionamiento y operación de cada uno de los componentes que forman la planta de biogás. Se debe llevar una bitácora en la cual se anotan todos los pasos que se den para la puesta en marcha, señalando

las personas presentes y su función, la fecha, hora y tipo de proceso que se realiza. Es indispensable que esta verificación la realice personal especializado. Se debe verificar por lo menos los siguientes componentes:

- Estanqueidad de los tanques
- Sellado de la membrana de cubierta
- Sello hidráulico
- Funcionamiento de los agitadores, mezcladores y motores
- Sistema de captación de biogás, tuberías de conducción
- Sopladores, filtros de remoción de H₂S
- Generadores
- Instalaciones eléctricas
- Equipos de seguridad y contra incendios

A continuación se describe el procedimiento que se debe realizar para cumplir con el proceso de puesta en marcha:

Los digestores se llenan primeramente con agua (sin biomasa) hasta que se cubra el total de la piscina. Es mejor utilizar agua en vez de biomasa para el llenado, ya que es más fácil realizar pruebas de estanqueidad y hermeticidad. Durante el llenado deben estar abiertas las válvulas de presión para que escape todo el aire contenido en el digestor.

Después del llenado con agua y realizado todas las pruebas se empieza el llenado del digestor con muy poca biomasa, mezclada con agua hasta alcanzar el triple de la dilución seleccionada para el proyecto (poca biomasa, más agua).

La materia orgánica con que se alimente al digestor debe estar libre de basuras, botellas, papeles y todo material extraño. Debe usarse materia orgánica fresca y no podrida o guardada. En caso de que se disponga de biomasa degradada y con contenido de bacterias metano genéticas se puede alimentar con esta biomasa al digestor. De esta manera se puede acelerar el proceso de formación de bacterias al interior del digestor.

El llenado con biomasa continúa diariamente hasta que empiece a salir el efluente por las tuberías de descarga o por las tuberías de rebose. Durante el llenado hay que controlar que la temperatura de la biomasa no baje a menos de los 25 °C. Apenas este saliendo efluente por las tuberías de descarga o rebose se debe cerrar las válvulas de control de presión para que el digestor se empiece a llenar de biogás.

En esta fase del llenado no deben entrar todavía en operación los sistemas de agitación, por peligro de explosión por formación de chispas al interior del digestor.

La producción de biogás empieza en unos pocos días (5-6). Se recomienda que estas primeras producciones de biogás se dejen escapar de los tanques de almacenamiento, debido a que este biogás es de mala calidad y bajo contenido de metano.

Las características de este período de puesta en marcha son:

- Una baja calidad del gas, con un contenido de CO₂ superior al 60 %
- Un biogás de olor muy fuerte
- Bajo pH
- Producción fluctuante de biogás

La formación de bacterias y estabilización de la biomasa al interior del digestor dura unas 4-6 semanas. El llenado del digestor debe hacerse paulatinamente y despacio, introduciendo poca carga orgánica volumétrica (bajo contenido de sólidos en la mezcla de carga). “Los rangos iniciales de la COV (carga orgánica volumétrica) deben ser de 0,3 – 0,7 kg/m³” (Carless, J. “Renewable Energy: A concise Guide to Green Alternatives”, 1995). Este valor puede aumentarse cada dos días hasta alcanzar el COV de diseño del proyecto a los 30 días. Si se alimenta el digestor inicialmente con una COV elevada, este puede pasar a una fase de saturación, en donde no se desarrollan las bacterias que producen biogás.

Se logra una COV baja aumentando el volumen de agua para la dilución a un 300 % durante las primeras 2 semanas. Por lo tanto para garantizar el llenado correcto de los digestores se diluye más de lo que se requeriría en condiciones normales de operación.

Es importante que durante el proceso de puesta en marcha de los digestores se mida continuamente la producción de biogás y su calidad. Cuando se empieza a aumentar la alimentación del digestor con carga orgánica hasta alcanzar la COV diseñada para el proyecto, debe aumentar inmediatamente la producción de biogás. En caso de que no aumente la producción de biogás se deberá interrumpir inmediatamente la carga de sustrato ya que es una muestra de que el proceso está sobrecargado, es decir, se ha alimentado al digestor con demasiada biomasa.

En este caso se tendrá que alimentar al digestor solamente con agua y tomar muestras del contenido de biomasa en el digestor y analizar el contenido de masa seca (%). Cuando el contenido de masa seca sea menor al 5 % se puede empezar otra vez con el proceso de puesta en marcha de los digestores.

Cuando el volumen del gas almacenado ya es suficiente (el normal de diseño), a los 28 días (cuando se cumple el primer período de retención), el biogás desplaza por presión la mezcla

líquida hacia el tanque de descarga. Recién y una vez que esto sucede, se puede empezar a alimentar al digestor con la regularidad programada o de diseño.

Después de dejar escapar este biogás varias veces (3-4) entran en operación los sopladores, filtros de remoción de H_2S y generadores de energía. Es indispensable que al inicio de la operación de los generadores este presente el personal que instaló el generador y el personal que operará este equipo. Previo a la operación de los generadores se debe realizar un análisis de la calidad del biogás (% de metano, H_2S , etc.). "Hay que tener en cuenta que los filtros biológicos de remoción de H_2S requieren un tiempo determinado (12-15 días) para la formación de bacterias que son las que reducen el contenido de H_2S " (Fanning, "Anaerobic digestion of biomass: Start-up, operation, stability and control", 1987). A partir de este momento entran en operación los agitadores.

Se estima que el proceso de puesta en marcha, hasta que se hayan formado las bacterias y se considere un proceso estable al interior del digestor, puede durar entre 6-10 semanas.

7.2 OPERACIÓN

La operación de la planta de biogás empieza con la carga de biomasa a la dilución determinada para el proyecto. La mezcla se la realiza en el tanque de alimentación. En este caso se carga al digestor la biomasa sin dilución.

La materia prima puede ser almacenada cerca del digestor o en otro sitio, aunque la necesidad de minimizar el transporte afectará la decisión de ubicar el punto de almacenamiento o el biodigestor. Los residuos orgánicos necesitan instalaciones de almacenamiento apropiadas, las cuales deben planearse de acuerdo a las condiciones y regulaciones ambientales, de higiene y seguridad.

Generalmente, muchas instalaciones agrícolas o pecuarias recolectan los residuos en un solo punto de almacenamiento. Estas instalaciones que recolectan y entregan los residuos en un punto en común cada día o cada tres días son las mejores candidatas para implementar la tecnología de producción de biogás. El punto en común puede ser una laguna, piscina, pila, tanque (para reducir el escape de olores) u otra estructura similar. Para esto, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

La calidad de la materia prima en términos del rendimiento del gas dependerá en parte de su frescura, entre más fresca sea, el rendimiento de producción del gas será mayor y habrá menor peligro de que se acidifique. Las materias primas ácidas o básicas pueden inhibir o incluso dañar las bacterias en el digestor. Si bien la digestión anaerobia es un proceso complejo y largo, el cual puede ajustarse a pequeños cambios, los cambios drásticos de materia prima

deben evitarse y se debe tener cuidado en realizar la mezcla con las cantidades de agua recomendadas. “El carbono y nitrógeno presentes en la mezcla de carga debe estar entre 20 y 30 partes de carbono por una de nitrógeno” (Ibíd.).

La biomasa se mezcla u homogeniza en el tanque de mezcla. Siempre se debe prever la instalación de un mezclador. El tiempo de mezclado depende del volumen del tanque, de la potencia del motor y del tipo de biomasa

En caso de que se alimente al digestor con un volumen de sustrato mayor que el previsto o de que se acumule una cantidad excesiva de gas, funciona la descarga del efluente automáticamente por aumento de presión o empiezan a funcionar las válvulas de sobre presión de biogás. En caso de obstrucciones en las tuberías de alimentación o descarga, éstas se pueden destapar mediante la introducción de un alambre grueso de acero por los orificios de entrada y salida.

Los agitadores instalados en los digestores deben funcionar las 24 horas del día. La noche previa a la descarga de los lodos no deben operar para permitir la sedimentación. La frecuencia de descarga de lodos se debe calcular en base al % de MS.

7.3 MANTENIMIENTO

El digestor, una vez en fase normal de operación, tiene un mantenimiento muy simple, que ocasiona muy poco trabajo extra al propietario. La alimentación se efectúa de forma diaria en lo posible horaria y continua. Solo se debe prever un control de medición en el tanque de carga y que se descargue la misma cantidad de efluente hacia el tanque de descarga.

Las actividades de mantenimiento del digestor se dividen en trabajos rutinarios que pueden ser realizados por el personal no especializado y aquellas actividades que deben ser realizadas por personal especializado. Las actividades rutinarias del personal no especializado se refieren más a tareas de control, limpieza y verificación del funcionamiento.

Las tareas especializadas son aquellas de mantenimiento preventivo y correctivo de los generadores y equipo electromecánico (bombas, sopladores, etc.). Estas actividades no se detallan en este capítulo ya que deben realizarse de acuerdo a los manuales de operación de cada parte electromecánica. Estas tareas de mantenimiento las realiza el vendedor de los equipos con su personal especializado.

- Las actividades diarias rutinarias de mantenimiento y/o de operación que deben realizarse son las siguientes:

- Limpiar el tanque de mezcla, sacar las arenas y piedras que se hayan acumulado en el fondo del tanque.
- Limpiar las compuertas o válvulas y retirar objetos acumulados.
- Cerrar compuertas o válvulas, llenar con nueva biomasa y la mezcla de agua correspondiente, mezclar bien el contenido.
- Verificar que no ingresen trozos grandes de biomasa o desechos extraños al digestor.
- Cargar el biodigestor con mezcla de desechos orgánicos-agua (abrir compuerta).
- Chequear válvulas de seguridad en el biodigestor.
- Chequear el tanque de descarga (después de los primeros 30 días de llenado del biodigestor, siempre que se carga el digestor debe descargar la misma cantidad de efluente por el tanque de descarga).
- Chequear el color y olor del bioabono (efluente).
- Lectura del medidor de caudal de biogás producido.
- Verificar los parámetros de control (volumen de biogás, % H₂S, CO₂, pH, temperatura, etc.).
- Verificar operación de generadores, sopladores, corta llamas y filtros de remoción de H₂S, siguiendo recomendaciones de fabricante.
- Verificar el nivel de agua en el sello hidráulico del digestor de geomembrana.

Los chequeos diarios deben registrarse por escrito en una bitácora. Esta actividad permitirá disponer de un perfil de funcionamiento de la planta y de los parámetros característicos de la planta. De esta forma se puede saber si la planta está trabajando en condiciones óptimas y/o detectar un mal funcionamiento de inmediato.

- Chequeos semanales o mensuales:

- Extraer lodos del fondo del digestor hacia el lecho de secado de lodos.
- Chequeo de válvulas de control de presión y tuberías de gas.
- Inspeccionar las trampas de agua de las tuberías (eliminación de agua de condensados).
- Verificación del funcionamiento del filtro de remoción de H₂S de acuerdo a referencias y recomendaciones del fabricante.
- Chequeo de generadores, sopladores, válvulas de cierre.
- Verificar estado del lecho de secado de lodos.
- Verificar los amarres de la cubierta, anillos y cabos de amarre de la cubierta del digestor, rajaduras o agujeros en la membrana.
- Verificar equipo electromecánico.

- Chequeo anual:

- Inspeccionar la impermeabilidad de la cubierta de los digestores al agua y al gas.
- Hacer un ensayo de verificación de presión en las válvulas y tuberías de gas.
- Chequeo de sopladores, filtros de remoción de H₂S, y de todo el equipo electromecánico.

Si la planta se ha iniciado correctamente, esta funcionará en régimen regular y el operador será quien deberá notar las variaciones anómalas que pueden significar un problema. El primer aspecto que se notará será una variación en la producción de gas. Por esta razón es importante la instalación del medidor de caudal de biogás y su lectura continua.

- Chequeo de sistema de captación y conducción de tuberías de gas

Todos los biodigestores tienen una presión de trabajo que no superan como presiones máximas los 20 mbar (0.29 psi o 2 kPa), encontrándose la medida alrededor de los 15 mbar, presión a la cual funcionan correctamente todos los equipos que operen con biogás.

Es necesario una inspección periódica (preferiblemente todos los días en el momento de efectuar la carga) de las uniones, válvulas, acoples y demás accesorios de las tuberías de biogás para detectar fugas. Si éstas se presentan, debe procederse de inmediato a su reparación, cambiando las piezas o sellando los escapes con pegante comercial para PVC o con resina epóxica.

Se debe purgar periódicamente las trampas de agua y de ácido sulfhídrico, abriendo y cerrando la llave de drenaje de la respectiva caja de revisión o tanque de eliminación de condensados.

- Parámetros de control

La producción de biogás durante el proceso de digestión es un parámetro de control para determinar la capacidad de degradación de la masa orgánica en el digestor y por lo tanto es un indicador del adecuado funcionamiento de la planta de biogás.

La producción de biogás es constante si se mantiene una carga de sustrato uniforme durante todos los días. Si se cargan volúmenes mayores de sustrato mayor será la producción de biogás. Un descenso en la producción de biogás manteniendo la misma cantidad de carga de sustrato significa un mal funcionamiento del digestor.

Se debe controlar diariamente el pH, la temperatura de la biomasa al interior del digestor, producción de biogás, % de H₂S, CO₂, contenidos de amonio, niveles de sustrato dentro del digestor, toneladas de biomasa de alimentación y m³ de agua de dilución. El control del pH es

necesario para garantizar un nivel óptimo de acidez para la proliferación de las bacterias metano genéticas. De igual manera se debe controlar la temperatura del sustrato.

- Corrección del pH:

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el digestor. El primero es detener la alimentación del digestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los ácidos grasos volátiles (AGV); de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Al detener la alimentación disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los AGV. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del digestor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos en el pH.

El segundo método consiste en adicionar sustancias buferantes²⁴ para aumentar el pH, como el agua con cal. Las cenizas de soda (carbonato de sodio) constituyen una variante más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio. Los requerimientos de buffer varían según el sustrato, los sistemas y tipos de operación.

- Control de nutrientes:

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, es importante mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos. Por ejemplo, los desechos con altos contenidos de nitrógeno causan toxicidad por generación elevada de amonio.

Se debe tener precaución para evitar la entrada al digestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas, sustancias químicas sintéticas o detergentes.

- Nivel de amoníaco:

“Para un correcto funcionamiento, los niveles de amoníaco dentro de los digestores deben mantenerse por debajo de los 3000 (mg/l).” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 622).

- Temperatura en el digestor:

El biodigestor puede aumentar su temperatura interior en días y horas en que el sol irradie directamente y por varias horas la cubierta del tanque. En caso que la temperatura del sustrato

²⁴ Sustancias que resisten el cambio en la acidez para mantener el pH en un rango que optimiza la digestión.

exceda los rangos de operación de 45 ° C, se deberá cargar el digestor con agua fría y tomar otras precauciones en el sitio.

Se debe tener siempre en cuenta que los digestores contienen en su interior células y microorganismos vivos que deben mantener las condiciones de temperaturas óptimas y adecuadas para su reproducción y formación de gas metano.

7.4 HIGIENE Y SALUD EN LA OPERACIÓN DE DIGESTORES

Los operadores de los biodigestores deben conocer de los peligros de enfermedades producidas por residuos orgánicos, por lo que necesitan entrenamiento especial para evitar riesgos para la salud tanto como el riesgo de llevar enfermedades a otros lugares. Los principales riesgos se describen a continuación:

El proceso de digestión anaerobia que se realiza en el digestor probablemente no eliminará totalmente los agentes patógenos presentes en la biomasa, por lo que se necesita bastante precaución. En algunos casos, dependiendo de la cantidad inicial de patógenos presentes en la materia prima, los niveles de éstos, luego de la digestión, permanecerán lo suficientemente altos para causar enfermedades en aquellas personas que trabajan con las materias primas antes y después del tratamiento, o que puedan tener algún contacto con la biomasa.

7.5 REGLAS DE SEGURIDAD

Durante el trabajo con los biodigestores se deben tener en cuenta diferentes condiciones de seguridad, debido a que se trata de una planta de producción de un combustible, en este caso de biogás. Esta circunstancia debe ser bien entendida y comprendida por los operadores de un biodigestor.

Si se toman en cuenta las siguientes observaciones y recomendaciones no existe ningún riesgo o peligro en la operación de una planta de biogás. Es muy importante que todo el personal que tenga que ver con el manejo y operación reciba capacitación y entrenamiento en la operación del digestor y sea aclarado sobre el manejo y riesgos que puede ocasionar un inadecuado manejo del biogás.

Los riesgos en la operación se resumen a continuación:

- Caídas de personas en el tanque de mezcla, descarga y pozo de bombeo.
- Aspiración de biogás al respirar.
- Roturas del tanque de almacenamiento de biogás o la cubierta de los digestores por manipulación inadecuada de herramientas, varillas o palos.

- Explosiones de biogás por fuego no controlado al prender cigarrillos o encendido de focos y linternas en zonas de seguridad.

Las mezclas de biogás con oxígeno a un 6-12 % pueden explotar si hay fuego o llamas que alcancen una temperatura sobre los 700 °C. También existe riesgo de explosión en mezclas de aire con más del 12 % de biogás.

Respirar biogás en altas concentraciones y en períodos grandes de tiempo puede causar envenenamiento y muerte por ahogo o asfixia. El contenido de ácido sulfhídrico en el biogás es altamente venenoso. El biogás no purificado tiene el olor típico de huevos podridos. A concentraciones elevadas (> 1000 mg/l) ya se percibe el mal olor y puede causar envenenamiento. Todas las áreas con operaciones de biogás deben estar ventiladas.

El biogás es más liviano que el aire (1,2 kg/Nm³) y tiende a mezclarse rápidamente con el oxígeno y con el aire. El CO₂ que es más pesado que el aire (1,85 kg/Nm³) tiende a acumularse en el suelo y el metano que es más liviano se acumula en zonas altas.

El llenado inicial de la planta de biogás presenta un peligro particular. Cuando el primer biogás formado se mezcla con el aire que se quedó adentro del biodigestor, puede provocar explosiones si hay en las cercanías fuego o si se prenden cigarrillos o se provocan chispas (puesta en marcha de agitadores).

- Precauciones generales para el uso del biogás:

Cuidar que no se produzcan mezclas de gas con el aire con un contenido mayor al 12 %. Si se produce esta mezcla la combustión del biogás puede comenzar por una chispa producida por un interruptor de luz, herramientas, cigarrillo encendido, flash fotográfico, etc. Los ambientes deben ser bien ventilados dado que la toxicidad del biogás es muy parecida a la del gas natural.

Cuando se pone en marcha el digestor, las tuberías están llenas de aire, que hay que eliminar primero. Después de haber purgado el gasómetro o el digestor, de los primeros gases generados, cuando ya se tiene la producción normal, hay que dejar correr el gas por todas las cañerías y dejarlo escapar a la atmósfera, antes de intentar encenderlo.

Se debe mantener siempre presión positiva en el digestor, gasómetro y línea de distribución. De esta manera se evitará la entrada de aire. Periódicamente se debe constatar en las instalaciones la existencia de pérdidas en la línea de gas, en todas las uniones, acoplamientos, válvulas, etc.

Recomendaciones básicas: no usar el gas inmediatamente después de vaciar el biodigestor. Al realizar esta operación de descarga puede producirse eventualmente un efecto de presión negativa que puede tener las siguientes consecuencias: devolver la llama al digestor, provocando una explosión o introducir aire al digestor, lo cual sería nocivo para el proceso. Por ello se recomienda compensar el sistema alimentando al digestor una cantidad igual (carga diaria) al volumen de efluente retirado del tanque. Efectuada esta operación se deja transcurrir un tiempo prudencial (no más de media hora) para que se restablezca la presión positiva antes de usar el gas.

7.6 REMEDIACIÓN DE PROBLEMAS

El mantenimiento de la planta de biogás se limita a trabajos e inspecciones necesarias para asegurar un buen estado de las instalaciones y alargar la vida útil de los equipos. Para mayor seguridad y autonomía, los trabajos de mantenimiento los deberá realizar el propio usuario, propietario o el personal especializado del suministrador de partes y equipo electromecánico.

Pueden existir diferentes disfunciones operacionales. La más usual, que es una insuficiente producción de gas, tiene varias causas. A menudo, con un análisis de las posibles causas descritas a continuación, se puede solucionar los problemas que se encuentren durante la operación.

Tabla 7.1: Tareas diarias de mantenimiento o control de la planta de biogás, los defectos detectados y su posible remediación.

Remediación de problemas		
Parámetro de control	Disfunciones	Causa - remedio
Presión del biogás	Demasiado alta (La presión aumenta si el consumo de biogás es menor que la producción, si el almacenaje está lleno)	La presión alta puede causar una disfunción en la válvula de seguridad. Limpiarla o cambiarla.
	Demasiado baja (La presión baja si el consumo o los escapes de biogás son mayores que la producción y si el almacenaje está vacío)	Escape en la tubería de gas, o en la cubierta. Si ha bajado la producción de biogás, chequear la producción del efluente, color

		y olor. Chequear la calidad de sustrato de carga.
Temperatura del sustrato	Temperatura demasiado alta	Temperatura ambiental demasiado elevada, alimentar el digestor con agua fría sin sustrato.
	Temperatura demasiado baja	Mezclar sustrato con agua caliente a 30 °C, aumentar la temperatura del agua en el sistema de calefacción.

Tareas diarias de mantenimiento o control de la planta de biogás, los defectos detectados y su posible remediación. (continuación)

Producción de biogás	Producción de biogás notablemente por debajo de las producciones normales	Razones biológicas, temperatura, sustrato, antibióticos, cambios de pH. Formación de espumas en el digestor, o taponamiento en sistemas de tuberías de captación de biogás, tuberías pueden estar con aire u obstruidas. Revisar pH y tuberías.
Mal olor del bioabono (efluente)	El biodigestor está saturado o las condiciones de fermentación anaeróbica no se cumplen. Huele ácido.	Reducir la cantidad de sustrato, aumentar el grado de dilución de la mezcla, revisar el pH y corregirlo.

Fuente: Angelidaki, "Monitoring and controlling the biogas process", 1997.

Deben tomarse medidas de reparación, mediante el monitoreo y control de la planta de biogás. Si el digestor presenta disfunciones con frecuencia puede significar falta de capacitación del operario.

Tabla 7.2: Mal funcionamiento de la planta de biogás y posibles soluciones

Mal funcionamiento y remediación		
Problema	Causas posibles	Medidas correctivas

Formación de costras en la superficie de la mezcla en el digestor	Contenido alto de grasas en el sustrato, o demasiada carga orgánica	Reducir carga de sustrato, reducir contenido de grasas. Vaciar el tanque hasta que los agitadores puedan triturar capa de costras.
Tubería de entrada atascada	Restos de sustrato fibroso dentro de la tubería bloqueando toda la entrada o la parte más baja de la tubería.	Destapar la tubería introduciendo un cable o alambre grueso de acero.
Cubierta con fisuras	Mala calidad del hormigón	Sellar cubierta con material apropiado, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de la membrana.

**Mal funcionamiento de la planta de biogás y posibles soluciones
(continuación)**

Baja producción de biogás o de mala calidad	Mala calidad del sustrato, o mezclado con materia inorgánica	No almacenar el sustrato mucho tiempo antes de cargar el digestor, protegerlo del sol.
Disminución del volumen del efluente	Pérdidas en el digestor, rajaduras en las paredes y/o en la losa de cimentación	Si las fisuras no se auto bloquean, vaciar la planta e impermeabilizar.
Almacenaje reducido de biogás	Pérdidas en la zona de acumulación, cubierta no impermeable, fugas de gas por uniones de tuberías.	Sellar fisuras o rasgaduras en tanque de almacenamiento y uniones de tuberías.
Válvulas de gas atascadas	Corrosión, material agotado.	Abrir y cerrar repetidas veces, limpiar, engrasar o reemplazar.
Tuberías de gas no herméticas	Corrosión, falta de mantenimiento e insuficiente impermeabilidad de las conexiones.	Localizar la avería, reponer partes corroídas o porosas, resellar las conexiones.
Pérdidas de gas repentinas	Línea de gas rota, fisuras en las tuberías de gas.	Reparar
	Trampas de agua vacías	Rellenar de agua, detectar falla por sobre presión, comprobar el dimensionado de trampas de agua.
	Quemador de gas abierto	Cerrar, controlar sistema by pass automático.
Presión de gas fluctuante	Acumulación de agua en las tuberías	Vaciar las tuberías
	Tuberías de gas atascadas	Destapar las tuberías

Fuente: Angelidaki, "Monitoring and controlling the biogas process", 1997.

Es esencial que todos los componentes del sistema estén libres de fugas de gas para eliminar pérdidas del mismo, y acumulación de gas combustible en áreas confinadas, por motivos de seguridad, así como la entrada de aire al sistema lo que inhibe el proceso. Por lo tanto, se deberán efectuar inspecciones rutinarias por lo menos una vez por semana, para asegurar que no se presente este tipo de fallas, y permitir su corrección en el momento de ser detectadas.

En las ocasiones en que se vacía el digestor, se deberá efectuar una inspección del interior del mismo para detectar y corregir problemas de construcción que pudieran haberse presentado. Se deberá también aplicar un recubrimiento a base de pintura anticorrosiva a todas las partes metálicas internas del sistema, así como a las tuberías y conexiones en constante contacto con el biogás.

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

Las plantas de biogás se construyen para la producción de biogás, la generación de energía eléctrica y la producción de fertilizante orgánico. En base a estos objetivos, se deben considerar los siguientes factores que tienen influencia en la rentabilidad de una planta de biogás. Por un lado están los costos de inversión, la producción de biogás, la calidad del biogás y las especificaciones o características de la unidad de generación de energía eléctrica.

La mayor influencia en la rentabilidad de un proyecto la tiene la unidad de generación de energía eléctrica, seguido de la producción y la calidad del biogás y los costos de inversión. La eficiencia de la unidad de generación es un aspecto muy importante. "Por ejemplo si se logra aumentar la eficiencia de generación del 30% al 32% se obtiene más rentabilidad que si es que se reducen los costos de inversión del proyecto en un 10%." (Jelen, "Cost and Optimization Engineering", 1997). Se debe, a que a mayor eficiencia de las unidades de generación, mayor

será la generación de energía eléctrica y por lo tanto habrá mayores ingresos. Por esta razón se seleccionó un generador con alto grado de eficiencia.

Considerando que se pretende vender cierta parte de la energía generada al sistema interconectado nacional, hay que verificar los costos que ocasionará la conexión al sistema. Para ello habrá que previamente verificar la existencia de líneas de alta tensión. Adicionalmente hay que analizar los aspectos legales y las tasas que facturan las empresas comercializadores para permitir la conexión.

Los costos de inversión se los puede calcular con bastante exactitud. Estos costos dependen, dentro de otros aspectos, del tipo de biomasa, del tipo de digestor y de la potencia a instalar. “En principio se puede afirmar que a mayor volumen de la planta de biogás menores serán los costos de inversión por m³ de digestor o m³ de biomasa aprovechada. En países Latino Americanos los costos de inversión de plantas de biogás para la generación de energía eléctrica están en el orden de 1200-2500 US por kW instalado, dependiendo de si los digestores se construyen con geomembrana, acero u hormigón armado”. (Ibíd.).

8.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

i. Costos de inversión para la planta de biogás

Los costos de inversión constituyen principalmente los egresos relacionados con la construcción y puesta en marcha de la planta de biogás y los costos de conexión a la red. Se considera que el capital de inversión será un préstamo pedido al Banco Nacional del Fomento, cuya tasa de interés es de aproximadamente 8%. También hay la opción de buscar algún tipo de financiamiento de instituciones extranjeras interesadas en el desarrollo de proyectos de energía renovable.

▪ Costos de construcción

Los costos de construcción se refieren a todos los egresos relacionados con la construcción misma de la planta de biogás, costos de mano de obra, obras civiles, materiales, equipos e instalaciones. Estos costos han sido estimados cotizando en empresas especialistas relacionadas y comparando con otros proyectos de similar envergadura.

En este rubro se han considerado las siguientes estructuras: construcción de digestores, tanques de alimentación y descarga, lechos de secado de lodos, galpones, almacenamiento de biogás, adquisición de equipo electromecánico (bombas, sopladores, generador, sistema de purificación, sistema corta llamas, logística y equipos para alimentación de digestores, etc.).

- **Costos de conexión a la red**

Respecto de los costos de conexión y ampliación a la red de distribución, el reglamento para medios de generación no convencionales y pequeños medios de generación establece que los generadores deben conectarse a través de medios propios o de terceros a las redes de distribución de las empresas concesionarias, lo que consiste en un costo no despreciable, que se debe agregar al costo del proyecto.

Debido a la escasez legislativa, el costo de conexión a un sistema de distribución resulta difícil de estimar por lo que se lo ha considerado como un porcentaje de los costos totales de construcción.

- **Depreciación de las instalaciones**

Hay que considerar los costos de depreciación de las instalaciones. Esto comprende la depreciación de las edificaciones, maquinaria y equipos y en particular de la unidad de generación. A continuación se exponen los porcentajes anuales de depreciación generalmente aplicados en este tipo de proyectos.

Tabla 8.1: Porcentajes anuales de depreciación y años de vida del equipo

Porcentajes de depreciación de instalaciones		
Estructuras – equipos	% anual	Años de depreciación
Edificaciones, galpones de generación, oficinas	4	25
Digestores, tanques de alimentación y descarga, lecho de secado de lodos.	5	20
Membrana de cubierta, tanques de almacenamiento de biogás.	10	10
Equipo electromecánico, bombas, sopladores, filtros de remoción de H ₂ S, etc.	20	5
Porcentajes de depreciación de instalaciones (continuación)		
Tuberías y accesorios	10	10
Motores y generadores.	20	6

Fuente: Blank, Tarquin, “Engineering economy”, 2002.

Los valores correspondientes a la depreciación de las estructuras y equipos deben considerarse como valores para reposición de partes de tal forma que se pueda mantener la planta de biogás operativa durante toda la vida.

- **Costos de operación y mantenimiento**

Los costos de operación y mantenimiento se refieren a los costos anuales en que se incurre durante la vida útil del generador. Estos costos se pueden dividir en costos fijos y costos variables. Los costos fijos no dependen de los niveles de generación, como es el caso de las remuneraciones y mano de obra.

Por otro lado, los costos variables son todos aquellos costos que dependen de los niveles de generación, como son costos de mantenimiento, costo de combustible. A continuación se detallan algunos de estos puntos:

i. Número de operarios y manutención de equipo

El número de operarios puede variar según el tipo de central generadora. En el caso del proyecto se recomienda que se contraten a dos operarios para la planta de biogás, que trabajen a diferentes turnos de trabajo. Los operarios pueden ser técnicos de la planta extractora de aceite previamente capacitados en el control de la planta de biogás.

Los equipos sufren desgastes durante su operación, por lo que hay que realizarles una manutención mensual o anual. Este mantenimiento puede ir desde un simple cambio de aceite de una caja reductora, hasta un complicado cambio de rodete para una central de biomasa. El mantenimiento preventivo será realizado por los operarios de la planta, mientras que el mantenimiento correctivo de equipos electromecánicos será realizado por compañías especializadas.

$$aPK = dTurno \times 12 \times \Sigma (A_{turno} \times mSueldo) \quad (8.1)$$

Donde

aPK = costos de la mano de obra anual (US\$/año)

dTurno = número de turnos durante un día de trabajo

A_{turno} = número de trabajadores por turno

mSueldo = sueldo de un trabajador mensual (US\$/mes)

ii. Costos de reparaciones y mantenimiento

Se ha realizado un estudio profundo respecto de los costos de mantenimiento anual de la tecnología que se desea instalar, ya que en algunos casos estos costos no son despreciables.

Los equipos electromecánicos y obras civiles deben mantenerse y repararse para que la planta de biogás pueda operar sin interrupciones. Estos costos se estiman en base a los montos de inversión.

Tabla 8.2: Porcentajes de mantenimiento y reparación en función a los montos de inversión

PORCENTAJES PARA MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN		
Estructuras y equipos	Porcentajes (%)	Observaciones
Generador	5	Incluye cambio de aceite, filtros, chequeos generales.
Filtro purificador	3	Incluye cambio de lecho filtrante y limpieza en general.
Edificaciones	1	

Membrana digestor	1	Chequeo hermeticidad y rasgaduras en la membrana.
Bombas, válvulas y sopladores	4	Mantenimiento general de bombas, limpieza de válvulas.
Digestor, tanque de alimentación y descarga, lecho de lodos	3	Limpieza de tanques.
Tuberías y accesorios	3	

Fuente: Blank, Tarquin, “Engineering economy”, 2002.

“Los motores de ignición tienen una vida útil de aproximadamente 5 años, equivalente a un período de operación de aproximadamente 35000 horas. Si se mantiene el contenido de H₂S menor o igual a 200 ppmv, los motores pueden tener una vida útil mayor” (Jelen, “Cost and Optimization Engineering”, 1997).

Generalmente los motores deben repararse y rectificarse cuando cumplen un ciclo de operación de 40000 horas. Los generadores son la parte más importante de la planta de biogás.

- **Costos administrativos**

En el proyecto se recomienda contratar a un gerente encargado del manejo y control de la planta. Debe ser una persona debidamente capacitada en la operación y mantenimiento de plantas de biogás, además de tener conocimientos administrativos. Además se recomienda contratar una secretaría para facilitar los trámites administrativos.

$$aAk = \sum (yAh \times hSueldo) \quad (8.2)$$

Donde

aAk = costos administrativos anuales (US\$/año)

yAh = horas de trabajo para la administración anual (h/año)

$hSueldo$ = sueldo de un trabajador por hora (US\$/h)

- **Costos financieros**

Se deben también considerar los costos financieros que ocasiona la disponibilidad de los recursos, como tasas bancarias, intereses, seguros y amortización.

8.2 ANÁLISIS FINANCIERO

Los principales ingresos para una central generadora de energía eléctrica, son los ingresos por venta de energía y potencia. En este caso la planta extractora se beneficia de la energía generada, ahorrando así los gastos de energía eléctrica. El restante de esta energía

generada se venderá a la red de distribución. Además como en este caso los generadores utilizan energías no convencionales, hay la opción de optar a un bono por reducción de gases de efecto invernadero, según el Mecanismo de Desarrollo Limpio²⁵ (MDL) estipulado en el protocolo de Kyoto.

▪ **Ingresos por venta de energía y potencia**

Los ingresos por venta de energía y potencia, corresponden a los ingresos obtenidos por el generador al vender la energía inyectada al sistema y la potencia de suficiencia del generador.

Se pueden definir las siguientes alternativas para la venta de energía y potencia:

- a) Venta de energía y potencia mediante un contrato bilateral entre la empresa distribuidora y la empresa generadora. La duración del contrato, el precio de venta de la energía y el precio de venta de la potencia será acordada entre las partes.
- b) Venta de energía y potencia a una empresa generadora, mediante un contrato bilateral, donde se estipula el precio de la energía, el precio de la potencia y la duración del contrato.
- c) Venta de energía y potencia a un cliente libre, mediante un contrato bilateral. La duración del contrato, el precio de venta de la energía y el precio de venta de la potencia será acordada entre las partes.
- d) Venta de la energía y potencia a una empresa distribuidora mediante la licitación del contrato. En este caso el precio de la energía será el estipulado en el contrato y el precio de la potencia corresponderá al precio de nudo de la potencia.
- e) Venta de energía y potencia a una empresa distribuidora sin participar en las licitaciones de contrato. En esta modalidad, el precio de la energía corresponderá al precio promedio de las licitaciones ofrecidas por la empresa distribuidora, y el precio de la potencia será el precio de nudo de la potencia.

Para el proyecto se estiman los ingresos por venta de energía a partir de un precio de 0,1 US\$/kWh generado. Se estima este valor por la escasez de información legislativa.

▪ **Ingresos por MDL**

“El mecanismo de desarrollo limpio (MDL), fue creado por el Protocolo de Kyoto en el año de 1997 y busca incentivar a las empresas de países desarrollados para invertir en los proyectos

²⁵ Se denominan proyectos MDL a los que estén destinados a disminuir los efectos negativos de los gases de efecto invernadero, sea disminuyendo su emisión por la reconversión de proyectos productivos, o sea fijando estos gases a la tierra a través de “sumideros de carbono” (planes de forestación y reforestación).

de reducción de emisiones en los países en vías de desarrollo” (Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 654). Con estas contribuciones, en los países en vías de desarrollo muchos proyectos que no eran económicamente viables, podrían hacerse rentables, de manera que su inclusión en la evaluación económica de un proyecto con energías renovables puede ser de gran importancia.

La contribución que recibe un proyecto debido al MDL, depende de la cantidad de certificados de reducción de emisiones (CER) que es capaz de emitir. Un CER corresponde a una tonelada de CO₂eq que el proyecto es capaz de desplazar. El CO₂eq representa la equivalencia de cualquier otro gas de efecto invernadero. Actualmente se compara la energía generada por un generador de energía renovable con la energía desplazada de la generación con una central a carbón. “Esto indica que la cantidad de CO₂ desplazado por un generador de energía renovable equivale a 0,9 t CO₂/MWh” (Ibíd.).

El precio de los CERs puede ser negociado antes de la certificación de estos, es decir desde la fase de diseño del proyecto, siendo el precio bastante inferior que el de CERs emitido, pero también disminuyendo el riesgo de aprobación de los CERs para el vendedor. El precio de los CER en proceso de diseño del proyecto oscila alrededor de 8 US/t CO₂ y el precio de un CER emitido fluctúa en torno a los 23 US/t CO₂. Estos precios dependen de la oferta y demanda.

Respecto de los MDL se debe mencionar que para obtener los CERs se debe demostrar que sin los recursos obtenidos por los CER, el proyecto no habría sido posible de llevar a cabo. Los costos de estos estudios e informes se estiman entre 50000 y 100000 US y el proceso puede demorar alrededor de un par de años. De esta forma se puede decir que dependiendo de la naturaleza de los proyectos, el aporte de los CERs puede ser muy relevante a la hora de decidir la viabilidad de éstos.

▪ **Ingresos por venta de bioabono**

La comercialización del bioabono puede significar en muchos casos un factor decisivo en la rentabilidad del proyecto. El constante aumento de los costos de los fertilizantes químicos y el aumento de la conciencia ecológica, ha ocasionado un aumento en la demanda de fertilizantes orgánicos.

La cantidad de fertilizantes que se obtienen de una planta de biogás como subproducto, depende del tipo de sustrato. Se estima aproximadamente que por lo menos el 10% de la biomasa que se alimenta al digestor puede considerarse como abono orgánico.

En este rubro hay que considerar no solo los ingresos por venta del abono sino los costos que ocasionan su preparación y comercialización. Generalmente se puede estimar que el 50% del precio de venta cubren los costos de preparación, adecuación y comercialización del bioabono.

El costo de venta al mayoreo de un saco de 25 kilos de bioabono seco (deshidratado) al 10 % de humedad está en el orden de US 5 \$/saco. Para el cálculo de la rentabilidad del proyecto se asume una utilidad líquida del 50% correspondiente a US 2,50 \$/saco de 25 kilos. El resto se considera como gastos de personal, embalaje y comercialización.

A continuación se presentan las tablas que resumen los costos e ingresos relacionados con el capítulo:

i. Presupuesto inicial

Presupuesto inicial				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costos unitario	Total
DIGESTORES, TANQUES DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA, ALMACENAMIENTO, LECHO DE SECADO				
Replanteo y nivelación de suelos	m ²	550,00	4,50	2475,00
Excavación a máquina H = 0,0 - 5 m	m ³	3250,00	15,00	48750,00
Relleno compactado	m ³	250,00	5,00	1250,00
Construcción de rasante taludes	m ²	40,00	12,00	480,00
Hormigón simple compactado fc =140 kg/cm2	m ³	30,00	100,00	3000,00
Hormigón fc = 250 kg/cm2 Piedra	m ³	50,00	160,00	8000,00
Piso cemento	m ²	58,00	8,50	493,00
Acero refuerzo fy = 4200 kg/cm2	kg	3000,00	2,00	6000,00
Encofrado	m ²	240,00	20,00	4800,00
Enlucido	m ²	270,00	14,00	3780,00
Revestimiento epóxico (MASTERSEAL 435)	m ²	70,00	10,00	700,00
Juntas de contracción y estanqueidad (masterflex 2000 tipo JC)	m ²	5,00	6,00	30,00
Aditivo epoxico (Concresive 1430 de Degussa)	galón	3,00	45,00	135,00
Aditivos hormigón	galón	1,00	35,00	35,00
Geomembrana HDPE (fondo)	m ²	1500,00	10,00	15000,00
Unidad corta llamas	u	2,00	4200,00	8400,00
Arena lecho de secado de lodos	m ³	15,00	15,00	225,00
Grava lecho de secado de lodos	m ³	20,00	22,00	440,00
Pernos de anclajes (membrana)	u	120,00	15,00	1800,00
Tapas para pozos	global	2,00	45,00	90,00
Ladrillo filtro	m ³	6,00	35,00	210,00
			SUBTOTAL:	106093,00
TUBERÍAS Y ACCESORIOS				
Tubería de acero inoxidable 50 mm	m	30,00	55,00	1650,00

Tuberías PVC 300 mm (alimentación y descarga)	m	200,00	40,00	8000,00
Tubería de PVC 100mm 1 Mpa	m	15,00	33,00	495,00
Válvulas de cierre de 1/2 vuelta 300 mm	u	5,00	850,00	4250,00
Válvulas de cierre de 1/2 vuelta 50 mm	u	4,00	220,00	880,00
Válvulas Check 300 mm	u	3,00	570,00	1710,00
Codos 90° PVC 300 mm	u	8,00	140,00	1120,00
Codos 45° PVC 300 mm	u	2,00	109,00	218,00
Codos de 90° PVC 50 mm 1 Mpa	u	5,00	60,00	300,00
T de PVC 300 mm	u	2,00	145,00	290,00
T de PVC 50 mm	u	8,00	58,00	464,00
Medidor de caudal (biomasa)	u	4,00	850,00	3400,00
Medidor de caudal (biogás)	u	4,00	745,00	2980,00
Válvula de descarga de condensados	u	2,00	3450,00	6900,00
Manómetros	u	7,00	270,00	1890,00
Válvulas de seguridad de sobrepresión y subpresión	u	4,00	3780,00	15120,00
			SUBTOTAL:	49667,00
MEMBRANA DE CUBIERTA, TANQUES DE ALMACENAMIENTO				
Tanques de almacenamiento de biogás (membrana EPDM)	u	2,00	750,00	1500,00
Membrana EPDM (cubierta)	m ²	1642,00	20,00	32840,00
			SUBTOTAL:	34340,00
EDIFICACIONES				
Galpón	m ²	1,00	350,00	350,00
			SUBTOTAL:	350,00
EQUIPO ELECTROMECAÁNICO				
Mezclador	u	1,00	3500,00	3500,00
Blowers 20 mbar	u	2,00	470,00	940,00
Equipo de monitoreo (Scada/PLCs)	u	1,00	15000,00	15000,00
Bombas	u	6,00	3000,00	18000,00
Agitadores	u	4,00	10000,00	40000,00
Instalaciones eléctricas y tableros	global	1,00	2500,00	2500,00
			SUBTOTAL:	79940,00

GENERADOR				
Generador Cummins 200 kW	u	1,00	50000,00	50000,00
			SUBTOTAL:	50000,00
FILTRO DE PURIFICACIÓN				
Filtro biológico	u	1,00	17500,00	17500,00
			SUBTOTAL:	17500,00
Otros	%	0,15	337890,00	50683,50
COSTOS DE DISEÑO				
Diseño	global	1,00	2880,00	2880,00
Pagos Director y Co-director	global	2,00	480,00	960,00
			SUBTOTAL:	3840,00
			TOTAL:	392413,50

Cant.	Posición	Nombre	Horas por semana	Semanas	Valor H-H USD	Valor Total USD
1	Estudiante	Andrés Gallardo	15	24	4	1440
1	Estudiante	Jorge Riofrío	15	24	4	1440
					TOTAL 2.2	2880

ii. Análisis

EGRESOS ANUALES				
Servicios Básicos	1,00	4000,00		4000,00
Otros Costos %	5,00	200,00		200,00
Depreciación	Inversión (US\$)	Depreciación (años)	%anual	Costos
Digestores, Tanques de alimentación y descarga	37751,50	20,00	5,00	1887,58
Edificaciones	150,00	25,00	4,00	6,00
Equipo electromecánico	73540,00	5,00	20,00	14708,00
Generador	30000,00	6,00	20,00	6000,00
Filtro de purificación	17500,00	5,00	20,00	3500,00

Membrana de cubierta, tanque almacenamiento	25530,00	10,00	10,00	2553,00
Tuberías y accesorios	30532,00	10,00	10,00	3053,20
			SUBTOTAL (US\$/año):	31707,78
Reparaciones y mantenimiento	Inversión (US\$)	Porcentaje reparación (%)	Costos	
Digestores, Tanques de alimentación y descarga	37751,50	3,00	1132,55	
Edificaciones	150,00	1,00	1,50	
Equipo electromecánico	73540,00	4,00	2941,60	
Generador	30000,00	5,00	1500,00	
Filtro de purificación	17500,00	3,00	525,00	
Membrana de cubierta, tanque almacenamiento	25530,00	1,00	255,30	
Tuberías y accesorios	30532,00	3,00	915,96	
			SUBTOTAL (US\$/año):	7271,91
Costos de personal	Cantidad	Costo		
Sueldos y salarios	2,00	850,00		20400,00
Cargas sociales (%)	15,00	3060,00		3060,00
Gastos administrativos	Cantidad	Costo		
Secretaria	1,00	300,00		3600,00
Gerente	1,00	1300,00		15600,00
Cargas sociales (%)	15,00	45,00		540,00
			SUBTOTAL (US\$/año):	43200,00
Gastos Financieros		Costo		
Financieros - Interés (% anual)	8,00	17991,76		17991,76
Amortización	7 años	32128,15		32128,15
Seguros (% valor a asegurar)	10,00	22489,71		22489,71
Otros (%)	20,00	14521,92		14521,92
			SUBTOTAL (US\$/año):	87131,54
			TOTAL DE EGRESOS ANUALES	173511,22
INGRESOS ANUALES				
ENERGIA ELECTRICA	kWh/año	US \$/kWh	US \$/año	
Energía eléctrica planta	325635,60	0,08	26050,85	

Venta de energía eléctrica	408379,40	0,10	40837,94
FERTILIZANTE	Ton/año	US \$/Ton	US \$/año
Bioabono	28400,00	13,00	369200,00
BONOS	TonCO2/año	US \$/Ton	US \$/año
Ingresos por CERs - Proyecto MDL	4500,00	8,00	36000,00
TOTAL DE INGRESOS ANUALES			472088,79
RENDIMIENTO ANUAL (INGRESOS - EGRESOS)			US \$ 298577,56
Participación Trabajadores (%)	15,00	42832,82	242719,32
Impuesto a la renta (%)	25,00	60679,83	182039,49
Utilidad Neta			182039,49

iii. Flujo de caja

FLUJO DE CAJA NETO			
Año	Ingresos (US\$)	Egresos (US\$)	FCN (US\$)
0	-392413,5	0	-392413,5
1	326288,79	319689,45	6599,34
2	326288,79	255521,52	70767,27
3	326288,79	197125,52	129163,27
4	326288,79	13635,65	312653,14
5	326288,79	72000,00	254288,79
		TIR	19%
		VAN	\$140.553,16

- **Análisis costo beneficio**

Mediante el análisis económico y financiero se logró determinar el verdadero costo beneficio de la planta de biogás. Se ha determinado que el valor de la tasa interna de rendimiento (TIR) es de 19 %, por lo que se considera recomendable invertir en la construcción de la planta. Los costos de inversión son elevados debido a la complejidad y a la buena calidad requerida en el proceso de construcción. La inversión puede ser solventada mediante un préstamo solicitado al banco, cuyo plazo de pago es de 7 años con una tasa de interés del 8%.

En base a los ingresos y egresos anuales de la planta se calcula una utilidad neta de aproximadamente 182000 dólares anuales, habiendo la posibilidad de utilizar dichas ganancias en imprevistos o mejoras de las instalaciones. La hacienda aprovechará en sus instalaciones el abono orgánico que se obtiene como producto del proceso de digestión anaerobia. De esta forma se reducen los gastos de abonos químicos y fertilizantes. Además, se reducirán los costos de operación y mantenimiento de la planta mediante el aprovechamiento energético del biogás. El restante de la energía generada en la planta de biogás se puede vender a la red pública, con lo cual se pueden obtener ganancias elevadas debido a que el costo de generación eléctrica utilizando energías renovables es de alrededor de 20 centavos por kWh generado.

El costo beneficio ambiental también se tiene en cuenta en este tipo de proyectos. Debido a que es un proyecto de tratamiento de desechos y aprovechamiento del mismo, el costo beneficio es altísimo. Al implementar un sistema de producción de biogás a partir de los desechos generados en la industria de extracción de aceite, no solo se consigue tratar de mejor forma este tipo de desechos altamente contaminantes, sino que también se los aprovecha en la generación de energía. Hoy en día este tipo de proyectos son muy beneficiosos para la conservación del medio ambiente, por lo que se incentiva mucho su desarrollo mediante la venta de certificados de reducción de emisiones (CERs) que pueden representar un gran ingreso para la planta.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

- La Hacienda Tarragona produce aproximadamente unos 1550 m³ mensuales de efluente con alta carga orgánica contaminante. Los valores obtenidos del análisis de la muestra del efluente son: DBO (21350 mg/l), DQO (55500 mg/l), aceites y grasas (51400), SST (10040 mg/l) y sólidos totales (30504 mg/l); lo que indica que si este tipo de efluente no es tratado de forma adecuada puede ser un gran contaminante ambiental.
- El sistema de producción de biogás diseñado consiste en una adaptación al sistema de tratamiento de lagunaje previamente construido en la extractora. Para ello se cubrirá el fondo de la laguna anaerobia con geomembrana y se colocará una cubierta que permita recolectar el biogás generado por el proceso de digestión anaerobia. De esta forma no solo se aprovecha el biogás generado por la digestión anaerobia del efluente, sino que también se reduce la contaminación generada por esta industria de extracción de aceite.
- La relación de DBO/DQO obtenida es de 0.4, por lo que se puede decir que el efluente admite la presencia de sustancias tóxicas que retardan la biodegradabilidad (metales pesados, cianuros, cloro, etc.), sin embargo, el efluente si puede ser utilizado en biodigestores debido a que esta relación esta dentro de los rangos aceptados de biodegradabilidad. Un valor de la relación de DBO/DQO menor a 0.2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y completamente orgánico si es mayor a 0.5.
- En base al valor de DQO y de STV se ha determinado que se pueden llegar a generar unos 20000 m³ de biogás por mes mediante la adaptación de las lagunas de tratamiento de la extractora a un sistema de digestión de tipo "lagunas cubiertas". Mediante este tipo de sistema se recupera el biogás generado en las piscinas anaerobias del tratamiento tradicional de este tipo de efluentes.
- Los materiales de construcción del sistema de producción de biogás se eligieron principalmente en base a su disponibilidad en el mercado nacional y en base a la relación costo-beneficio. El biodigestor será construido en geomembrana HDPE y cubierta EPDM. Además su estructura está compuesta de un canal sello hidráulico construido en hormigón. El tanque de alimentación es de hormigón y el de descarga de geomembrana al igual que el digestor. Las tuberías son de PVC, debido al alto grado de corrosión que puede ocasionar el biogás.
- En las tuberías de captación y conducción de biogás existen considerables pérdidas de presión por fricción y por el paso del biogás a través del filtro de purificación, por lo que se

ha previsto la instalación de sopladores (“blowers”) seleccionados en base al límite de velocidad de flujo al interior de las tuberías y a los requerimientos de presión de biogás del generador.

- Se ha previsto la instalación de cuatro agitadores horizontales para lograr una mejor distribución de la temperatura de los nutrientes al interior del digestor, para remover las burbujas de biogás producidas por las bacterias metanogénicas y para mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana existente en el digestor. Adicionalmente se evita la formación de costras sobre la superficie de la biomasa y la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.
- Para lograr una óptima degradación de la materia orgánica al interior del digestor se ha previsto reducir la temperatura del efluente de la extractora de 60 a 40 °C previo a su alimentación al digestor. Para esto se ha diseñado un intercambiador de calor que consiste en un tubo en serpentín sumergido en el tanque de alimentación, el cual permite el enfriamiento del afluente al digestor por medio del paso de agua al interior del tubo.
- La alimentación y recirculación de biomasa, y la extracción de lodos del fondo del digestor requieren de bombas para su impulsión a través de las tuberías. Para ello se han seleccionado bombas para la impulsión de aguas residuales o lodos que cubren los requerimientos diarios de caudal.
- Previo al aprovechamiento del biogás en los generadores de energía eléctrica hay que calibrar la presión y controlar la calidad del biogás. Para ello se debe prever la instalación de accesorios para el control de presión (válvulas de sub presiones y sobre presión), unidades para medir la calidad del biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S , pH, temperatura, etc.), eliminación de condensados, medidor de caudal, manómetros y una válvula magnética de cierre.
- Debido a su alto contenido de humedad el biogás debe tratarse y acondicionarse previo a su aprovechamiento en las unidades de producción de energía eléctrica o calor. La humedad del biogás se reduce o elimina por medio de unidades de enfriamiento de tuberías. Estas unidades se instalan antes del aprovechamiento del biogás en el generador.
- La mayoría de los generadores de energía eléctrica que utilizan biogás como combustible, requieren de un contenido máximo de H_2S de 200 - 500 ppmv. Se ha estimado que el contenido H_2S del biogás generado es de 2000 ppmv, por lo que se ha previsto reducir dicho contenido mediante los tratamientos de reducción biológica mediante la inyección de

oxígeno y filtro biológico. Se seleccionó esta combinación de tratamientos debido a los bajos costos de fabricación, operación y mantenimiento.

- Los costos de la inversión de la planta termoeléctrica han sido estimados en aproximadamente US\$ 392413,50. Estos incluyen costos de construcción, costos de ampliación a la red de distribución, costos de operación y mantenimiento, costos administrativos y costos financieros. En base a estos costos de inversión se ha considerado solicitar un préstamo al Banco Nacional del Fomento, cuya tasa de interés es de aproximadamente 8 %. El plazo de pago será de 7 años.
- Los principales ingresos de la planta termoeléctrica son los ingresos por venta de energía y potencia, por la venta de bonos por reducción de gases de efecto invernadero y por la venta de bioabono. El análisis financiero realizado, tomando en cuenta los ingresos y egresos anuales durante un período de seis años indican que el proyecto tiene un alto grado de rentabilidad, debido a los valores obtenidos del TIR de 19% y del VAN de US\$ 140553,16.
- En base a la producción diaria de biogás (1314,55 m³/día), a su poder calorífico (6 kWh/m³), al grado de eficiencia total de la unidad de generación, a la eficiencia eléctrica del sistema de generación y a las horas diarias de operación de la planta, se ha seleccionado un generador de 200 kW., que representa un 20 % más de la potencia calculada para cubrir picos de demanda de energía durante el día.
- El efluente líquido que sale del digestor hacia el tanque de descarga presenta ventajas como la alta disponibilidad de nutrientes y la buena absorción por parte de las plantas. Por este motivo se lo considera como un excelente biofertilizante que puede aplicarse inmediatamente a cualquier tipo de cultivos después de la descarga del digestor, o puede almacenarse en tanques cerrados por un período no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno.
- El bioabono sólido (lodos) también puede ser aprovechado como fertilizante. 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 se vayan a fertilizar grandes áreas.

○ **RECOMENDACIONES**

- Previo a la puesta en marcha de la planta de biogás se recomienda verificar el funcionamiento y operación de cada uno de los componentes que la forman. Se deben verificar por lo menos los siguientes componentes: estanqueidad de los tanques, sellado de

la membrana de cubierta, sello hidráulico, funcionamiento del equipo electro-mecánico, sistema de captación de biogás, tuberías de conducción, filtro de remoción de H₂S, generador, instalaciones eléctricas y equipos de seguridad y contra incendios.

- Para el correcto funcionamiento del sistema de producción de biogás se deben monitorear constantemente variables como temperatura, presión, nivel, pH, producción de biogás, etc. Estas variables pueden ser monitoreadas por un sistema de control y adquisición de datos tipo SCADA o similar. La aplicación de automatización en el proceso presenta ventajas como la disminución del pago de personal y el aumento en la eficiencia del sistema, de igual manera se obtiene un aumento de confiabilidad del proceso.
- Se recomienda medir constantemente la producción de biogás, contenido de gas metano, contenido de H₂S y contenido de CO₂, ya que dichas medidas ayudan a determinar la operación y rendimiento del biodigestor. Los valores de estas mediciones deben mantenerse estables y constantes cuando el proceso haya alcanzado su madurez. Toda señal de variación en la producción de biogás o en el contenido de H₂S es una señal de inestabilidad en el proceso.
- Se recomienda también la realización de análisis físico químicos del efluente y del contenido de sustrato en los digestores para determinar los siguientes parámetros: DBO, DQO, amonios y amoníacos. Si aumenta el contenido de amonio a concentraciones mayores a 3 g/l es una señal de inestabilidad en el proceso. Los amonios pueden transformarse en amoníacos si aumenta la temperatura y el pH. Los amoníacos son inhibidores de la producción de biogás.
- A pesar de que la construcción de la planta termoeléctrica puede representar una inversión muy alta, se recomienda que se busquen alternativas de financiamiento para su ejecución, ya que se considera que después del primer año de funcionamiento de la planta se podrá recuperar lo invertido.
- En cada tanque donde se produce o almacena biogás se debe instalar una válvula para el control de sobre presión y baja presión. Estas válvulas deben ser probadas en su operación y mantenimiento previo a su instalación.
- Se considera que es necesaria la medición continua de los caudales de biogás con los que se alimentan los generadores. En base a estos valores se determina la eficiencia de producción de energía eléctrica en relación a los m³ de biogás que se produce en el digestor.

- Se debe verificar el correcto funcionamiento del intercambiador de calor que permite reducir la temperatura de la biomasa previa a su alimentación. Para ello se recomienda medir habitualmente las temperaturas de entrada y salida tanto del agua de enfriamiento como de la biomasa.
- Los equipos electromecánicos (bombas, sopladores, corta llamas, etc.) a ser instalados deben adquirirse considerando la disponibilidad del servicio de posventa, capacitación, horas de vida de los equipos, intervalos y costos de mantenimiento. Es importante que en la selección del suministrador del generador también se consideren estos aspectos.
- Al utilizar líquidos (nivel de agua) para el control de presión, se debe controlar que estos no se evaporen por el calor o se congelen por bajas temperaturas. Se debe controlar que el líquido que controla la presión no se descargue por la válvula en caso de operación. De esta manera se evita el escape incontrolado de biogás.
- Se recomienda verificar la existencia de personal capacitado tanto para la construcción como para la operación de la planta termoeléctrica. Es importante que la mayoría de los materiales de construcción se adquieran localmente.
- El propietario de la planta y su personal deberán familiarizarse con todos los detalles operativos de la planta y el mantenimiento en cuanto antes. Es importante que todo el personal de la planta se familiarice con el funcionamiento teórico y también con el uso y operación de todas las partes y componentes electromecánicos. Se recomienda que todo el personal revise el procedimiento propuesto que se debe realizar para cumplir con el proceso de puesta en marcha de la planta de biogás.
- Se recomienda que se efectúen inspecciones rutinarias de toda la planta por lo menos una vez por semana, para asegurar que no hayan ningún tipo de fallas, o permitir su corrección en el momento de ser detectadas.
- En las ocasiones en que se vacía el digestor, se deberá efectuar una inspección del interior del mismo para detectar y corregir problemas de construcción que pudieran haberse presentado. Se deberá también aplicar un recubrimiento a base de pintura anticorrosiva a todas las partes metálicas internas del sistema, así como a las tuberías y conexiones en constante contacto con el biogás.
- Durante el trabajo con los biodigestores se deben tener en cuenta diferentes condiciones de seguridad, debido a que se trata de una planta de producción de un combustible, en este caso de biogás.

- En base a la medida del contenido de H₂S en el biogás antes y después del filtro biológico, se recomienda que se cambie el lecho filtrante cada vez que haya variaciones en las medidas normales de su concentración.
- Como ya se mencionó anteriormente, la construcción de la planta de biogás representa una gran inversión. Dicha inversión puede ser recuperada con la venta o aprovechamiento de la energía eléctrica y del fertilizante. Por eso se recomienda que previo a la construcción se analicen las posibilidades de comercialización y/o aprovechamiento en la misma hacienda.

ANEXOS

ANEXO A

PLANOS

ANEXO B

Se adjuntan fotografías de las instalaciones de la Hacienda “Tarragona”, junto con los procedimientos realizados en el análisis físico-químico del efluente de la extractora.



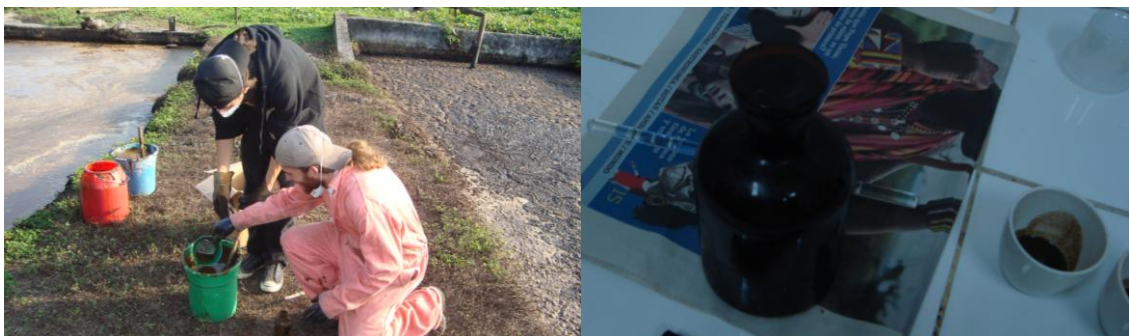
Instalaciones Hacienda “Tarragona”



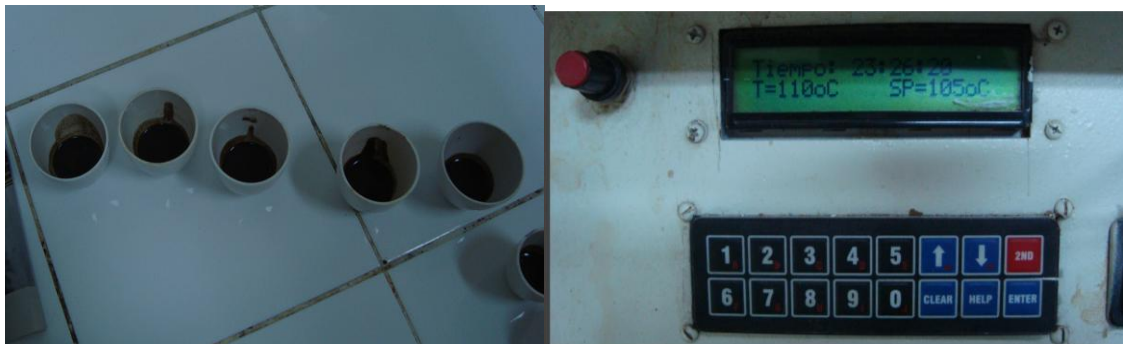
Piscinas acetogénicas que forman parte del sistema de tratamiento actual de la extractora de aceite de palma.



Muestreo del efluente de la extractora



Conservación de la muestra en frascos "Winkler" (temperatura < 5 °C). Las muestras fueron analizadas 24 horas después de ser tomadas siguiendo las recomendaciones del "Standard Methods for examination of water and wastewater".



Análisis físico – químico de la muestra del efluente (contenido de sólidos). Este procedimiento fue realizado en los laboratorios del CEINCI de la ESPE. Además del contenido de sólidos se analizó el pH y la humedad de las muestras.



Análisis físico – químico de la muestra del efluente (DBO_5 , DQO). Este procedimiento fue realizado en los laboratorios del CEINCI de la ESPE. Los valores de este análisis fueron posteriormente verificados en los laboratorios Anncy de la ciudad de Quito.



ANEXO C

Resultados del análisis físico – químico de la muestra del efluente de la extractora de aceite de palma Hacienda “Tarragona”.

INFORME DE ENSAYOS No. 11296-01

NOMBRE DEL CLIENTE: SR. ANDRES GALLARDO
DIRECCION: Abelardo Moncayo 345 y America
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: Agua Residual
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA: (Referencia dada por el Cliente)
 Código de Muestra: Muestra 1
 Sitio de Muestreo: La Concordia
FECHA DE RECEPCION: 21 de Octubre del 2009
FECHA DE ANALISIS: Del 21 de Octubre del 2009 al 28 de Octubre del 2009
FECHA DE EMISION: 28 de Octubre del 2009

Ensayo	Métodos Referencia - Laboratorio	Unidades	Límite de Cuantificación	Resultado
Sólidos Suspendidos*	HACH 8000 - PEE/ANNCY/21	mg/l	2	10040
Aceites y Grasas*	EPA 418.1 - PEE/ANNCY/01	mg/l	0.2	51400
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5*	APHA 5210 D - PEE/ANNCY/23	mg/l	3.0	21350
Demanda Química de Oxígeno*	APHA 5220 D - PEE/ANNCY/03	mg/l	30	55500
Nitrógeno Total*	HACH 8075 - PEE/ANNCY/56	mg/l NTK	2.0	540
Sólidos Totales	APHA 2540 B - PEE/ANNCY/31	mg/l	20	30504

VALORES DE INCERTIDUMBRE DE USO DE ENSAYOS ACREDITADOS POR EL OAE

Ensayo	Rango	Incertidumbre
Sólidos Totales	20 - 50000	L ± 10% mg/l

Atentamente,

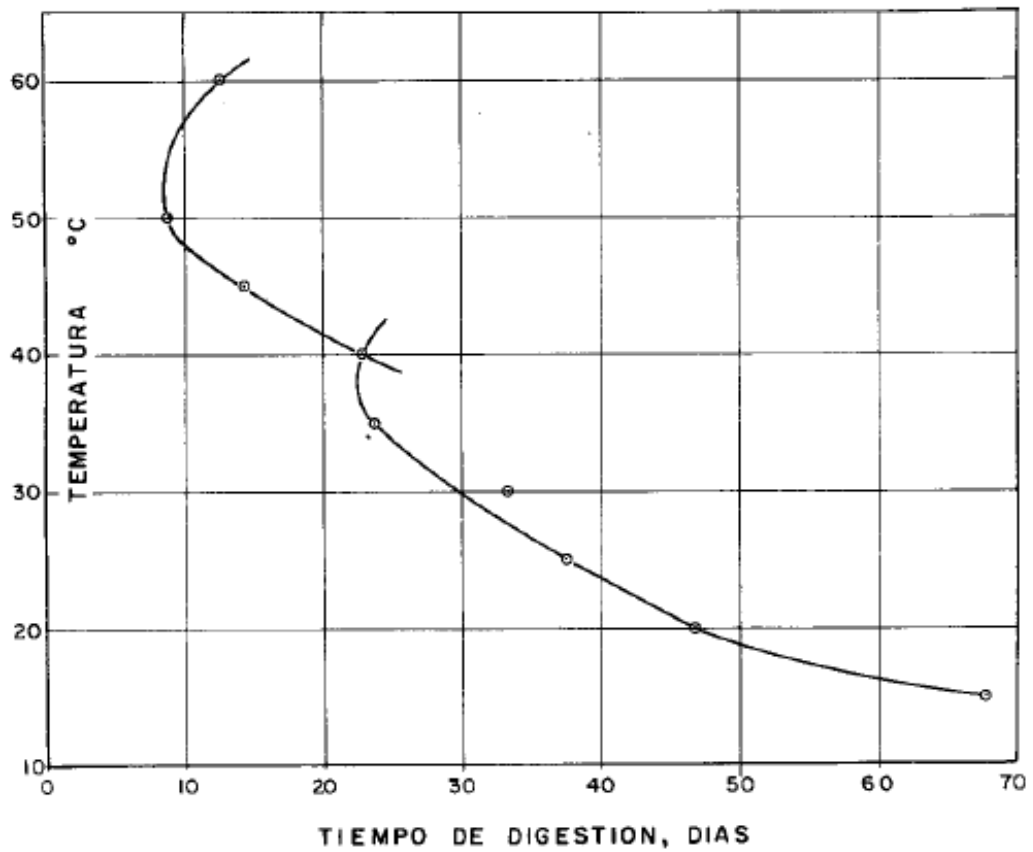
Cecilia Morales B.
Ing. Cecilia Morales B.
GERENTE ANNCY

NOTA:

- Los Ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE
- L: resultado del análisis
- El Informe sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo
- Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio

ANEXO D

Tiempo de retención hidráulico (TRH) – Temperatura



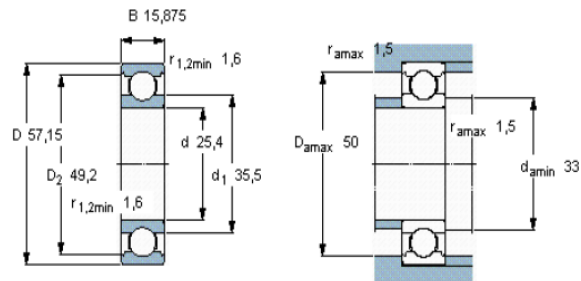
Fuente: Moncayo, “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás”, 2008, pág. 84

ANEXO E

Las especificaciones de los rodamientos seleccionados para el sistema de agitación se muestran a continuación:

Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera, no están obturados, con dimensiones en pulgadas

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
25,4	57,15	15,875	17,8	9,65	0,405	24000	17000	0,17	RLS 8



Factores de cálculo

k_r 0,025
 f_0 13

ANEXO F

A continuación se presentan las especificaciones del soplador (“blower”), seleccionado para ser instalado en la planta de biogás con el objetivo de suplir las pérdidas de presión en las tuberías, accesorios y filtro de purificación de biogás.

Submersible Electric Pump for Solids-laden Wastewater

DL Series



The DL series electric pumps come with single-channel or Vortex impeller (DLV), and are designed to handle solids-laden wastewater, with up to 20 m head and 100 m³/h capacity.

0.6 kW (0.8 HP) to 4 kW (5.5 HP) rated power.

Solids handled up to 65 mm in diameter.

APPLICATIONS

- Pumping of sewage with suspended solids and filaments.
- Emptying of sumps, septic tanks and wastewater discharge tanks.
- Draining of flooded excavations and marshy ground.

SPECIFICATIONS

- Maximum immersion depth: 5 m.
- **Maximum temperature of pumped liquid:**
50°C with fully submerged pump.
25°C with partially submerged pump.
- **Passes solids up to:**
45 mm (DL 80, 90, 105, Minivortex, Vortex).
50 mm (DL 109, 125, 160, DLV 100, 115).
60 mm (DL 180, 200).
65 mm (DLV 120, 140, 160).
- Squirrel cage motor in a dielectric non-toxic oil bath, which ensures the lubrication of the ball bearings and more efficient cooling.
- Class F Insulation.
- **2-pole** (0.6 to 1.5 kW) and **4-pole** (1.8 to 4 kW) motors.
- **Mechanical seal** protected by sand labyrinth.

- Versions:
Single-phase 220-230 V 50 Hz, with built-in thermal protector and capacitor box with on/off switch.
Three-phase 220-240 or 380-415 V 50 Hz.
Overload protection to be provided by the user (in the control panel).
- 5-metre cable for 2-pole DL-DLV and 8-metre cable for 4-pole DL-DLV.
- 60 Hz versions are available on request.
- Pre-assembled float available on request for single-phase versions (DL...CG, DLV...CG).

TABLE OF MATERIALS

2-POLE ELECTRIC PUMPS: DL 80, 90, 105, 109, 125; MINIVORTEX and VORTEX, DLV 100, 115

PART	MATERIAL
Pump body	200 UNI ISO 105 CAST IRON*
Impeller	STAINLESS STEEL (ANSI 304 - DIN 1.4307) 200 UNI ISO 105 CAST IRON* FOR MINIVORTEX AND VORTEX
Suction flange, Supporting feet, Shell (optional), Motor casing	STAINLESS STEEL (ANSI 304 - DIN 1.4307)
O-ring	NITRILE RUBBER
Mechanical seal	CARBON/CARBON/ NITRILE RUBBER
Delivery elbow (DL 105, 125 e DLV 100, 115)	200 UNI ISO 105 CAST IRON*

4-POLE ELECTRIC PUMPS: DL 160, 180, 200 and DLV 120, 140, 150

PART	MATERIAL
Pump body Motor pump support	200 UNI ISO 105 CAST IRON*
Shell	STAINLESS STEEL (ANSI 304 - DIN 1.4307)
Motor casing, Motor cover, Handle tie rod with bracket, Bases	STAINLESS STEEL (ANSI 304 - DIN 1.4307)
Mechanical seal	WEDA/WEDAFPM
O-Ring	NITRILE RUBBER

* Cast iron with polybutadiene coating through electrophoresis at 180°C.

PUMP TYPE		kW	HP	ABSORBED POWER		CAPACITOR		ABSORBED POWER IN AMP			Q = DELIVERY							
SINGLE-PHASE 220-240 V 50 Hz	THREE-PHASE 220-240/ 380-415 V 50 Hz			MONO- FASE	TRI- FASE	μF	V	SINGLE- PHASE 220- 240 V	THREE-PHASE 220- 240 V	380- 415 V	l/min	100	200	300	400	500	600	700
										m ³ /h	6	12	18	24	30	36	42	
												H = TOTAL HEAD METRES COLUMN OF WATER						
DLM 80	DL 80	0,6	0,8	0,8	0,7	20	450	3,8	2,8	1,6	5,8	4,5	3,3	-	-	-	-	
DLM 90	DL 90	0,6	0,8	0,9	0,85	20	450	4,2	3	1,75	7,2	5,7	4,5	3,3	-	-	-	
-	DL 105	1,1	1,5	-	1,5	-	-	-	5	2,9	12,5	10,5	8,8	7,4	5,5	-	-	
DLM 109	DL 109	1,1	1,5	1,75	1,75	30	450	8	5,7	3,3	14,5	12,5	10,5	8,5	6,5	5	-	
-	DL 125	1,5	2	-	2,2	-	-	-	6,6	3,8	18,5	16	14	12	10	8	5,5	

These performances are valid for liquids with density $\rho = 1.0 \text{ kg/dm}^3$ and kinematic viscosity $\gamma = 1 \text{ mm}^2/\text{sec}$.

ANEXO H

A continuación se presentan las especificaciones del generador de energía eléctrica seleccionado, el cual tiene una capacidad de 200 kW., energía obtenida en base al aprovechamiento del biogás generado en el digestor.

Technical data	
Engine Model:	8CTAA8.3G3
Alternator Model:	JCI274H
Number of Cylinders:	6 In-line
Bore/Stroke :in (mm)	4.49x5.32 (114x135)
Compression ratio:	16.8:1
Aspiration:	Turbocharged & Charge Air
Frequency:	60 Hz
Engine Speed:	1800 rpm
Gross engine power: BHP(kWm)	317 (237)
BMEP: psi (kPA)	276 (1905)
Piston Speed: ft/min (m/s)	1596 (6.1)
Fuel Consump: lt / hr - 100%load	64
Heat Rejection to Exhaust System: BTU/min (kWm)	13142 (231)
Heat Rejection to cooling System: BTU/min (kWm)	4379 (77)
Exhaust Temperature: °F (°C)	1056 (569)
Radiator cooling Air Flow: m³/seg - FPM	call factory
Exhaust Gas Flow: cfm (liter/s)	1819 (858)



Note: Standard reference conditions 25°C (77°F) Air inlet Temperature. All engines performance data based on the adobe mentioned maximum continuous ratings. Fuel consumption data at full load with diesel fuel with specific gravity of 0.85.

Dimensions and Weights				
Length:cm	Width:cm	Height:cm	Dry: kgs	Wet: kgs
260	124.5	145.5	1642	1715

Generating set picture may include optional accessories



ANEXO I

CARTA DE SATISFACCIÓN BIBLIOGRAFÍA

- Moncayo, G., Romero. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2008.
- Thomas, B., Johansson. Renewable Energy: Sources for fuel and electricity. Island Press, Washington D.C., 1993.
- Twidell, John. Renewable energy resources. USA, 1986.
- Álvarez, R. Producción Anaeróbica de Biogas: Aprovechamiento de los residuos del proceso Anaeróbico. IIDEPROQ, La Paz – Bolivia, 2004.
- Aguilar, F. Botero, R. Los Beneficios Económicos Totales de la producción de Biogas usando un Biodigestor de Polietileno de Bajo Costo. Ecuador – Costa Rica, 15 de agosto, 2006
- Botero, R. Preston, T. Biodigestores de Bajo Costo para la producción de Gas y Fertilizante a partir de Excretas. CIPAV (Centro para la Investigación de Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria) Cali, Colombia, 1995.
- Clesceri, Lenore, Greenberg, Arnol, “Standard Methods for the examination of water and waste water”, 1998.
- Morales P., “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento”, Tesis Licenciatura en Ingeniería Química, 2005.
- Blank, Tarquin, “Engineering economy”, 2002.
- Jelen, “Cost and Optimization Engineering”, 1997.
- Carless, J. Renewable Energy: A concise Guide to Green Alternatives. Pg. 175 – 197. Col. del Valle, México, 1995
- Ferrey, S. Cabraal, A. Renewable Power in Developing Countries: Winning the war on Global Warming. Pg. 35 – 55 (Capítulo 2), Tulsa – EEUU, 2006.
- Murphy. J, McKeogh. E, Kiely. G, Technical/economic/environmental analysis of biogás utilization, Cork Institute of Technology, Julio 2003, Cork, Irlanda.
- Acurio, G. Rossin, A, Diagnostico de la situación del manejo de residuos sólidos en America Latina y el Caribe. Publicación del Banco Interamericano de Desarrollo. Washington DC, 1997.
- British Biogen, Anaerobic Digestion of farm and food processing residues. Londres, 2008.
- Congreso Nacional del Ecuador, Texto Unificado de Legislación Ambiental, 1999.

- Congreso Nacional del Ecuador, Ley de Gestión Ambiental, 30 de Julio 1999.
- García, L. Optimización del sistema de extracción activa de biogás, a través de variables controladas en la masa de residuos en la celda N°2 del vertedero el Molle, V región, Chile. Universidad de Viña del Mar, Escuela de Ciencias Ambientales, 2007.
- Girardet, Herbert, Creating Sustainable Cities, Schumacher Society, Londres, 1999.
- IDAE (Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía), Biomasa: Digestores Anaerobios, Madrid, octubre de 2007.
- Lutz. P, Producción de biogás a través de fermentación seca de biomasa, BEKON Energy Technologies GMBH y Co, 2005
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Introducción al Mecanismo de Desarrollo Limpio, Roskild, Dinamarca, 2007.
- Sewten, J. Reddell, D. Biological Conversion and fuel utilization: Anaerobic Digestion for Methane Production, Pg. 55 – 76 (Capítulo 3), 1997.
- Wu, K. Energy in Latina America: Production, Consumption, and Future Growth, 1995.
- UNEP (United Nations Environment Programme), Energy and the challenge of sustainability, Nueva York – EEUU, 2000.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás, Bogotá, Marzo de 2003.

Paginas Web.

- Appropriate Rural Technologies, <http://www.arti-india.org>, Revisado: Febrero 2009
- Construcción de Biodigestores para aprovechamiento energético, <http://www.agronomos.cl/2007/feb/htm/construccion.htm>, Revisado: Enero 2009.
- El Sector alemán del Biogas, <http://www.renewables-made-in-germany.com/es/biogas/>, Revisado: Marzo 2009
- El movimiento Ecociudades, Girardet, Herbert, <http://ciudadesverdes.blogspot.com/2007/04>, Revisado: Octubre 2008
- US Department of Energy, <http://www.eere.energy.gov/>, Revisado: Septiembre 2008.