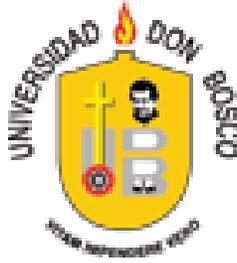


UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERIA



TRABAJO DE GRADUACION
PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO MECANICO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BIODIGESTOR PARA FINES
EXPERIMENTALES Y DIDACTICOS COMO PARTE DEL ESTUDIO
DE INVESTIGACION DE ENERGIAS RENOVABLES EN LA
UNIVERSIDAD DON BOSCO”**

POR

**JORGE BERNARDO GARZA VASQUEZ
EDUARDO ERNESTO PEREZ CASTILLO
ROBERTO LADISLAO BONILLA PALACIOS**

ASEROR:

ING. CARLOS ROBERTO PACAS HERRERA

MARZO 2007

SOYAPANGO, EL SALVADOR, C.A.

UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERIA



RECTOR

ING. FEDERICO MIGUEL HUGUET

SECRETARIO GENERAL

LIC. MARIO RAFAEL OLMOS

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

ING. ERNESTO GODOFREDO GIRON

MARZO 2007

SOYAPANGO, EL SALVADOR, C.A.

UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERIA



TRABAJO DE GRADUACION PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO MECANICO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BIODIGESTOR PARA FINES
EXPERIMENTALES Y DIDACTICOS COMO PARTE DEL ESTUDIO
DE INVESTIGACION DE ENERGIAS RENOVABLES EN LA
UNIVERSIDAD DON BOSCO”**

Ing. Quirino Argueta
JURADO

Ing. Mario Molina
JURADO

Ing. Mario Martínez
JURADO

Ing. Carlos Pacas
ASESOR

Ing. Moisés Guerra
TUTOR

MARZO 2007

SOYAPANGO, EL SALVADOR, C.A.

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios Todopoderoso, ya que por su bondad nos ha permitido realizar y finalizar nuestro proyecto de graduación.

Seguidamente, cada uno de los integrantes agradecemos todo el apoyo de nuestros padres y parientes que han estado en los momentos difíciles de nuestra carrera.

Además queremos agradecer al personal que forma parte de la Universidad Don Bosco por el apoyo incondicional que prestaron cada uno en su debido momento, los cuales mencionamos a continuación:

- Ing. Carlos Pacas
- Lic. Pbr. Víctor Bermúdez S.D.B.
- Ing. Álvaro Flamenco
- Lic. Dilma Reyes
- Taller de mecánica CITT-UDB (área de producción)
- Laboratorios de Química y Física CITT-UDB
- Personal de Servicios Generales UDB
- Escuela de Ingeniería Mecánica UDB

A las demás personas que pudieran no aparecer en esta lista también les agradecemos porque con el más pequeño detalle, idea o palabra de aliento hicieron que nuestro proyecto tuviera éxito.

TABLA DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN	6
II. OBJETIVO GENERAL	7
Objetivos Específicos	7
III. ALCANCES	8
IV. LIMITACIONES	9
CAPITULO 1: BIOGÁS Y TIPOS DE DIGESTORES	10
1.1 ¿QUÉ ES EL BIOGÁS?	10
1.1.1 BIOLOGÍA DE LA METANOGENESIS	10
1.1.2 SUSTRATOS Y BALANCE DE MATERIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	11
1.1.3 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL BIOGÁS	11
1.1.4 POTENCIALES DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP).....	12
1.1.5 LOS BENEFICIOS DE LA TECNOLOGÍA DE BIOGÁS	13
1.1.6 HISTORIA DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE BIOGÁS	14
1.1.6.1 Sistema Hindú (domo flotante)	15
1.1.6.2 Sistema Chino (domo fijo)	15
1.1.6.3 Digestores Anaerobios Rurales en El Salvador	15
1.2 MICROBIOLOGIA	16
1.2.1 LOS MICROBIOS DE LAS 3 FASES DE LA FERMENTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	17
1.2.2 SIMBIOSIS DE LAS BACTERIAS	17
1.2.3 OTRAS BACTERIAS ESPECÍFICAS	18
1.2.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS BACTERIAS METANOGENICAS	19
1.3 BIOQUÍMICA DE LA FERMENTACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS	19
1.4 APARIENCIA FÍSICA DE DIFERENTES TIPOS DE PLANTAS DE BIOGÁS.....	20
1.4.1 PLANTAS DE BOLSA.....	21
1.4.2 PLANTAS DE DOMO FIJO	22
1.4.2.1 Funcionamiento	23
1.4.2.2 Clima y Tamaño.....	25
1.4.3 PLANTAS DE TAMBOR FLOTANTE	25
1.4.3.1 Plantas de Tambor flotante con Guía de Agua	26
1.4.4 REQUERIMIENTOS GENERALES DE CONSTRUCCIÓN.....	27
CAPITULO 2: PARAMETROS DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBICA.....	31
2.0 PARÁMETROS Y PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN	31
2.1 TEMPERATURA DEL SUSTRATO	31
2.1.1 Rango de temperatura de la fermentación anaeróbica	31
2.1.2 Temperatura promedio	32
2.1.3 Cambios de temperatura	33
2.2 NUTRIENTES DISPONIBLES.....	34
2.2.1 Desechos de la cría de animales	37
2.2.2 Desechos vegetales	38
2.2.3 Generación específica de biogás/ producción específica de biogás	39
2.3 TIEMPO DE RETENCIÓN	40
2.3.1 Carga Batch y plantas continuas.....	40
2.3.1.1 Carga/descarga volumétrica del digestor	40
2.3.2 Sustrato	40
2.4 VALOR DE PH.....	41
2.5 RELACIÓN C/N	41
2.6 CONTENIDO DE SUSTRATOS SÓLIDOS Y AGITACIÓN	43
2.6.1 Contenido de sustratos sólidos	43
2.6.2 Agitación	44

2.7 FACTORES INHIBIDORES	45
2.8 CARACTERÍSTICAS DE LA DIGESTIÓN Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	45
2.9 APLICACIONES DEL BIOGÁS	46
2.9.1 Condicionamiento del Biogás	46
2.9.2 Fertilizando con efluente digerido (bioabono)	49
2.9.2.1 Almacenamiento y aplicación del efluente digerido	50
2.9.3 Características principales de la combustión de biogás.....	51
2.9.3.1 Densidad del biogás	51
2.9.3.2 Valor calorífico del biogás.....	51
2.9.3.3 Demanda teórica de aire del biogás	52
2.9.3.4 Presión	52
2.9.3.5 Carga calórica del quemador.....	52
2.9.3.6 Eficiencia calorífica	52
2.9.3.7 Coeficiente de aire primario del quemador	53
2.9.4 Tipos de quemadores de Biogás.....	53
2.9.4.1 Quemador de tipo difusivo.....	53
2.9.4.2 Quemador de tipo atmosférico	53
2.10 LUGARES DE OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA	54
2.10.1 Rastro Municipal de Mejicanos.....	55
2.10.2 Rastro Municipal de Soyapango.....	57
2.10.3 AVICOLA SALVADOREÑA S.A. DE S.V	59
CAPITULO 3: DISEÑO DEL BIODIGESTOR	61
3.0 MÉTODOLOGÍA EMPLEADA	61
3.1 CARGA Y DESCARGA DE SUSTRATO.....	61
3.1.1 Tiempo de retención TR	62
3.1.3 Carga del digester (C_d)	63
3.1.4 Volumen del digester	64
3.1.5 Generación diaria de biogás (G)	64
3.1.6 Producción específica de biogás (P_e).....	65
3.1.7 Dimensionamiento del gasómetro	66
3.2 ESFUERZOS DE LA CÁMARA DE DIGESTIÓN (ESTRUCTURA 1)	67
3.2.1 Esfuerzos en las paredes del barril	68
3.2.2 Esfuerzos en un cordón de soldadura.....	69
3.2.3 Diámetro de la tubería de gas	69
3.2.4 Agitador	70
3.3 ANÁLISIS DE FUERZAS TRAMOS ESTRUCTURALES (ESTRUCTURA 2)	72
3.3.1 Diagrama De Tramos De La Estructura 2	72
3.3.2 Diagrama De Cuerpo Libre De Viga, Estructura # 2	75
3.4 ANÁLISIS DE ESFUERZOS PARA LA ESTRUCTURA 3 (ESTRUCTURA DE CARGA)	77
CAPITULO 4: ANÁLISIS ECONÓMICO	79
4.1 COSTOS DE INVERSIÓN DE MATERIALES PARA COSTRUCCIÓN DE BIODIGESTOR	79
4.2 PRONÓSTICO DE GENERACIÓN DE GAS POR SUSTRATO EN	80
BIODIGESTOR DURANTE UN AÑO	80
4.3 DEPRECIACIÓN DE MAQUINARIA Y EQUIPO POR MÉTODO LÍNEA RECTA.....	81
4.4 COSTOS DE MANTENIMIENTO DEL AÑO 1 AL 5	81
4.5 TABLA DE AMORTIZACION.....	82
4.6 FLUJO DE EFECTIVO	82
CAPITULO 5: LUGAR Y PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	83
5.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR.....	83
5.2 RECONOCIMIENTO DE LAS ÁREAS PARA INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR	84
5.3 HOJAS DE RUTA DE CONSTRUCCIÓN (VER ANEXO 9)	86
CAPITULO 6: OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR Y RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN .	87
6.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BIODIGESTOR	87
6.1.1 Sistema de carga de materia prima.....	87

6.1.2 Cámara de digestión	88
6.1.3 Agitador	89
6.1.4 Sistema de Transporte y almacenamiento de Biogás	90
6.1.5 Procedimiento para la carga inicial de sustrato.....	91
6.1.6 Procedimiento para carga diaria de sustrato.....	92
6.1.7 Procedimiento para Agitación de sustrato.....	93
6.1.8 Filtros de CO ₂ y H ₂ S	94
6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL BIODIGESTOR.....	96
6.3 CUANTIFICACIÓN DE BIOGÁS GENERADO	98
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES.....	102
GLOSARIO	104
BIBLIOGRAFÍA	107
ANEXOS	110
Anexo 1: Plano de ubicación de Rastro de Soyapango.....	111
Anexo 2: Mediciones de Temperatura de Sustrato en digestor de domo flotante.....	112
Anexo 3: Esfuerzos de la cámara de digestión.....	116
Anexo 4: calculos de las fuerzas y reacciones encontradas en los tramos de la estructura de soporte de la camara de digestion.....	124
Anexo 5: Estructura 3, Pileta de Carga del Digestor	130
Anexo 6: Planos de diseño del Biodigestor.....	132
Anexo 7: Matrices Causa/Efecto.....	133
Anexo 8: Plano de ubicación del Biodigestor dentro del Campus UDB.....	134
Anexo 9: Hojas de ruta de construccion del biodigestor.....	135
Anexo 10: Manual de funcionamiento del Biodigestor.....	158
Anexo 11: Manual de mantenimiento del biodigestor.....	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación energética entre fermentación aeróbica y anaeróbica	10
Tabla 2. Composición promedio del biogás	11
Tabla 3. Potenciales de Calentamiento Global	13
Tabla 4. Algunas bacterias no metanogénicas en la fermentación para producir Biogás.	18
Tabla 5. Rangos de temperatura para fermentación anaeróbica	31
Tabla 6. Potencial energético de compuestos orgánicos (SV, sólidos volátiles).....	34
Tabla 7. ST y SV-Contenido en plantas verdes	35
Tabla 8. Valores estándar de peso vivo por animal en Ganadería y producción promedio de excretas (estiércol y orina) como porcentaje del peso vivo.	38
Tabla 9. Características de digestión de residuos de ganadería.	38
Tabla 10. Generación de biogás de varios tipos de biomasa (Ge).	39
Tabla 11. Contenido de Nitrógeno y razón C/N para una selección de sustratos, compilados de varias Fuentes.	43
Tabla 12. Límites de concentración de varios inhibidores de la biometanización.	45
Tabla 13. Composición y propiedades del biogás, y sus constituyentes bajo condiciones S.T.P (0°C, 1013 mbar).	47
Tabla 14. Concentración de nutrientes en efluente digerido de varios sustratos	49
Tabla 15. Tiempo de supervivencia de patógenos en plantas de biogás.....	50
Tabla 16. Resultados de análisis de excretas de vaca, Mejicanos	57
Tabla 17. Resultados de análisis de excretas de cerdo, Mejicanos.....	57
Tabla 18. Resultados de análisis de excretas de vaca, Soyapango	58
Tabla 19. Resultados de análisis de excretas de pollo (pollinaza), AVICOLA SALVADOREÑA.	59
Tabla 20. Resumen de parámetros de los sustratos a utilizar.	64
Tabla 21. Generación diaria de biogás (proyecciones).....	65
Tabla 22. Producción específica de biogás (proyecciones)	65
Tabla 23. Consumo de biogás para uso en cocina	66
Tabla 24. Consumo de biogás para uso en diferente maquinaria.....	66
Tabla 25. Energía producida por biogás, obtenido de distintos desechos animales..	66
Tabla 26. Parámetros adimensionales óptimos para tornillos de Arquímedes de varios números de hélices.....	71
Tabla 27. Resumen de elementos de diseño seleccionados para el digestor	78
Tabla 28. Resultado de mediciones de pH en sustratos de pollo y vaca	100

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Plantas de biogás simples.....	21
Ilustración 2. Planta de domo fijo.....	22
Ilustración 3. Tanque de mezcla (separador de sólidos).	23
Ilustración 4. Camino de la fermentación en el sustrato fresco del digestor.	24
Ilustración 5. Funcionamiento básico de un digestor de domo fijo.	25
Ilustración 6. Planta con guía de agua con un marco externo.	27
Ilustración 7. Construcción de la garganta del digestor con refuerzo de cemento y acero.	29

Ilustración 8. Construcción del domo para un digestor de 30 m ³ en Cuba.	30
Ilustración 9. Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás (curvas -f _{T,RT}).....	33
Ilustración 10. Propiedades de las excretas de pollo.....	36
Ilustración 11. Tubería de gas, Válvulas y uniones de una planta de biogás.	47
Ilustración 12. Trampa de condensación.....	47
Ilustración 13. Estructura esquemática de un quemador tipo difusivo.....	53
Ilustración 14. Estructura de un quemador atmosférico.	54
Ilustración 15. a) Contenedor donde son depositadas las excretas de vaca y de cerdo. Rastro de Mejicanos. b) Abertura de rumen (estomago) de vaca	55
Ilustración 16. Muestras del Rastro de mejicanos después de ser expuestas a alta temperatura.	56
Ilustración 17. Muestras del Rastro de Soyapango después de ser expuestas a alta temperatura.	58
Ilustración 18 Muestras de pollinaza después de ser expuestas a alta temperatura.	59
Ilustración 19. Diagrama de cuerpo libre, Camara de digestion	68
Ilustración 20. Diagrama de cuerpo libre de seccion de soldadura de barril	69
Ilustración 21. diagrama de tuberia de biogás.....	70
Ilustración 22. Vista de perfil de un tornillo de Arquímedes de dos hélices	70
Ilustración 23. Soldadura de filete en ángulos estructurales.	76
Ilustración 24. Vista frontal estructura 3	78
Ilustración 25. Flujo efectivo en el tiempo.....	83
Ilustración 26. Terreno contiguo al edificio de laboratorios de Mecánica de la UDB (opción 1).....	84
Ilustración 27. Terreno contiguo a edificio de Ortesis y prótesis (opción 2).....	84
Ilustración 28. Terreno fuera del campus UDB, Contigo a muro del CITT	85
Ilustración 29. Subsistemas del biodigestor.....	87
Ilustración 30. Sistema de Carga.....	88
Ilustración 31. Cámaras de digestión	88
Ilustración 32. Eje agitador, visto desde la compuerta de mantenimiento	89
Ilustración 33. Prensa estopa hembra	89
Ilustración 34. Prensa estopa macho	90
Ilustración 35. Conjunto de Prensa estopa	90
Ilustración 36. Componentes del sistema de transporte y almacenamiento de biogás.....	91
Ilustración 37. Procedimiento para carga de sustrato en el Biodigestor	92
Ilustración 38. Sentido de giro del agitador	94
Ilustración 39. Filtro de H ₂ S	95
Ilustración 40. Volumen almacenado dentro del gasómetro 1.33 m ³	98
Ilustración 41. Sistema utilizado para la quema de biogás en el laboratorio (a) y en el sitio del digestor (b)	99

I. Introducción

Las alternativas de energías renovables son muchas, pero existe la dificultad de que no todas pueden aplicarse en cada región que la requiera, muchas veces por falta de recursos naturales y otras por falta de recursos financieros, como es el caso de Centroamérica.

Un modelo de aparato funcional en nuestra región que pueda generar un tipo de energía renovable factible para la economía regional es el Biodigestor. Por estar nuestro país en un sector tropical es ideal trabajar con tecnologías a base de energía de biomasa.

El presente trabajo muestra las generalidades de diversos tipos de biodigestores desde su funcionamiento, aplicaciones y tablas con datos importantes característicos de cada uno de ellos y del proceso de digestión anaeróbica. También se incluye el diseño de un digestor y su proceso de construcción dentro de la UDB, por parte del presente grupo de tesis, en el cual se presentan cálculos, planos, selección de elementos, análisis financiero, descripción de funcionamiento y presentación de resultados de la investigación.

II. Objetivo General

“Diseñar y construir un biodigestor experimental, para la obtención de biogás con fines experimentales y académicos en la Universidad Don Bosco”

Objetivos Específicos

- x Elaborar los cálculos necesarios para el dimensionamiento y construcción del biodigestor usando materiales y elementos disponibles a nivel nacional.

- x Determinar la cantidad de materia prima a procesar para la obtención del volumen requerido de biogás según datos de diseño.

- x Comprobar experimentalmente que la materia orgánica en descomposición tiene un potencial energético que se puede aprovechar.

- x Evaluar la rentabilidad de construcción del Biodigestor que se diseñara.

III. Alcances

- x Generar la cantidad de biogás estimada según el diseño del biodigestor.

- x Redactar un manual de seguridad que garantice que no habrá ningún peligro en el funcionamiento del biodigestor.

- x Elaborar los planos de los elementos que componen el biodigestor experimental y sus respectivas hojas de ruta para su construcción.

- x Dejar establecido el espacio físico mínimo para el funcionamiento del Biodigestor experimental.

- x Proporcionar una base documental sólida que contenga entradas y salidas de información que permitan obtener las características técnicas de los dispositivos que deben utilizarse para futuras investigaciones respecto al tema.

IV. Limitaciones

- x La determinación del lugar asignado para la construcción del Biodigestor, dependerá de la decisión de las autoridades de la Universidad Don Bosco.

- x Se contara con un presupuesto moderado, por lo que el sistema se realizará como una planta piloto.

- x La generación de biogás se vera afectada por los cambios climáticos, modificando el tiempo del proceso natural de fermentación ya sea aumentándolo o disminuyéndolo.

- x Para la obtención de la materia prima del Biodigestor, existirán los inconvenientes de los costos de transporte y probablemente la compra del sustrato (materia orgánica).

CAPITULO 1: Biogás y Tipos de digestores

1.1 ¿Qué es el Biogás?

El Biogás lo originan las bacterias en el proceso de bio-degradación de material orgánico bajo condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno). La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo bioquímico del carbón. Metanógenos (bacterias productores de metano) son el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan la materia orgánica y regresan los productos descompuestos al ambiente. En este proceso es generado el biogás, como una fuente de energía renovable.¹

Características que distinguen la fermentación anaeróbica de la aeróbica incluyen (ver tabla 1):

- x Fijación de energía bioquímica en el biogás;
- x Poca formación de biomasa nueva;
- x Bajo desarrollo de calor;
- x Fijación de minerales en el efluente digerido.²

Tabla 1. Comparación energética entre fermentación aeróbica y anaeróbica

Metabolito	Aeróbico	Anaeróbico
	Fracción de energía (%)	
Citogenesis	60	10
Calor	40	-
Metano	-	90

Fuente: Inden 1978

1.1.1 Biología de la Metanogenesis

Son necesarios conocimientos de los procesos fundamentales involucrados en la fermentación de materia orgánica para producir metano y lo que implica la planeación, construcción y operación de plantas de biogás. La fermentación anaeróbica involucra la actividad de tres diferentes comunidades de bacterias: Bacterias de fermentación, Bacterias Acetogénicas, Bacterias Metanogénicas. El proceso de producción de biogás depende de varios parámetros, e.g., cambios en

¹ GTZ, "Biogás Digest", Volume I, Information and Advisory service on appropriate Technology

² U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

la temperatura ambiente pueden tener un efecto negativo en la actividad bacteriana, un pH ácido o alcalino del sustrato puede inhibir el arranque de la producción de biogás, el tiempo de retención hidráulico puede no permitir alcanzar la máxima producción de biogás por parte de las bacterias de fermentación, el contenido de sólidos del sustrato puede ocasionar problemas con el manejo de este, relación C/N del sustrato puede no ser la adecuada para la correcta procreación y desarrollo de las bacterias metanogénicas.

1.1.2 Sustratos y balance de materia para la producción de biogás

En principio, todos los materiales orgánicos pueden fermentarse o ser digeridos. Sin embargo, solo sustratos homogéneos o líquidos pueden ser considerados para plantas simples de biogás: heces y orina de ganado, aguas de desecho de inodoros. Cuando la planta es llenada, el excremento tiene que estar diluido con aproximadamente la misma cantidad de líquido (agua), si es posible, la orina puede ser usada. Desechos y agua de desecho de industrias de procesamiento de alimentos son solo adecuadas para plantas simples si estos son homogéneos y en forma líquida. El máximo de producción de gas para una cantidad determinada de materia prima depende del tipo de sustrato.

1.1.3 Composición y propiedades del biogás

El biogás es una mezcla de gases que está compuesta principalmente por diferentes elementos descritos en la siguiente tabla:

Tabla 2. Composición promedio del biogás

Componente	Fórmula	%
Metano	CH ₄	54-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	27-45
Hidrogeno	H ₂	0.5-3.0
Nitrógeno	N ₂	0.1-1.0
Sulfuro de hidrogeno	H ₂ S	0.1

Fuente: convenio CENTA-CEL-ENA, Abril 1987, SS.

Como otros gases, las propiedades del biogás son dependientes de la presión y la temperatura. También son afectadas por el contenido de humedad.

La pureza del biogás es evaluada por la cantidad de metano presente. Cuanto mayor es el porcentaje de metano, más puro es el gas.

El biogás arde con llama azul pálida y su poder calorífico promedio es 600 BTU/pie³ (5342 Kwh./m³)³. El valor calorífico neto depende de la eficiencia de los quemadores y las aplicaciones. El metano es el componente de valor desde la perspectiva de usar el biogás como un combustible.

1.1.4 Potenciales de Calentamiento Global (GWP)

Gas	GWP
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Oxido Nitroso (N ₂ O)	310
HFC-23	11700
HFC-125	2800
HFC-134a	1300
HFC-143a	3800
HFC-152a	140
HFC-227ea	2900
HFC-236fa	6300
HFC-4310mee	1300

³ Convenio CENTA-CEL-ENA, SS. abril 1987, "Investigación de modelos de digestores para producción de biogás".

El concepto de potencial de calentamiento global (GWP, en ingles) fue desarrollado para comparar la habilidad de cada gas invernadero para atrapar calor en la atmósfera relativo a otro gas. La definición de un GWP para un gas invernadero en particular es la razón del calor atrapado por una unidad de masa del gas invernadero comparado a la de una unidad de masa de CO₂ en un periodo de tiempo especificado, ver tabla 3

CF4	9200
C2F6	9200
C4F10	7000
SF6	23900
C6F14	7400

Tabla 3. Potenciales de Calentamiento Global

El metano es cerca de 21 veces más poderoso al calentar la atmósfera que el dióxido de carbono (CO₂) en peso, en un periodo de 100 años. La vida química del metano en la atmósfera es de aproximadamente 12 años. La relativa corta vida en la atmósfera, en conjunto con su potencia como gas invernadero, lo hace un candidato para mitigación a corto plazo (i.e., aproximadamente en los próximos 25 años).⁴

Fuente: IPCC, 1996

1.1.5 Los beneficios de la tecnología de biogás

Sistemas de biogás con un buen funcionamiento pueden dar todo un rango de beneficios a sus usuarios, la sociedad y el medioambiente en general:

- a) Producción de energía (calor, electricidad);
- b) Transformación de desecho orgánico en fertilizante de alta calidad;
- c) Mejoramiento de condiciones higiénicas por medio de la reducción de patógenos, huevos de larvas y moscas;
- d) reducción de la carga de trabajo, principalmente para las mujeres, en la recolección de leña para cocinar.

⁴ Committee on the Science of Climate Change Division on Earth and Life Studies, "CLIMATE CHANGE SCIENCE AN ANALYSIS OF SOME KEY QUESTIONS", Washington, D.C. 2001, National Research Council, NATIONAL ACADEMY PRESS.

- e) Ventajas ambientales por medio de la protección del suelo, agua, aire y vegetación;
- f) Beneficios micro-económicos por medio de la sustitución de energía y fertilizantes, ingresos adicionales e incremento producciones agrícolas;
- g) Beneficios macroeconómicos por medio de la generación descentralizada de energía, sustitución de importaciones y protección ambiental.

La tecnología de biogás puede substancialmente contribuir a la conservación y el desarrollo, si las condiciones concretas son favorables. Sin embargo, la alta inversión de capital y otras limitaciones de tecnologías de biogás deberán ser consideradas.

1.1.6 Historia de la Investigación sobre Biogás

El interés hacia la digestión anaerobia comenzó con la revolución científica del siglo XVII, el belga Jan Baptist van Helmont (1577–1644) estudio el “gas de los pantanos”⁵ que se observa como burbujas en la superficie de aguas estancadas. La primera experiencia de laboratorio con un digestor fue realizada al parecer por el ingles Humphrey Devy (1778 – 1829) en 1808.⁶ Casi 75 años después, Luis Pasteur (1822-1895) basado en las experiencias de un discípulo suyo sugirió que el biogás podría ser una fuente energética importante para calentamiento y alumbrado.⁷

En el siglo XX, el interés hacia la tecnología del biogás ha estado asociado a épocas de perturbación energética: durante la segunda guerra mundial en Europa y después de 1973 (año que marca el final de la era postmoderna de energía fósil barata) en todo el mundo. Notables son los esfuerzos realizados en China con

⁵ Lockemann, G. Historia de la Química. Traducción de la 1 d. alemana por Maria Teresa Toral. México D.F., UTEHA, 1960.

⁷ FRY, L.J. and MERRILL, R. Methane digesters for fuel gas and fertilizer. Santa Cruz, California, New Alchemy Institute. Newsletter no. 3, 1973

alrededor de 7 millones de digestores construidos y en India. En América Central se destaca Guatemala con 105 digestores construidos hasta 1984.⁸

1.1.6.1 Sistema Hindú (domo flotante)

El gobierno de la India en la década de los 50, por ser un país pobre en combustibles convencionales, organizó la KVICK (Kaddi Village Industri Commision), en la estación experimental de Ajithmal en Ethawa, de donde salió el típico digestor conocido como Hindú y cuya principal característica es la de operar a presión constante. También de allí surgió el nombre de Biogás para designar a este combustible obtenido a partir del estiércol animal.

Este digestor es el prototipo de la sencillez en su concepción y su operación, pues fue ideado para ser manejado por campesinos de muy escasa preparación.

1.1.6.2 Sistema Chino (domo fijo)

Por motivos diferentes de los hindúes, a partir de 1960 los chinos desarrollaron, por economía de construcción, el digestor unifamiliar que opera básicamente con presión variable. Sin embargo hay que mencionar que su objetivo no fue el biogás, sino el abono orgánico procesado y recuperado, gracias al cual la China logró superar la crisis alimenticia de esa época.

1.6.1.3 Digestores Anaerobios Rurales en El Salvador

En El Salvador, la producción de biogás esta ganando mayor atención a medida que los costos de la energía a base de combustibles fósiles, aumentan y las existencias de leña disminuyen.

Los primeros trabajos sobre biodigestion anaerobia se realizaron con miras a la utilización de los desechos del café (el procesamiento de los frutos de cafetos es la mas importante agroindustria de El Salvador). Una planta prototipo consistiendo de dos digestores metálicos estuvo en operación por unos cuatro meses (1960) usando pulpa de café como substrato.⁹ Tres años más tarde la digestión

⁸ Dirección General de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía. Desarrollo de la biodigestion en Guatemala. Guatemala, 1984.

⁹ Black, H. H. Engineering studies of coffee mill wastes in El Salvador, C.A. October 18- November 9, 1960. Cincinnati, Robert A. Sanitary Engineering Center, 1961.

anaeróbica de las aguas residuales del café se investigo utilizando un digestor vertical metálico de tres metros cúbicos. Las aguas residuales eran bombeadas hasta el tope del digestor una vez al día y la mezcla del substrato se hacia recirculando el biogás con la ayuda de un compresor.¹⁰

La generación de metano con residuos orgánicos se considero después del incremento de los precios del petróleo en 1973 y 1974. A diferencia de los primeros experimentos, la atención se enfoco principalmente a la conversión de excrementos animales a biogás. En el periodo 1967-1981 varios pequeños digestores contruidos con barriles de 55 galones, volúmenes en el rango de 220 a 690 litros fueron instalados y operados en zonas rurales en El Salvador.¹¹ Simultáneamente con algunas de estas experiencias, comenzó la planificación, construcción y operación de las primeras plantas de biogás.

1.2 MICROBIOLOGIA

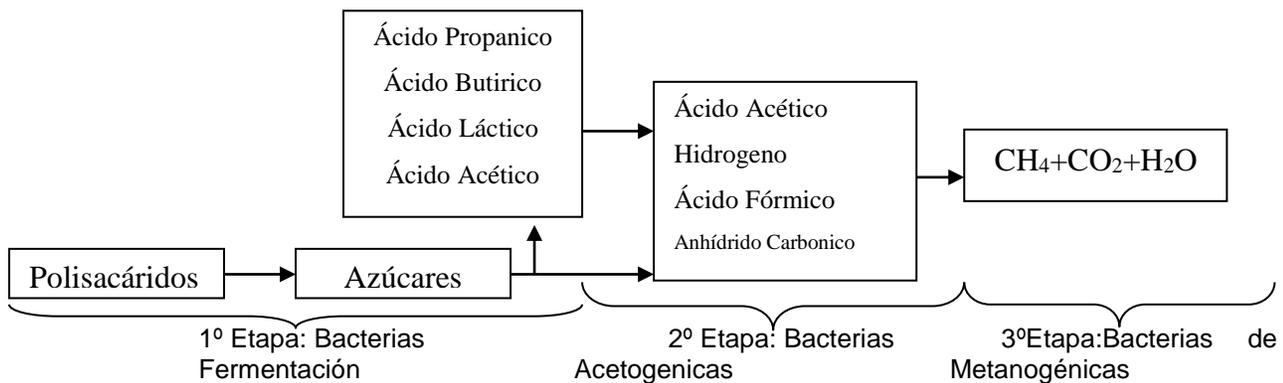
La fermentación metanogénica supone un proceso en que materias orgánicas – diversos pastos, residuos humanos y animales, basuras, lodos, etc.- Son degradados en condiciones anaeróbicas por una variedad de distintos microorganismos para generar como producto ultimo el metano. Los microbios de fermentación que producen el biogás engloban tanto las bacterias que descomponen los materiales orgánicos sin producir metano como aquellas que si lo producen; por diversos procesos y gracias a la cooperación e interacción entre ellos, estos microbios convierten distintos materiales y degradan complejas materias orgánicas para formar metano. Por lo tanto, conocer la biología de la fermentación es base teórica importante para llevar adelante la producción de biogás. La tecnología de la fermentación, el diseño del equipo, la organización del proceso, la política tecnológica de la producción y el control de las condiciones técnicas deberán basarse en el conocimiento de la microbiología de la fermentación metanogénica.

¹⁰ Santa, M.F., “Experiencias en la disposición de los desechos de la industria del café”,1969, .Tesis, Ing. Civ. San Salvador, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,

¹¹ Larde G., N. Flores. “Digestores Anaerobios Rurales en El Salvador”, 1960-1984. Instituto Salvadoreño de Investigaciones del café, Depto. De suelos y química agrícola, Centro de Tecnología Agrícola.

1.2.1 Los microbios de las 3 fases de la fermentación en la producción de biogás

Los microbios que producen el biogás consisten en una amplia y compleja especie, es de notar las bacterias productoras de metano. Todo el proceso puede ser dividido en tres pasos: hidrólisis, producción de ácidos (acidificación) y formación de metano, estas etapas las cumplen tres clases principales de microbios.¹²



1.2.2 Simbiosis de las bacterias

Bacterias productoras de metano y productoras de ácido actúan de manera simbiótica. Por un lado, las bacterias acetogénicas crean una atmósfera con parámetros ideales para bacterias metanogénicas (condiciones anaeróbicas, compuestos con un menor peso molecular). Por otro lado, bacterias metanogénicas usan partes de las bacterias acetogénicas, sin este consumo se desarrollarían condiciones tóxicas para las bacterias productoras de ácidos.

En procesos prácticos de fermentación las condiciones metabólicas de varias bacterias actúan conjuntamente. Ninguna bacteria es capaz de trabajar individualmente para producir productos de fermentación.

Las bacterias no productoras de metano producen un ambiente óptimo de reducción-oxidación (condición anaeróbica) para las metanobacterias en las fases tempranas de la fermentación de residuos orgánicos, ya que el exceso de aire que entra en el digestor, en la etapa de carga de materiales y agua, es nocivo para las bacterias metanogénicas.

¹² Curso de capacitación, “Reciclaje de materias orgánicas y biogás, una experiencia en China”, Sep.-Oct. 1984, Chengdu, China, Pág. 2

Se mantiene un pH óptimo mediante la acción recíproca entre las bacterias. En la primera etapa de la fermentación del sustrato, los almidones y azúcares se degradan en primer lugar por la acción de las bacterias no metanogénicas produciendo gran cantidad de ácidos orgánicos; al propio tiempo el CO₂ resultante se disuelve en el agua lo que provoca una caída en el pH del medio de fermentación. Sin embargo, el sistema se vuelve amoniacal por la formación de NH₃, que promueve la estabilización del pH en un tramo favorable.

La Transferencia de hidrogeno entre bacterias no metanogénicas y metanogénicas. El hidrogeno liberado en la respiración anaeróbica por las bacterias no productoras de metano es aprovechado por las bacterias metanogénicas y forma parte del sustrato para formar metano.

Tabla 4. Algunas bacterias no metanogénicas en la fermentación para producir Biogás.

Familia	Genero Estudiado	Investigadores
Aerobacter	1	Toerien (1967)
Aeromonas	1	Kotz's (1968)
Alcaligenas	4	Torien (1967), Mccarty (1962)
Bacillus	12	Kotz's (1968), Hatting (1967), Toerien (1967), Buck (1965), Cookson (1965), Burbank (1966)
Bacteroides	1	Post (1967)
Clostridium	2	Hardmann (1960)
Escherichia	3	Mccarty (1965), Burbank (1966)
Klebsiella	1	Burbank (1966)
Leptospira	2	Kotz's (1968)
Mi. Crococcus	5	Toerien (1967), Mccarty (1962), Kotz's (1968)
Neisseria	1	Mccarty (1962)
Para-colobacterim	2	Toerien (1967)
Proteus	1	Toerien (1967), Burbank (1966), Mccarty (1967), Hatting (1967), Kotz's (1968)
Rhodopseudomonas	9	Toerien (1967)
Sarcina	2	Burbank (1965-1966)
Serratia	1	Burbank (1966)
Streptococcus	1	Buck (1953)
Estreptomycis	1	-----

Fuente: Curso de capacitación, Reciclaje de materias orgánicas y Biogás, una experiencia en China, Chengdu, Sep.-Oct. 1984. Pág. 7

1.2.3 Otras bacterias específicas

También se encuentran otras bacterias específicas en la digestión anaeróbica:

- a) Bacterias desulforriblicas que reducen los sulfatos

- b) Bacterias que utilizan el ácido láctico, principalmente para producir ácido acético y ácido propinico, que incluyen Streptococo Sp., Bacteroides Sp. Y Clostridium Sp.
- c) Bacterias fotosintetizadoras, su acción en el proceso de digestión aun debe estudiarse mas a fondo.

1.2.4 Características de las bacterias metanogénicas

Son muy sensibles al oxígeno y los óxidos y por lo tanto su anaerobiosis es muy especifica. Solo pueden usar como sustrato los compuestos orgánicos e inorgánicos más sencillos. Crecen con bastante lentitud.

Las bacterias metanogénicas se asocian con un factor F420 de sensibilidad al oxígeno y es así como aun una pequeña cantidad de oxígeno afectara su acción. Los investigadores han descubierto que cuando el contenido de oxígeno en el sustrato de fermentación llega a 0.8 ml, se retardara su crecimiento.¹³

Las bacterias metanogénicas solo pueden emplear los compuestos orgánicos e inorgánicos mas sencillos y en condiciones de cultivo puro, todas estas bacterias pueden emplear el H₂ y el CO₂ como sustratos, produciendo CH₄ y la mayoría también puede utilizar el ácido fórmico para la producción de metano. Hay una especie, el Octaphloid cocí, que puede utilizar el metanol, el metil amino y el ácido acético, pero no el ácido fórmico. En la fermentación natural del sustrato, el ácido acético constituye un sustrato critico para la formación de metano, debiendo representar aproximadamente el 74% del sustrato.

1.3 Bioquímica de la fermentación de sustratos orgánicos

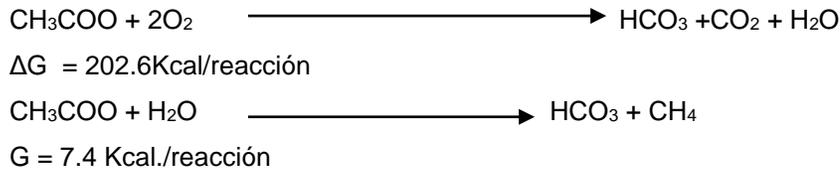
La producción de biogás es un proceso anaeróbico de fermentación o digestión. Una parte del carbono se oxida completamente formando anhídrido carbónico, y la otra se reduce en alto grado para formar metano. El anhídrido carbónico, es un compuesto estable, y a falta de oxígeno molecular, el metano tampoco puede oxidarse mas, de manera que también es estable. En la fermentación del sustrato por lo tanto, se lleva a cabo por completo la oxidación y reducción del carbono.

¹³Curso de capacitación, "Reciclaje de materias orgánicas y biogás, una experiencia en China", Sep.-Oct. 1984, Chengdu, China, Pag. 13.

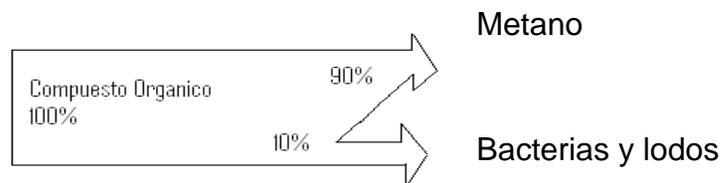
La fermentación del sustrato reúne ciertas características que son las siguientes

1. Los microbios metanogénicos consumen menos energía

La energía liberada por la digestión anaeróbica representa de una veinteava a una treintava parte de lo que consume la degradación aeróbica, calculada según la siguiente ecuación:



En un proceso de fermentación del sustrato los microbios obtienen menos energía libre, es decir, por remoción de cada gramo de CO_2 se producen al rededor de 100 a 300 calorías de energía libre, en tanto que en condiciones aeróbicas esta cantidad puede llegar a más de 3000 calorías. Como se produce menor energía, los propios microbios del biogás crecen y se multiplican con lentitud y es menor la cantidad de lodo producido también; pero en el sustrato mismo aproximadamente 90% del CO_2 se convierte para formar metano.¹⁴



La fermentación (velocidad de producción de biogás) de sustrato se ve marcadamente afectada por la temperatura. Los productos finales, el metano y el anhídrido carbónico de la fermentación se aíslan fácilmente del líquido de digestión.

1.4 Apariencia física de diferentes tipos de plantas de biogás

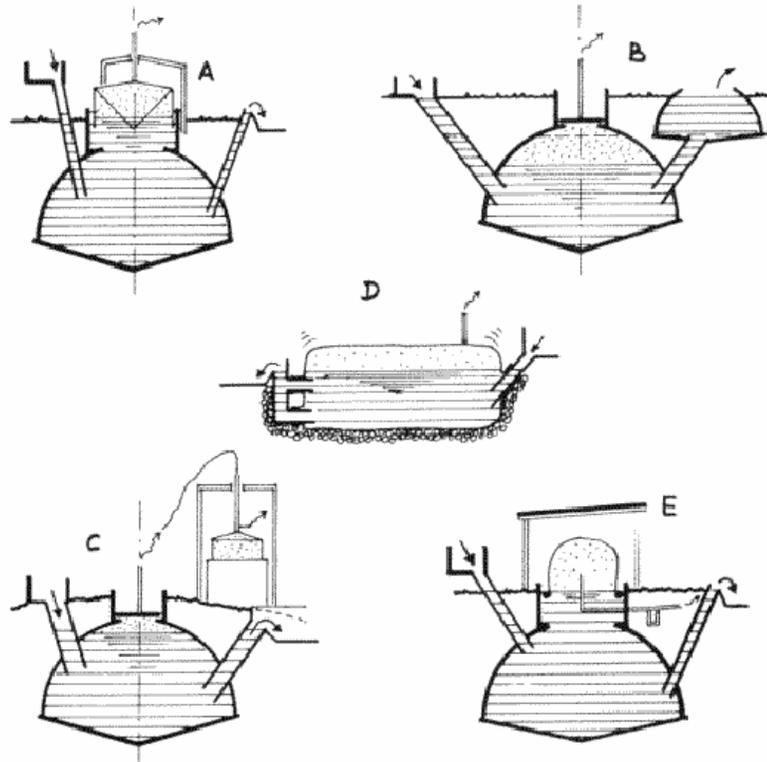
Los tres principales tipos de plantas de biogás se muestran a continuación:

- x Plantas de bolsa.
- x Plantas de domo fijo.

¹⁴ FAO, Oficina regional para América Latina y el Caribe, Curso de capacitación, "Reciclaje de materias orgánicas y biogás, una experiencia en China", Sep.-Oct. 1984, Chengdu, China, Pág. 21-22

x Plantas de tambor flotante.

Ilustración 1. Plantas de biogás simples.



Planta de tambor flotante(A), Domo fijo(B), Domo fijo con gasómetro separado(C), Planta de bolsa (D), Digestor tipo canal como bolsa plástica y sombra protectora (E).

Fuente: Biogás Plants, L. Sasse, GATE, 1988, Pág.14

1.4.1 Plantas de bolsa

Estas plantas consisten en una bolsa que se encuentra en la parte alta del digestor, en la cual se almacena el gas. El ingreso y el escape están directamente conectados a la piel plástica de la bolsa. La presión del gas se consigue a través de la elasticidad de la bolsa y por la adición de pesos sobre ella.

Ventajas: son de bajo costo, de fácil transporte, construcción no sofisticada, altas temperaturas digestivas, fácil limpieza, vaciado y mantenimiento.

Desventajas: pueden ser de corta vida, alta susceptibilidad al daño, una pequeña creación de empleo local y, por esta razón, limitado potencial de esfuerzo propio.

Una variación en la planta de bolsa es el digestor de canal, el cual es usualmente cubierto con una capa de plástico. Las plantas de bolsa pueden ser recomendadas

siempre y cuando el plástico está a salvo de daños y donde la temperatura sea alta.

1.4.2 Plantas de domo fijo

Las plantas de domo fijo consisten en un digestor con un contenedor fijo para el gas, ubicado en la parte alta del digestor. Cuando empieza la producción de gas, el residuo es desplazado hacia un tanque de compensación. La presión del gas se incrementa con el volumen de gas almacenado y con la diferencia de altura entre el nivel del residuo dentro del digestor y el nivel del residuo en el tanque de compensación.

Ventajas: son relativamente baratos en construcción, hay ausencia de partes móviles y partes robustas de acero. Si se construyen bien, estas plantas tienen una larga vida de uso. La construcción subterránea ahorra espacio y protege el digestor de los cambios de temperatura. La construcción provee oportunidades de empleo local.

Desventajas: Principalmente lo representa el sellado de gas que debe poseer los ladrillos del gasómetro (una pequeña fuga en estos puede causar grandes pérdidas de biogás). Estas plantas son recomendadas solamente donde su construcción puede ser supervisada por técnicos de biogás experimentados. La presión del gas fluctúa substancialmente dependiendo del volumen del gas almacenado lo cual complica su utilización. Aun cuando la construcción subterránea evita los extremos de temperatura, estos se mantienen a temperaturas generalmente bajas. La cantidad de gas producido no es inmediatamente visible. La excavación puede ser difícil y cara en suelos rocosos. Los elementos básicos de una planta de domo fijo son mostrados en la Ilustración

2.

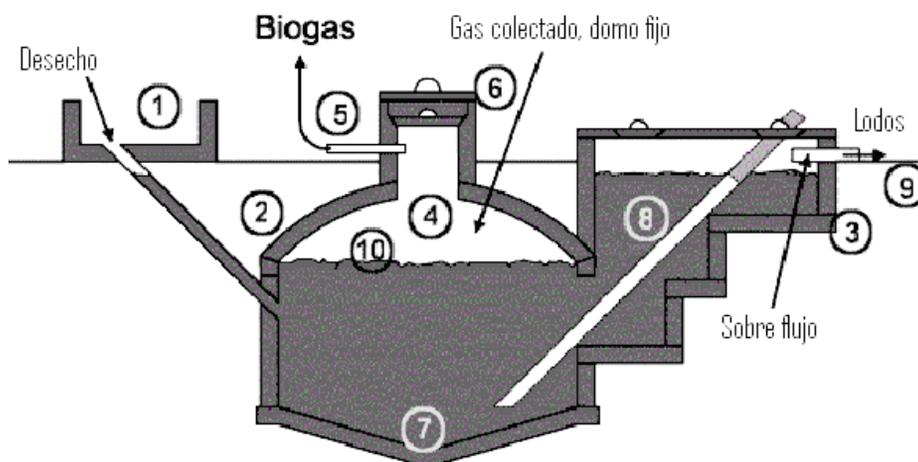


Ilustración 2. Planta de domo fijo.

1. Tanque de mezcla con tubería de entrada y trampa de arena. 2. Digestor. 3. Tanque de compensación y de remoción. 4. Gasómetro. 5. Tubería de gas. 6. compuerta de entrada, sellada herméticamente. 7. Acumulación de lodo denso. 8. tubería de salida. 9. Nivel de referencia. 10. capa de basura superficial, es quebrada por el nivel de altura variante.

Fuente: TBW

1.4.2.1 Funcionamiento

El material a ser usado como sustrato es mezclado con agua en el tanque de mezcla (Ilustración 3). Las impurezas que podrían obstruir el biodigestor son removidas. El efluente a fermentarse fluye dentro del digestor. Las bacterias de fermentación producen biogás en el digestor (Ilustración 4). Para este propósito necesitan tiempo. Tiempo para multiplicarse y para salir del efluente. El digestor debe ser diseñado de tal manera que solo el efluente digerido pueda ser descargado. Las particiones (Ilustración 4) aseguran que el efluente tenga largos caminos de flujo. Las bacterias son distribuidas en el efluente por medio de la agitación. Si la agitación es excesiva, las bacterias no tienen tiempo para “comer”. Lo ideal es una agitación suave pero intensiva cada 4 horas.

Una agitación óptima reduce substancialmente el tiempo de retención.¹⁵

Ilustración 3. Tanque de mezcla (separador de sólidos).

¹⁵ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., “Biogás plants in Animal Husbandry”, 1989, GTZ, 153 Pág.

Las piedras y partículas suspendidas asientan en el fondo del tanque. Para esta razón la tubería (P) debe estar por sobre el fondo del tanque. Si el tanque es llenado en la mañana y luego cubierto, el sustrato aumenta su temperatura (C). Solo entonces se remueve el tapón de la tubería (S).

Fuente: biogás Plants, GTZ, 1988, 85 p.

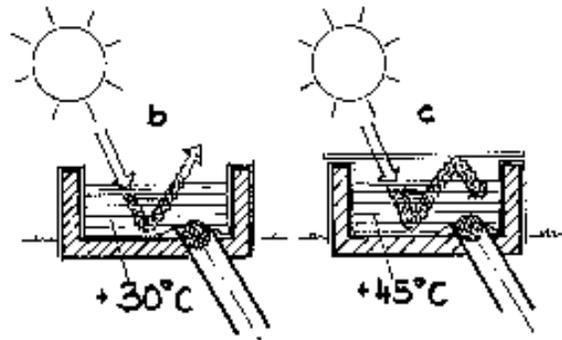
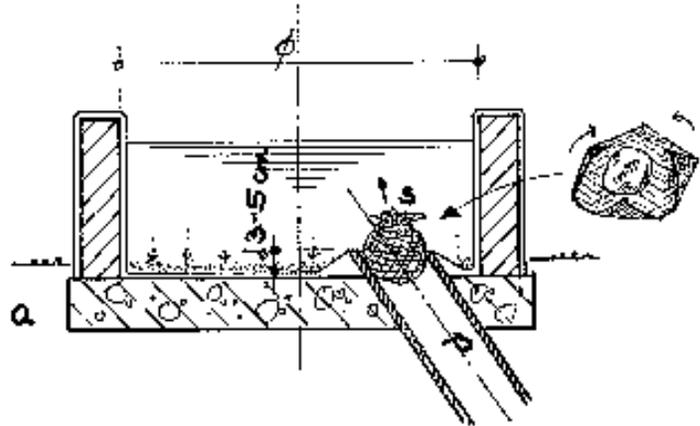
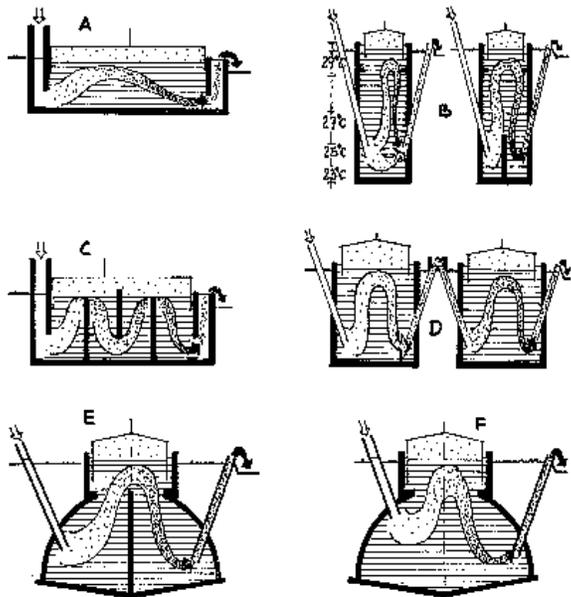


Ilustración 4. Camino de la fermentación en el sustrato fresco del digestor.



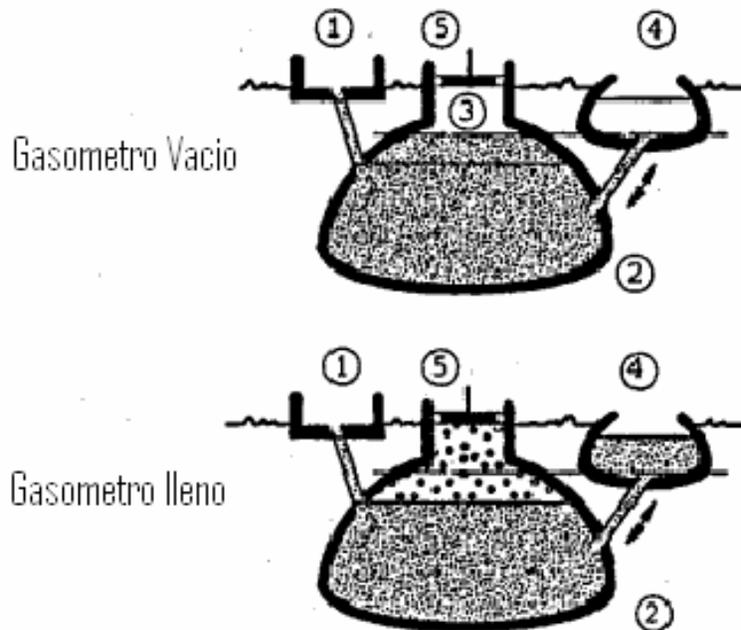
Este es más liviano que el lodo completamente digerido. Por esta razón el primero es más ligero y gradualmente sube a la superficie. La digestión posee varias fases, mientras mejor estén separadas mas intensiva será la producción de gas. El canal de fermentación (A) satisface estas condiciones de mejor manera. Plantas más complicadas son más costosas (D). Mientras más profundo el digestor, mas baja y menos uniforme la temperatura (B).

Fuente: biogás Plants, GTZ, 1988, 85 p

Una planta de domo fijo comprende un digestor con un gasómetro inamovible y un tanque de desplazamiento. El gas es almacenado en la parte superior del digestor. Cuando inicia la producción de biogás, el sustrato es desplazado hacia el tanque

de compensación. La presión del gas aumenta con el volumen de gas almacenado, esto se observa en la diferencia de niveles entre las dos superficies libres de sustrato. Si hay poco gas en el gasómetro, su presión es baja, Ver Ilustración 5.

Ilustración 5. Funcionamiento básico de un digestor de domo fijo.



1-Tanque de mezcla, 2-Digestor, 3-Gasómetro, 4-Tanque de desplazamiento, 5-Tubería de Gas.
Fuente: OEKOTOP

1.4.2.2 Clima y Tamaño

Las plantas de domo fijo deben ser cubiertas con tierra hasta la parte superior del gasómetro para contrarrestar la presión interna (hasta de 0.15 bar.). El aislamiento de la tierra y la opción para calentamiento interno las hace viables para climas fríos. Debido a parámetros económicos, el tamaño mínimo recomendado de una planta de domo fijo es de 5m³. Digestores de volúmenes de hasta 200m³ son conocidos y posibles.¹⁶

1.4.3 Plantas de Tambor Flotante

Consisten en un digestor subterráneo y un gasómetro móvil. El gasómetro flota ya sea directamente en el sustrato de fermentación o en una guía de agua. El gas es

¹⁶ Biogás Digest, Volumen II, "Biogás-Application and Product Development", GTZ-ISAT, Pag. 10.

colectado en el tambor, el cual sube o baja, dependiendo de la cantidad de gas almacenado. El tambor de gas es prevenido de pandeos por medio de un marco de guía. Si el tambor flota en una guía de agua, no puede quedarse atorado, incluso con substratos con alto contenido de sólidos.

Las ventajas son su simplicidad, y fácil operación, el volumen de gas almacenado es directamente visible. La presión del gas es constante, y es determinado por el peso del gasómetro.

Sus desventajas son los altos costos de materiales para el tambor metálico, la susceptibilidad de partes metálicas a la corrosión. Debido a esto, las plantas de tambor flotante tienen una vida menor que las plantas de domo fijo, y requieren costos de mantenimiento para el pintado del tambor.

Las plantas de tambor flotante son usadas mayormente para digerir heces humanas y animales en un modo continuo de operación, por ejemplo con cargas diarias. Estas son usadas mas frecuentemente por pequeñas a medianas granjas (tamaño de digester: 5-15m³) o en instituciones y grandes empresas agroindustriales (tamaño de digester: 20-100m³).¹⁷

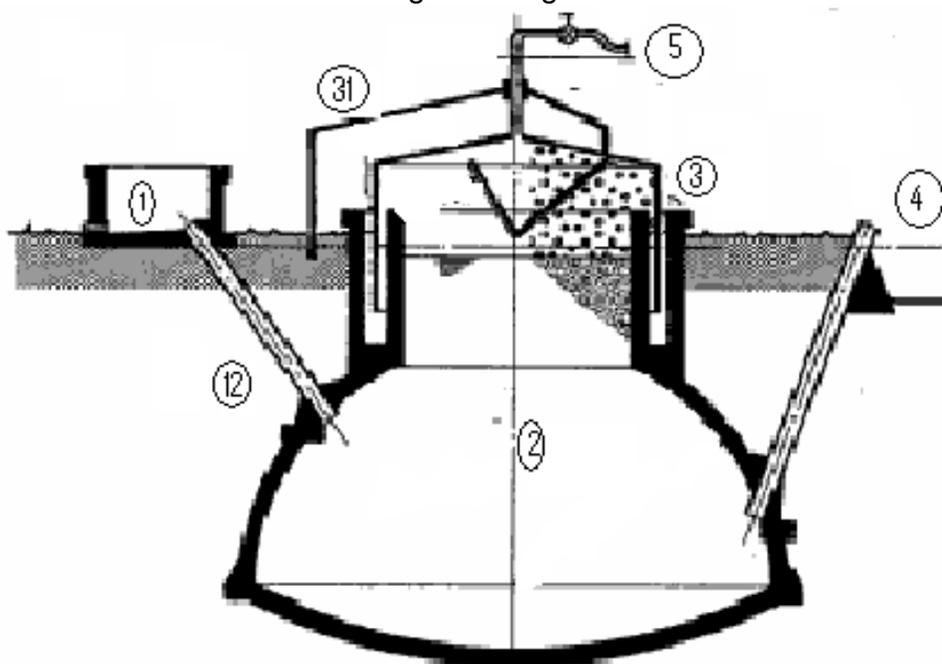
1.4.3.1 Plantas de Tambor flotante con Guía de Agua

Son universalmente aplicables y fáciles de mantener. El tambor no puede atorarse en la capa de basura sobre la superficie del sustrato, aun cuando el sustrato tiene alto contenido de sólidos. Estas plantas están caracterizadas por una larga vida útil y una apariencia mas estética (no se ensucia el gasómetro). Debido a su sellado superior del sustrato (higiene), estas plantas son recomendadas en la fermentación de excretas humanas. El costo extra de la mampostería de la guía de agua es relativamente modesto.¹⁸

¹⁷ Biogás Digest, Volumen II, “Biogás-Application and Product Development”, GTZ-ISAT, Pag. 11.

¹⁸ Biogás Digest, Volumen II, “Biogás-Application and Product Development”, GTZ-ISAT, Pag. 12.

Ilustración 6. Planta con guía de agua con un marco externo.



1-Tanque de Mezcla, 11-tubería de llenado, 2 Digestor, 3- Gasómetro, 31-Marco de guía, 4- Almacenamiento de sustrato, 5- tubería de Gas. Fuente: Sasse, 1984

1.4.4 Requerimientos Generales de construcción

Los digestores (tanques de fermentación) debe poseer los siguientes requerimientos:

a) Hermeticidad contra gas y agua

Este sirve para prevenir la filtración y la amenaza de contaminación a los suelos y al agua subterránea (manto freático). Hermeticidad del gas para asegurar un apropiado almacenamiento de la producción de este y para prevenir la entrada de aire al digestor (lo cual podría resultar en la formación de mezclas explosivas).

b) Aislamiento

Depende de los requerimientos de temperatura del proceso, el clima local y del financiamiento; las pérdidas de calor deben ser minimizadas si las temperaturas del exterior son bajas, calentamiento del digestor debe proveerse cuando las temperaturas al exterior son bajas.

c) Mínima área superficial

Mantiene el costo de construcción al mínimo, reduciendo las pérdidas de calor en las paredes del digestor. Una estructura esférica tiene la mejor relación de volumen y área superficial. Para una construcción práctica, una forma semiesférica con un piso cónico esta cercano a lo óptimo.

d) Estabilidad estructural

Debe ser suficiente para soportar cargas estáticas y dinámicas, duraderas y resistentes a la corrosión.

e) Fuerzas internas y externas

Dos fuerzas relevantes actúan en el digestor. La presión de la tierra causa fuerzas de compresión a la mampostería (Digestor enterrado). Las presiones internas hidrostática y gaseosa, causan esfuerzos de tensión en la estructura. Las formas redonda y esférica, son capaces de aceptar altas fuerzas y distribuir las uniformemente. Bordes y esquinas en la estructura conllevan concentraciones de esfuerzos y pueden resultar en rajaduras.

f) Formas de digestores

Desde el punto de vista de dinámica de fluidos y diseño estructural, una forma ovoide muestra la mejor solución posible. Este tipo de construcción, sin embargo, es comparativamente cara, por tanto es restringida para plantas a gran escala de tratamiento de aguas residuales. Los diseños chinos de domo fijo, son de forma similar pero menos costosos.

Versiónes simplificadas de los diseños mencionados de digestores incluyen cilindros con cubierta cónica. Estos son más fáciles de construir y son algunas veces accesibles en el mercado como unidades prefabricadas. Su desventaja radica, en que su relación de superficie-volumen es menos favorable. El cilindro debe tener una altura igual a su diámetro. Cilindros acostados son frecuentemente la solución más favorable para la biometanización en escalas más pequeñas. Digestores cúbicos son mas empleados en sistemas de carga-Batch, usados primordialmente para la fermentación de material sólido, donde la dinámica de fluidos es de poco interés.

Ilustración 7. Construcción de la garganta del digestor con refuerzo de cemento y acero.

Fuente: Krämer (TBW)



h) Materiales de construcción del digestor

Los digestores pueden ser fabricados de cualquiera de los siguientes materiales:

1. Recipientes metálicos

Los Recipientes metálicos son inherentemente herméticos, tiene buena resistencia a la tensión, y son relativamente fáciles de construir (por soldadura). En muchos casos un contenedor metálico que ha sido descartado y que su forma y tamaño es apropiado, pueden ser un salvado para usarlo como un biodigestor de biogás. Susceptibilidad a la corrosión por humedad atmosférica(exterior) y medios agresivos (interior) puede ser un severo problema. Como regla, algunos tipos de protectores anticorrosivos deben ser aplicados y controlados en intervalos regulares.

2. Recipientes de concreto

Los requisitos de hermeticidad necesitan de una cuidadosa construcción y el uso de sellos herméticos y revestimientos para venir fugas de gas. Las fallas más comunes son grietas debido a esfuerzos en las uniones de la cubierta superior y sus extremos. Las ventajas principales de los contenedores de concreto son su prácticamente ilimitada vida útil y su construcción relativamente barata. Estos es especialmente cierto para grandes digestores en países industrializados.

3. Mampostería

La mampostería es el método de construcción mas frecuente para digestores a pequeña escala. Ladrillos de arcilla quemada, de alta calidad, bloques de concreto pre-moldeado o bloques de piedra deben ser usados en la construcción de

digestores. Para domos mayores 20 m³ de volumen de digestor, es recomendable utilizar refuerzos de acero.

Ilustración 8. Construcción del domo para un digestor de 30 m³ en Cuba.

Fuente: Krämer (TBW)



4. Plásticos

Los plásticos han sido usados ampliamente en el campo de la ingeniería de biogás por largo tiempo. La diferenciación esta hecha entre materiales flexibles (pliegos) y materiales rígidos (domos, cilindros, etc). Diversos tipos de láminas plásticas pueden ser usados para la construcción completa de la cámara de digestión o como una cubierta hermética del recipiente de digestión.

Laminas hechas de caucho, PVC, PE de varios espesores han sido probadas en numerosos sistemas. La durabilidad de materiales plásticos expuestos a sustrato agresivo, esfuerzo mecánico y radiación ultravioleta, así como también como su permeabilidad para el gas, varia de material a material y en el proceso de producción se empleado en su manufactura.

CAPITULO 2: Parametros del proceso de digestion anaerobica

2.0 Parámetros y procesos de optimización

La actividad metabólica desarrollada en el proceso de descomposición microbológica y la producción de biogás depende de los siguientes factores:

- a) Temperatura del sustrato;
- b) Nutrientes disponibles;
- c) Tiempo de retención (flujo a través del tiempo);
- d) pH;
- e) relación C/N;
- f) Contenido de sustrato sólido y agitación;
- g) Factores inhibidores;
- h) Características y producción de biogás;
- i) Aplicaciones del biogás;
- j) Fuentes de obtención de materia prima.

2.1 Temperatura del Sustrato

2.1.1 Rango de temperatura de la fermentación anaeróbica

La fermentación anaeróbica es en principio posible entre los 4°C a aproximadamente los 70°C.¹⁹ Hay una diferenciación que se hace entre estos tres rangos de temperatura (ver tabla 5).

Tabla 5. Rangos de temperatura para fermentación anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Óptimo	máximo	Tiempo de retención (RT)
Psicríflica	4-10 °C	15-18 °C	25-30 °C	Mas de 100 días
Mesofilica	15 - 20 °C	28-33 °C	35-45 °C	30-60 días
Termofilica	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C	10-16 días

Fuente: OEKOTOP, compilación de varias fuentes.

¹⁹ Biogás Digest, Volumen II, “Biogás-Application and Product Development”, GTZ-ISAT, Pag. 12.

2.1.2 Temperatura promedio

El nivel de producción bacteriológica de metano se incrementa con la temperatura. La temperatura de fermentación/digestor es de interés primario en conexión con el tiempo requerido para la completa fermentación, i.e. el tiempo de retención: mientras más alta la temperatura, más cortó el tiempo de retención. No tiene efecto en absoluto en la generación de biogás, la cual es una constante que depende solo del tipo de biomasa en el digestor.²⁰

La cantidad de amoníaco liberado incrementa también con la temperatura, la acción biodigestiva puede ser inhibida o cuando menos verse reducida como consecuencia de esto. En general, las plantas de biogás sin calentamiento funcionan satisfactoriamente sólo donde las temperaturas anuales promedio son de 20°C o más, o donde la temperatura promedio diaria es de al menos 18°C. Con un rango de 20-28°C fijo, la producción de gas se incrementa proporcionalmente. Si la temperatura de la biomasa es menor a 15°C, la producción de gas será tan baja que la planta de biogás dejará de ser económicamente sostenible.²¹

Por razones de economía de operación, el tiempo técnico de retención Hidráulica (TR , medido en días) es seleccionado de tal manera que se obtenga una tasa de digestión (TD , medida en %) ventajosa, también referida como tasa de generación ya que define la tasa entre la producción actual de biogás y el máximo teórico. Un sistema de biogás agrícola promedio alcanza valores de TD de 30-60%.²² Véase la ilustración 9 para obtener la generación de biogás como una función de la temperatura y el tiempo de retención.

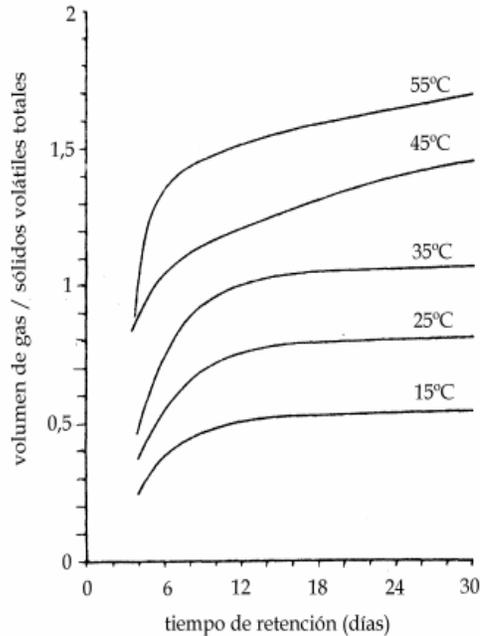
²⁰U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

²¹ Biogás Digest, Volumen II, "Biogás-Application and Product Development", GTZ-ISAT, Pag.12

²² U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

Ilustración 9. Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás (curvas -f_{T,RT}).

Fuente: Carrillo L. 2003



De acuerdo a mediciones de temperatura realizadas en sustrato de vaca de un digester experimental de barriles ubicado en el campus de la UDB(ver anexo 1) la temperatura promedio para un sustrato de 50% excretas de vaca 50% agua es de 31°C.

2.1.3 Cambios de temperatura

El proceso de generación de biogás es muy sensible a los cambios de temperatura. El grado de sensibilidad, en consecuencia, es dependiente del rango de temperatura manejado. Pequeñas fluctuaciones que no excedan los siguientes límites pueden ser considerados aún como inofensivos para el proceso de fermentación:

- x Rango psicrófilico: + 2°C/h
- x Rango mesófilico: + 1°C/h
- x Rango termófilico: + 0.5°C/h²³

Las fluctuaciones de temperatura que hay entre el día y la noche no representan mayor problema para las plantas ubicadas bajo tierra, ya que la temperatura

²³ Biogás Digest, Volumen II, "Biogás-Application and Product Development", GTZ-ISAT, Pag.11

debajo de la tierra a una profundidad de por lo menos un metro es prácticamente constante.

2.2 Nutrientes disponibles

Las dos cantidades más importantes del proceso de biometanización son el contenido de sólidos del sustrato, Sólidos Totales (*ST*, medido en Kg. ST/m^3) y su contenido total de sólidos orgánicos, sólidos Volátiles (*SV*, medido en Kg. SV/m^3). Ambas cantidades son frecuentemente definidas como porcentajes en peso.

Los sólidos totales y su contenido de agua varían ampliamente de sustrato a sustrato. El más ventajoso contenido de *ST* para una planta en funcionamiento continuo es de 5-10%, comparado con un 25% en plantas operadas en una sola carga (carga Batch).²⁴

La fermentación anaeróbica convierte los “sólidos Volátiles” (proteínas, carbohidratos, grasas). Los sólidos no volátiles son esenciales para las bacterias como alimento poco digerible y minerales. El agua sirve simultáneamente como el medio vital, solvente y medio de transporte. El potencial energético de los sólidos volátiles (*SV*) se expresa en la tabla 6. El contenido de estos en plantas verdes es también muy importante ya que residuos de material orgánico de pastos siempre esta mezclado con las excretas de animales (ver tabla 7).

Tabla 6. Potencial energético de compuestos orgánicos (*SV*, sólidos volátiles)

Material	Biogás (L/Kg.)	CH ₄	CO ₂	Contenido energético (Wh/g)
		Fracción de volumen (%)		
Carbohidratos	790	50	50	3.78
Grasas orgánicas	1270	68	32	8.58
Proteínas	704	71	29	4.96

Fuente: Kaltwasser 1980

²⁴ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., “Biogás plants in Animal Husbandry”, 1989, GTZ, 153 Pág.

Tabla 7. ST y SV-Contenido en plantas verdes

Material	ST (%)	SV (% de ST)
Paja de arroz	89	93
Paja de trigo	82	94
Paja de maíz	80	91
Gramma fresca	24	89
Jacinto de agua	7	75
Bagazo	65	78
Residuos vegetales	12	86

Fuente: Memento de l'agronome 1984.

Para poder crecer, las bacterias necesitan más que sólo una ración de sustancias orgánicas como fuente de carbón y energía. Estas también requieren de ciertos nutrientes minerales. Además de carbón, oxígeno e hidrógeno, la generación de biomasa requiere un adecuado suplemento de nitrógeno, sulfuro, fósforo, potasio, calcio, magnesio y cierta cantidad de algunos elementos como hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, etc. Sustratos “normales” tales como residuos agrícolas o desechos municipales usualmente contienen las cantidades adecuadas de los elementos mencionados. Una mayor concentración de cualquier sustancia por lo general tiene efectos inhibidores, por lo que se recomiendan análisis de composición para determinar qué cantidad de qué nutrientes, si es el caso, se necesita que sea añadido.²⁵

Los residuos agrícolas y materiales de desecho que pueden ser usados como sustrato para plantas de biogás lo forman:

- a) Desecho de la cría de animales: estiércol, orina;
- b) Desechos vegetales: grama, residuos de jardinería, etc. (aunque estos materiales no fermentan bien por si solos);
- c) Desechos de hogares: basura, agua de letrinas, etc.

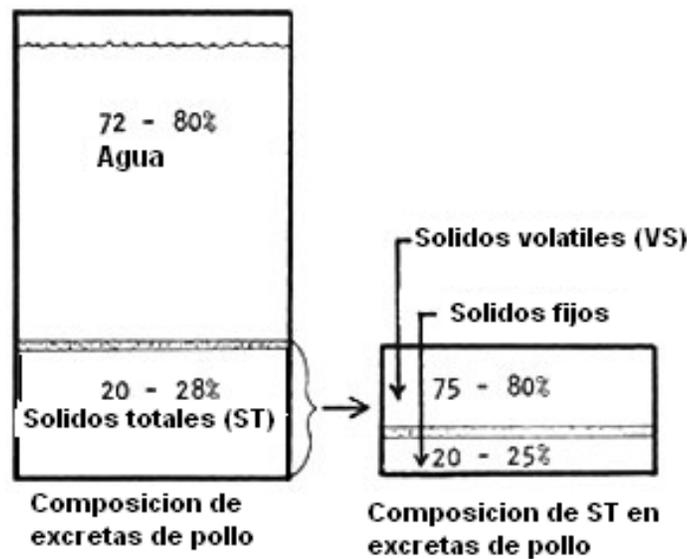
La digestibilidad y otras propiedades básicas se expresan en los términos:

- a) Humedad: El peso de agua que se pierde al secar a 105°C o hasta que se obtiene una masa constante de la muestra.

²⁵ Biogás Digest, Volumen II, “Biogás-Application and Product Development”, GTZ-ISAT, Pag.13

- b) Sólidos totales (ST): El peso del material seco remanente del secado anterior. El peso de ST es equivalente al “peso seco” (si la muestra es secada al sol, aun contiene cerca de un 30% de humedad). Los ST están compuestos de material orgánico digerible o “sólidos volátiles” (SV), y residuos indigeribles o “sólidos fijos”.
- c) Sólidos volátiles (SV): El peso de sólidos orgánicos quemado cuando el material seco es calentado (cerca de 538°C). Esta es una propiedad muy útil, ya que el contenido de SV se puede considerar como los sólidos que serán convertidos por las bacterias a biogás.
- d) Sólidos fijos (FS): Representan el peso después del calentamiento a más de 538°C. Estos son material biológicamente inerte.²⁶

Ilustración 10. Propiedades de las excretas de pollo



Fuente: Dugan, Gordon L. et. al. 1970.

Según el caso mostrado en la ilustración 10, si se tienen 100 lb. De excretas frescas, 72-80 lb. Serian de agua, y solamente 15-24 lb. (75-80% Sólidos Volátiles de 20-28% ST) estarían disponibles realmente para la digestión.

²⁶ Singh, Ram Bux. 1971. Some Experiments with Bio-Gas. Gobor Gas Research Station, Ajitmal, Etawah (U.P.) India.

2.2.1 Desechos de la cría de animales

La mayoría de las plantas de biogás son alimentadas con desechos orgánicos (estiércol y orina), debido a que dichos sustratos usualmente fermentan bien y producen buenos niveles de producción de biogás. La cantidad y composición del desecho primariamente depende de:

- a) La cantidad de material verde comida por el animal y su digestibilidad; en promedio, 40-80% del contenido orgánico reaparece como excretas (el ganado vacuno por ejemplo, excreta aproximadamente 1/3 de fibras de material verde).²⁷
- b) Calidad de utilización de material verde y el peso del animal.

Es difícil ofrecer valores aproximados de producción de excretas, debido a que están sujetos a variaciones amplias. En el caso del ganado vacuno, por ejemplo, la producción puede llegar a estar entre los valores de 8 a 40 Kg. por animal al día, dependiendo de la intensidad de estadía del ganado en establos.²⁸ Las producciones de excretas deben entonces ser medidas o calculadas en base al peso vivo del animal, ambos métodos manifiestan una buena correlación entre ellos.

Las cantidades de excretas listadas en la tabla 8 están disponibles, solo si todos los animales se mantienen en establos todo el tiempo y si dichos establos están diseñados para atrapar orina así como también estiércol. La recolección diaria de excretas es eficiente en términos de conservar el valor de los nutrientes en estas y preservar su potencial de producción de biogás. Cualquier descomposición de material orgánico fuera del digestor reducirá su producción de biogás. Por lo tanto, lo mejor es alimentar el digestor con excretas frescas.²⁹

²⁷ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

²⁸ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

²⁹ Richard M., B. Kintzer, A. Wilkie, K. Roos, 1992, "AgSTAR Handbook and Software", Segunda edición.

Estos valores necesitaran de correcciones en la mayoría de los casos. Si el ganado se mantiene solo por la noche en establos, solo 1/3 a 1/2 de los desechos podrán ser recolectados.³⁰

Tabla 8. Valores estándar de peso vivo por animal en Ganadería y producción promedio de excretas (estiércol y orina) como porcentaje del peso vivo.

Especie	Producción diaria de excretas como % de peso de animal		Sólidos en excretas frescas		Peso vivo del animal (Kg.)
	estiércol	Orina	TS(%)	VS(%)	
Ganado Vacuno	5	4-5	16	13	135 - 800
Búfalo	5	4-5	14	12	340-420
Cerdos	2	3	16	12	30- 75
Cabras	3	1 - 1.5	30	20	30 - 100
Pollos	4.5	-	25	17	1.5 - 2
Humanos	1	2	20	15	50- 80

Fuente: Kaltwasser 1980, Williamson and Payne 1980

2.2.2 Desechos vegetales

La mayoría de plantas verdes son adecuadas para la fermentación anaeróbica. Sus producciones de biogás son altas, usualmente por encima de las de las excretas (tabla 10). Madera o partes de tallos de plantas resisten la fermentación y deben por ello no ser usado en plantas de biogás (tabla 9). Debido a las pobres propiedades de fluidez de este material y su tendencia a formar una capa de basura en la superficie libre del sustrato, solo pueden ser utilizados en plantas de carga Batch (ver apartado 2.3.1).

En plantas de biogás de carga continua, residuos de cosechas deberán ser usados solo como una adición al excremento animal. Cualquier material fibroso como paja deberá ser picada hasta partes de 2 a 6 cm. Para evitar la formación de una capa de basura en el la superficie del sustrato.

Tabla 9. Características de digestión de residuos de ganadería.

Sustrato	Formación de capa de basura/sedimentación		digestión	Tiempo de retención recomendado (días)	producción de biogás comparada a producción de excretas de vaca
	ninguna	Ninguna			
Excretas de ganado vacuno	ninguna	Ninguna	Muy estable	60- 80	100%

³⁰ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

Ídem, mas 10% de paja	pesada	Ligera	Muy estable	60-100	120%
Excretas de cerdo	De ligera a pesada	Pesada a ligera	Peligro de acidificación al inicio; arranque lento con excretas de ganado necesarias	40 - 60	200%
Ídem, mas 10% de paja	pesada	Ligera	-----	60 - 80	-----
Excretas de pollos	Ligera a pesada	Pesada	-----	80	200%
Excretas de Cabras / ovejas	Media a pesada	Ninguna	-----	80-100	80%

Fuente: OEKOTOP

Tabla 10. Generación de biogás de varios tipos de biomasa (Ge).

Sustrato	Rango de generación de biogás (lt. gas/Kg. VS)	Generación promedio (lt. gas/Kg. SV)
Excretas de cerdo	340-550	450
Excretas de vaca	150-350	250
Excretas de ave de corral	310-620	460
Excretas de caballo	200-350	250
Excretas de oveja	100-310	200
Excretas de establo	175-320	225
Mazorca de maíz	350-480	410
Paja de arroz	170-280	220
Gramma	280-550	410
Gramma de elefante	330-560	445
Bagazo	140-190	160
Residuos vegetales	300-400	350
Jacinto de agua	300-350	325
Algas	380-550	460
Lodos de alcantarilla	310-640	450

Fuente: OEKOTOP, Compilación de varias fuentes.

2.2.3 Generación específica de biogás/ producción específica de biogás

La generación específica de gas (G_e , medida en m^3 gas/Kg. ST(SV)) indica cuanto gas puede ser obtenido de una cierta cantidad de biomasa. (Ver tabla 10 para valores empíricos). La tasa de generación depende naturalmente de la temperatura del digester y el tiempo de retención (ver ilustración 1).

El termino producción específica (P_e , medida en m^3 gas/ m^3 x V_d x día, V_d : volumen del digester) suplementa la expresión de G_e , definiendo la salida de biogás del digester.

2.3 Tiempo de retención

2.3.1 Carga Batch y plantas continuas

El tiempo de retención puede ser definido con precisión en plantas Batch (el digestor se carga una sola vez y se descarga cuando para la producción de biogás). Para sistemas continuos, el tiempo de retención promedio se aproxima dividiendo el volumen del digestor entre el nivel diario de efluente. Dependiendo de la geometría del digestor, los promedios de la mezcla, etc., el tiempo de retención efectivo puede variar considerablemente para cada uno de los sustratos constituyentes. La selección del adecuado tiempo de retención por lo tanto depende no sólo de la temperatura del proceso, sino también del tipo de sustrato utilizado.

2.3.1.1 Carga/descarga volumétrica del digestor

La carga volumétrica, i.e. cuanto sustrato es añadido por unidad de volumen de digestor cada día (V_c , medido en m^3/m^3 $V_d \times \text{día}$, V_d : Volumen de digestor), está dado por el tiempo de retención hidráulica (TR) elegido.

La carga del digestor (C_d , medida en Kg. digeridos de $ST(SV)/m^3 \times \text{día}$) sirve como una medida de la eficiencia del digestor. La carga del digestor depende primariamente de cuatro factores: sustrato, temperatura, carga volumétrica y tipo de planta. Para una planta agrícola típica de diseño simple, el límite superior para C_d está situado en aproximadamente $1.5 \text{ Kg. } SV/m^3 \text{ x día}$. Una carga excesiva puede llevar a disturbios en la planta, e.g. una disminución en el pH. En la práctica, la cantidad añadida de ST/SV es frecuentemente igualada a la carga del digestor.³¹

2.3.2 Sustrato

Para el estiércol líquido que está pasando por el proceso de fermentación en el rango de temperatura mesofílica, los siguientes valores son aproximadamente aplicables:

- x Estiércol líquido de vaca: 20-30 días.

³¹ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

- x Estiércol líquido de cerdo: 15-25 días.
- x Estiércol líquido de pollo: 20-40 días.
- x Estiércol de animal mezclado con plantas: 50-80 días.³²

Si el tiempo de retención es demasiado corto, las bacterias en el digestor son utilizadas más rápido de lo que pueden reproducirse, por esto la fermentación queda prácticamente paralizada.

2.4 Valor de pH

Las bacterias productoras de metano viven mejor bajo condiciones de pH neutrales a escasamente alcalinos. Una vez que el proceso de fermentación anaeróbica se ha estabilizado, el pH normalmente tomará un valor entre 7 y 8.5. Debido al efecto protector del dióxido de carbono-bicarbonato ($\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$) y amoníaco-amonio ($\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$), el nivel de pH rara vez es calculado en base a la medida de sustratos ácidos y/o potenciales productores de metano. Un digestor que contiene una concentración alta de ácidos volátiles requiere de un valor de pH considerablemente mayor que el normal. Si el valor de pH cae abajo de 6.2, el valor medio tendrá un efecto tóxico sobre las bacterias metanogénicas.

2.5 Relación C/N

Los elementos carbono (en la forma de carbohidratos) e hidrogeno (proteinas, nitratos, amonia, etc) son las principales fuentes de alimento para las bacterias anaerobicas. El carbon es utilizado para energía y el nitrogeno para la construcción de estructuras celulares. Estas bacterias consumen el carbono cerca de 30 veces mas rapido que el nitrogeno.

La actividad metabólica de las bacterias metanogénicas puede ser optimizada al lograrse una relación C/N de aproximadamente 8:1-20:1.³³ La anterior relación es la que debería de poseer el sustrato al entrar al digestor para una generación satisfactoria de biogás. Esta no toma en cuenta el contenido de nitrógeno en el efluente ya digerido, si este será utilizado para bioabono en el campo debe de usarse una relación Carbono: Nitrógeno de 30 a 35:1 es generalmente

³² Biogás Digest, Volumen II, "Biogás-Application and Product Development", GTZ-ISAT, Pag.12

³³ Biogás Digest, Volumen II, "Biogás-Application and Product Development", GTZ-ISAT, Pag.13

considerada óptima para minimizar las pérdidas de nitrógeno debido a la tasa de estabilización y volatilización de $\text{NH}_3\text{-N}$.³⁴

Si hay demasiado carbono (alta relación carbono nitrógeno, e.g., 60/1) en el sustrato, el nitrógeno se consumirá primero con carbono sobrante. Esto hará que la digestión sea más lenta. Si hay demasiado nitrógeno (baja relación C/N, e.g., 30/15), el carbono se acaba pronto y la fermentación se detiene. El restante nitrógeno se perderá como gas amoníaco (NH_3). La tabla 11 muestra diferentes relaciones C/N para varios sustratos.

³⁴ Martin J., 17 Marzo 2003, "A Comparison of Dairy Cattle Manure Management with and without Anaerobic Digestion and Biogás Utilization", Eastern Research Group, Inc., Boston MA, Pag. 20.

Tabla 11. Contenido de Nitrógeno y razón C/N para una selección de sustratos, compilados de varias Fuentes.

Fuente	Material Biodegradable	N en (%)	C/N
Maramba, Felix:	Excretas		
	Cerdos	2.8	13/7
"Biogas and Waste Recycling - The Phillipine Experience"; Metro Manila, Phillipines, 1978, Pag. 43	Vacas	1.6	23/1
	Pollos	3.7	9/65
	Patos	0.8	27/4
	Desechos caseros		
	Excretas humanas	7.1	6/72
	Desechos de cocina	1.9	28/6
	Desechos de cosecha (secados al aire)		
	Mazorca de maiz	1.2	56/6
	Pasto de arroz	0.7	51
	Tusa de maiz	1	49/9
	Desechos de mani	1.7	31
Barnett, A. et al. : "Biogas Technology in the Third World"; Ottawa, Canada,	Excretas humanas	6	6 a 10
	Excretas de vaca	1.7	18
	Excretas de pollo	6.3	7.3
	Excretas de caballo	2.3	25
	Heno, paja	4	12
	Heno, alfalfa	2.8	17
	Bagaso	0.3	150
	Excretas humanas	6	5.9-10
	Excretas de vaca	1.7	16.6-25
	Excretas de cerdo	3.8	6.2-12-5
	Excretas de pollo	6.3	5-7.1
	Excreta de caballo	2.3	25
	Excretas de oveja	3.8	33
Kaltwasser, Bernd: "Biogas", Wiesbaden, FRG, 1980, Pag. 35-36.	Algas	1.9	100
	Paja de trigo	1.1	50
	Bagaso de caña	0.3	140
	Repollo	3.6	12.5
	Tomates	3.3	12.5
	Mostaza	1.5	25
	Cascara de papas	1.5	25
	Paja de arroz	0.6	67
	Tusa de maiz	0.8	50
	Hojas secas	1	50
	Paja de soya	1.3	33
	Tallos de mani	0.6	20

Fuente: Gtz, "Production and Utilization of Biogás in Rural Areas of Industrialized and Developing Countries", No. 97, pp. 71-72

2.6 Contenido de sustratos sólidos y agitación

2.6.1 Contenido de sustratos sólidos

La movilidad de los metanógenos dentro de los sustratos se ve gradualmente perjudicada por un incremento en el contenido de sólidos, y la producción de biogás puede ser afectada como resultado. No pueden encontrarse lineamientos válidos con relación a una producción específica de biogás para algún porcentaje particular de sólidos.

2.6.2 Agitación

Muchos sustratos y varios modos de fermentación requieren de alguna fuente de agitación o mezclado para el sustrato a manera de mantener la estabilidad del proceso dentro del digestor. Los objetivos más importantes de la agitación son:

- a) Remover los metabolitos producidos por los metanógenos (gas);
- b) Mezclar el sustrato fresco y la población bacteriana (inoculación);
- c) Evitar la formación de escoria y la sedimentación;
- d) Evitar gradientes de temperatura muy pronunciados dentro del digestor;
- e) Proveer de una población bacteriana de densidad uniforme;
- f) Prevenir la formación de espacios muertos que podrían reducir el volumen efectivo del digestor.

Para seleccionar o diseñar un método adecuado de agitación, deben considerarse los siguientes puntos:

1. El proceso envuelve una relación simbiótica entre varios tipos de bacterias, el metabolismo de una especie puede servir como nutriente de la próxima especie, etc. Siempre que una comunidad bacteriana es desbaratada, el proceso de fermentación se volverá más o menos improductivo hasta que una nueva comunidad equivalente se forme. Consecuentemente, el excesivo o muy frecuente mezclado es usualmente dañino para el proceso. Una lenta remoción es mejor que una rápida agitación.
2. Una delgada capa de sedimento de escoria no necesariamente debe tener un efecto adverso en el proceso. Para sistemas en los cuales el digestor es completamente llenado con sustrato, de manera que cualquier sedimento de escoria permanezca siempre lo suficientemente húmeda, hay un pequeño o ningún peligro de que la extracción del gas pueda ser impedida por el sedimento.
3. Algunos tipos de sistemas de biogás pueden funcionar bien sin ninguna agitación mecánica. Dichos sistemas usualmente operan ya sea con sustratos en los cuales hay gran contenido de sólidos, en los que no ocurre estratificación, o bien con sustratos primariamente formados con sustancias disueltas.

Ya que los resultados de la agitación y mezclado son altamente dependientes del sustrato en uso, no es posible la suficiente comparación de varios sistemas de mezclado y/o niveles de intensidad. Por eso, cada sistema de estos puede ser diseñado solamente en base a información empírica.

2.7 Factores inhibidores

La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes usados en la crianza de ganado puede tener efectos inhibidores en el proceso de bio-metanización. La tabla 12 lista el límite de concentración (mg/l) de varios inhibidores.

Tabla 12. Límites de concentración de varios inhibidores de la biometanización.

Sustancia	[mg/L]
Cobre	10-250
Calcio	8000
Sodio	8000
Magnesio	3000
Níquel	100-1000
Zinc	350-1000
Cromo	200-2000
Sulfuro	200
Cianuro	2

Fuente: Biogás Digest, Volumen I, "Biogás Basics", GTZ-ISAT, Pág. 15

2.8 Características de la digestión y producción de biogás

Siempre y cuando el contenido de sólidos del sustrato no exceda substancialmente el 10%, se puede esperar que plantas de biogás simples operen correctamente en una mezcla de excretas de animales y material de plantas (paja, residuos de poda).

Las excretas de rumiantes, particularmente el ganado vacuno, es muy útil para iniciar el proceso de fermentación, debido a que ya contiene las bacterias metanogénicas necesarias. Por otro lado, la producción de gas de excretas de vaca es más baja que la obtenida por excretas de pollos o cerdos (tabla 10), debido a que el ganado vacuno sustrae un mayor porcentaje de nutrientes de su alimento y los compuestos de lignina sobrante de pasto con alto contenido de fibra son muy resistentes a la fermentación anaeróbica. La orina, con su bajo contenido

orgánico, contribuye poco a la producción última de gas pero substancialmente mejora el efecto fertilizante del efluente digerido y sirve para diluir el sustrato.

En muchos casos, varios tipos de sustratos deberán ser mezclados para asegurar una producción favorable de gas y al mismo tiempo estabilizar el proceso de fermentación y promover la producción de gas. La fórmula siguiente puede ser usada para calcular la relación C/N y el contenido total de sólidos de una mezcla dada:

$$C/N: \quad M_{C/N} = [(C/N_1 \times W_1) + (C/N_2 \times W_2) + \dots + (C/N_n \times W_n)] / (W_1 + W_2 + \dots + W_n)$$

$$\text{Sólidos totales: } M_{TS} = [(TS_1 \times W_1) + (TS_2 \times W_2) + \dots + (TS_n \times W_n)] / (W_1 + W_2 + \dots + W_n)$$

Donde:

$M_{C/N}$: relación C/N de mezcla de sustrato

M_{TS} : Contenido de ST de sustrato mezclado

C/N: relación C/N de sustrato individual

W: peso individual de cada sustrato

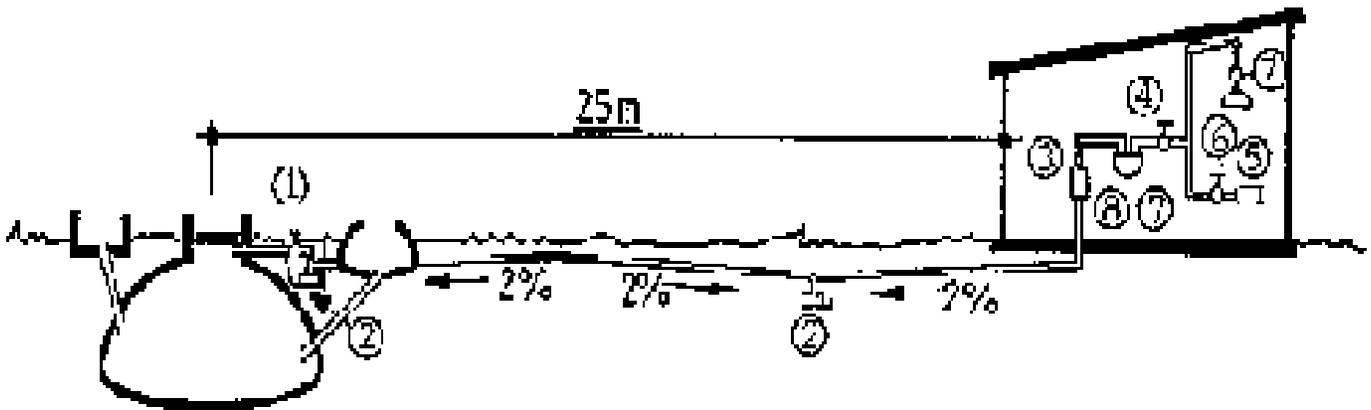
TS: contenido de sólidos de material fresco

2.9 Aplicaciones del Biogás

2.9.1 Condicionamiento del Biogás

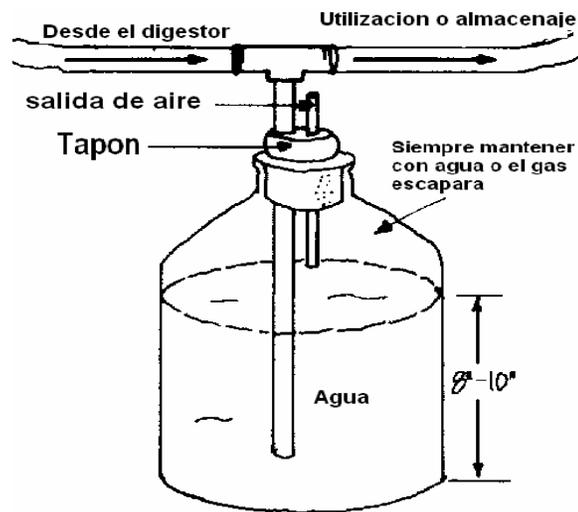
Reducir el contenido de humedad del biogás, el cual esta usualmente saturado con vapor de agua involucra enfriar el gas, e.g. al transportarlo por medio de una tubería subterránea, haciendo que el exceso de agua se condense a esta temperatura mas baja. Cuando el gas se calienta nuevamente, su contenido de vapor disminuye. El “secado” del biogás es esencialmente útil en conexión con medidores de gas secos, que de otra manera eventualmente se llenarían con vapor condensado, ver Ilustración 11 y 12.

Ilustración 11. Tubería de gas, Válvulas y uniones de una planta de biogás.



1-Válvula de cierre de planta, 2-Trampa de condensación, 3-Medidor de presión, 4-Válvula de cierre en la casa, 5-Quemador de biogás, 6- Lámpara, 7-Válvula de cierre a diversas aplicaciones del biogás, 8-Medidor de gas (flujo). Fuente: OEKOTOP

Ilustración 12. Trampa de condensación.



Fuente: The biogás/Biofertilizer Business Handbook (Peace Corps, 1982, 186 p.)

Tabla 13. Composición y propiedades del biogás, y sus constituyentes bajo condiciones S.T.P (0°C, 1013 mbar).

Constituyentes y propiedades	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	60% CH ₄ 40% CO ₂	65% CH ₄ 34% CO ₂ 1% resto
Fracción de volumen (%)	55-70	27-44	1	3	100	100
Valor calorífico neto (Kwh./m ³)	9.9	-	3.0	6.3	6.0	6.8
Umbral de ignición (% en aire)	5-15	-	4-80	4-45	6-12	7.7-23
Temperatura de Ignición (°C)	650-750	-	585	-	650-750	650-750

Presión crítica (bar)	47	75	13	89	75-89	75-89
Temperatura crítica (°C)	-82.5	31	-240	100.0	-82.5	-82.5
Densidad Normal (g/L)	0.72	1.98	0.09	1.54	1.2	1.15
razón de densidad Gas/aire	0.55	2.5	0.07	1.2	0.83	0.91
Índice Wobbe, K (kwh/m ³)	13.4	-	-	-	6.59	7.15
Calor específico, Cp (KJ/kg K)	2.190	0.85	14.3	1.01	-	-
Propagación de la flama (cm./s)	43	-	47	-	36	38

Fuente: OEKOTOP, compilación de varias fuentes.

Reducción del sulfuro de hidrogeno (H₂S, ver tabla 13) pueda ser necesaria si el biogás tiene un contenido excesivo de este i.e., mas del 2%, y es para ser usado para alimentar un motor. Sin embargo la mayoría del biogás contiene menos del 1% H₂S, la desulfurizacion es innecesaria, especialmente si es para ser usada para operar un motor estacionario.³⁵

Para plantas de pequeña a mediana escala, la desulfurizacion puede llevarse acabo por la absorción en hidrato ferrico (Fe(OH)₃). La masa porosa purificadora puede ser regenerada al exponerla al aire.

La capacidad de absorción de la masa purificadora depende de su contenido de hidrato de hierro: hierro de pantano con 5-10% Fe(OH)₃ puede absorber cerca de 14 gr. de sulfuro por kg. Sin ser regenerado y aproximadamente 150 g/Kg. por medio de regeneración repetitiva. Muchos suelos tropicales (lateriticos) son naturalmente ferrosos y por lo tanto calificados como masa purificadora. ³⁶ En la práctica puede ser utilizada viruta de hierro, que es material sobrante de procesos de maquinado de piezas mecanicas. Este también puede ser regenerado al exponerlo al aire.

La remocion de CO₂ se realiza por medio de exposicion del biogás a cal (CaO). El CO₂ es obsorvido y se forma carbonato de calcio(CaCO₃). Esto se basa en el principio de obtención de la cal donde la descomposición térmica de materiales como la piedra caliza (calcita, CaCO₃) al calentarla arriba de 825°C, se

³⁵ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

³⁶ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

descompone en CaO y CO₂ este proceso se llama *quemado de cal* y es un proceso reversible³⁷.

2.9.2 Fertilizando con efluente digerido (bioabono)

Debido a métodos de agricultura intensificados, e.g., intervalos abreviados de no cultivación en terrenos. Una forma de propuesta de fertilización orgánica, incluyendo el uso de efluente digerido como fertilizante, sería particularmente útil a manera de mantener la fertilidad de los suelos.

Modificaciones al sustrato inducidas por la fermentación

x La digestión anaeróbica sustrae carbono, hidrogeno y oxigeno del sustrato. Los nutrientes esenciales de la planta (N, P, K, ver tabla 14) se mantienen. La composición de agentes fertilizantes en el sustrato digerido depende de la materia prima usada y por lo tanto puede ser manipulada dentro de ciertos límites.

Tabla 14. Concentración de nutrientes en efluente digerido de varios sustratos

Tipo de sustrato	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	% TS				
Excretas de vaca	2.3 - 4.7	0.9 - 2.1	4.2 - 7.6	1.0 - 4.2	0.6 - 1.1
Excretas de cerdo	4.1 - 8.4	2.6 - 6.9	1.6 - 5.1	2.5 - 5.7	0.8 - 1.1
Excretas de pollo	4.3 - 9.5	2.8 - 8.1	2.1 - 5.3	7.3 - 13.2	1.1 - 1.6

Fuente: OEKOTOP, compilación de varias fuentes.

x La fermentación reduce la relación C/N removiendo algo del carbono, lo cual tiene la ventaja de incrementar el efecto fertilizante. Otro efecto favorable es que el nitrógeno original del sustrato se mineraliza, haciéndolo mas disponible a las plantas.

x La digestión anaeróbica elimina o desactiva patógenos, sin embargo este efecto no puede ser referido como una higienización (tabla 15).

³⁷ Merck Index of chemicals and Drugs, 1650 , 9th ed. monograph

Tabla 15. Tiempo de supervivencia de patógenos en plantas de biogás

Bacteria	F. Termofilica (53-55 °C)		F. Mesofilica (35-37°C)		F. Psicrofilica(8-25°C)	
	Fatalidad		Fatalidad		Fatalidad	
	días	Tasa (%)	días	Tasa (%)	días	Tasa (%)
Salmonella	1-2	100	7	100	44	100
Shigella	1	100	5	100	30	100
Polivirus	-	-	9	100		
Schistosoma	horas	100	7	100	7-22	100
Gusano de Hook	1	100	10	100	30	90
Ascaris	2	100	36	98.8	100	53
Colititre	2	$10^{-1} \pm 10^{-2}$	21	10^{-4}	40-60	$10^{-5} \pm 10^{-4}$

Fuente: Anaerobic digestión 1985

2.9.2.1 Almacenamiento y aplicación del efluente digerido

Para la retención de la calidad fertilizante del efluente digerido, este debe ser almacenado solamente por corto tiempo en forma líquida en un tanque cerrado y luego ser aplicado a los campos. El almacenamiento líquido involucra cierta pérdida de nitrógeno debido a la evaporación de amoníaco. Por esa razón, y para limitar el tamaño del depósito de almacenamiento, el periodo de almacenamiento deberá ser limitado de 2 a 4 semanas.

La práctica de esparcimiento de efluente digerido también presenta problemas ya que no solo requiere de tanques de almacenamiento, sino también recipientes de transporte, la cantidad de trabajo involucrado depende en parte en cuán lejos el efluente digerido tiene que ser transportado.

Si por razones de economía y eficiencia, la fertilización con efluente líquido es impráctica, el efluente puede ser mezclado con material verde y compostado. Esto involucraría pérdidas de nitrógeno de aproximadamente 30-70%. El composte final será suelo húmedo, compacto y más fácil de transportar.³⁸

³⁸ U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., "Biogás plants in Animal Husbandry", 1989, GTZ, 153 Pág.

2.9.3 Características principales de la combustión de biogás

La característica más destacada de la combustión del biogás en quemadores es la ascension de la llama. La llama se separa totalmente de la abertura del gas y luego se extingue. Esto se debe a las características de los principales componentes de la mezcla (CH_4 y CO_2). La velocidad de la llama de CH_4 es muy reducida.

Requisitos técnicos para quemadores de Biogás

- a) La carga calórica de los quemadores debe satisfacer los regimenes de utilización.
- b) Buena estabilidad de encendido, deben compensar las variaciones en la composición del gas y variaciones de presión en un rango aceptable (0.5 a 1.5 veces la presión de diseño)³⁹.
- c) Eficiencia térmica, combustión completa del gas
- d) Resistencia al viento, estructura de construcción simple, fácil manufactura, larga duración, utilidad y seguridad.

2.9.3.1 Densidad del biogás

Es el peso del mismo por unidad de volumen en estado estandar. Puede ser calculado:

$$\rho = \sum x_i \cdot \rho_i$$

Donde : ρ : densidad del biogás (kg/m^3)

x_i : cantidad de cada gas componente (fracción)

ρ_i : densidad de cada componente del biogás(Kg/m^3)

2.9.3.2 Valor calorífico del biogás

Corresponde al valor calorífico liberado por la combustión total de una unidad de volumen de biogás. En un mismo digestor este valor cambia con la temperatura del digestor, composición y proporción de materia prima. Se calcula apartir de la expresión:

³⁹ Curso de capacitación, “Reciclaje de materias orgánicas y biogás, una experiencia en China”, Sep.-Oct. 1984, Chengdu, China, Pág. 25

$$Q = \sum x_i * Q_i$$

Donde: Q: valor calorífico del biogás (Kcal/m³)
 x_i: cantidad de cada combustible componente (fracción)
 Q_i: Valor calorífico de cada componente del biogás (Kcal /m³)

2.9.3.3 Demanda teórica de aire del biogás

Es la cantidad de aire que necesita 1m³ de biogás para su combustión total.

Puede ser calculada: $G_{a/c} = \sum x_i * G_i$

Donde: G_{a/c}: demanda teórica de aire del biogás (m³ aire / m³ biogás)
 x_i: cantidad de cada combustible componente (fracción)
 G_i: demanda teórica de aire de cada componente(m³ aire / m³gas)

2.9.3.4 Presión

La presión del gas aumenta con el aumento de su producción. La presión depende del tamaño del gasómetro utilizado. En un gasómetro de pequeñas dimensiones la variación será mayor que en un gasómetro de grandes dimensiones.

2.9.3.5 Carga calórica del quemador

Es la cantidad de calor liberada por el quemador por unidad de tiempo (Kcal/hr).

Puede calcularse como: $I = \frac{K * W * C * (T_2 - T_1)}{K * t}$

Donde : I: Carga calórica del quemador (Kcal/hr)
 K: Coeficiente de seguridad (1.3 a 1.4)
 W: Peso del material calentado (Kg.)
 C: Calor específico del material calentado (Kcal/kg°C)
 T₁,T₂: Temperatura inicial y final del material calentado (°C)
 A: Tiempo necesario para la elevación de la temperatura
 η: Eficiencia calorífica del quemador

2.9.3.6 Eficiencia calorífica

Es el porcentaje de calor que se utiliza eficientemente en relación con el liberado por la combustión del biogás. Es la eficiencia conjunta del proceso de combustión y transmisión de calor. Es también un índice económico importante que permite

medir la eficiencia en la utilización del calor proporcionado por el quemador. La comparación de eficiencia calorífica entre dos quemadores debe de hacerse en condiciones similares y de manera uniforme.

2.9.3.7 Coeficiente de aire primario del quemador

Es la relación entre el suministro de aire primario y la demanda teórica de aire. El aire primario es el que se mezcla con el biogás previo a la combustión, la otra parte del aire es proporcionada por la atmósfera circundante en la combustión. Se

denota como:
$$D = \frac{\text{suministro_de_aire_primario}}{\text{demanda_teorica_de_aire}}$$

2.9.4 Tipos de quemadores de Biogás

2.9.4.1 Quemador de tipo difusivo

En este no es necesaria la mezcla de aire con gas antes de la combustión, por lo que su coeficiente primario $\alpha = 0$. El aire necesario para la combustión es proporcionado por aire secundario, que se mezcla durante la combustión.

Este tiene como desventajas la combustión incompleta, baja eficiencia calorífica, baja temperatura de la llama y una gran cantidad de material tóxico en gas de escape. Es inapropiado para uso doméstico.

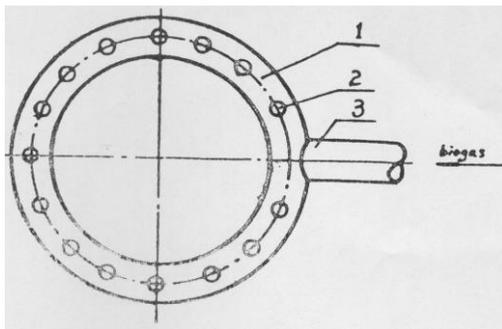


Ilustración 13. Estructura esquemática de un quemador tipo difusivo.

1. Tubo anular, 2. Agujeros para la llama, 3. Toma de biogás.

Fuente: Chengdu, China 1984

A cierta presión el biogás escapa a través de los agujeros y se quema. La combustión es asistida por la difusión de aire en el biogás.

2.9.4.2 Quemador de tipo atmosférico

A este tipo de quemador se le llama también quemador Bunsen. Antes de la combustión una cierta cantidad de aire se mezcla con el biogás; es decir, el coeficiente de aire primario es mayor que cero, aunque menor que la unidad. La

mezcla puede realizarse ya sea con un fuelle mecánico o utilizando la presión propia del gas (inyección natural).

Comparado con el quemador de tipo difusivo, este tiene la ventaja de una combustión relativamente completa, debido a la mezcla previo de biogás y aire. En el gas de escape hay menor cantidad de material tóxico, la llama es mas corta y potente, su temperatura es más alta y se obtiene una mayor eficiencia calorífica. Este quemador es adecuado para cocinas, calentadores de agua y pequeñas calderas.

Su estructura es relativamente más complicada que la del quemador de tipo difusivo.

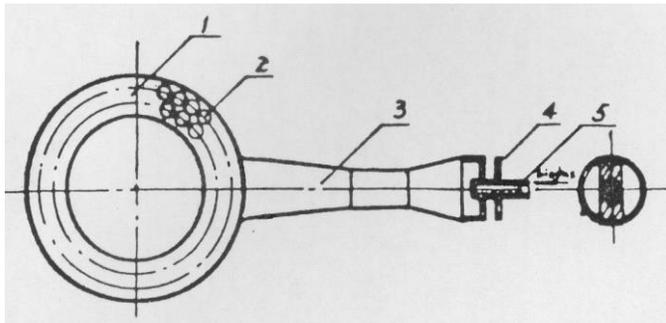


Ilustración 14. Estructura de un quemador atmosférico.

1. cabeza, 2. agujeros para la llama, 3. inyector, 4. ahogue, 5. boquilla.

Fuente: Chengdu, China 1984

El biogás llega a la boquilla a través de un conducto, y sometido a cierta presión, atraviesa rápidamente la boquilla y se introduce al inyector arrastrando a su interior simultáneamente y por su propia fuerza el aire primario requerido. El biogás se mezcla completamente con el aire en el inyector; luego fluye a través de los agujeros (2, ilustración 14) y se enciende. La proporción de aire primario puede ser modificada accionando el ahogue.

En nuestra investigación se trabajará con este tipo de quemador, puesto que esta disponible en los laboratorios de química de la UDB.

2.10 Lugares de obtención de materia prima

Para la obtención de materia prima se han elegido 3 lugares: Rastro municipal de Mejicanos, Rastro municipal de Soyapango, Avícola Salvadoreña. Las características tomadas en cuenta para la selección de un lugar de obtención fueron:

- a) Colaboración de las autoridades del lugar para donar las excretas

- b) Tipos de excretas (e.g., vaca, cerdo, pollo)
- c) Calidad de las excretas (e.g., ST, SV)
- d) Localización geográfica con respecto a la UDB

2.10.1 Rastro Municipal de Mejicanos

Colaboración de las autoridades

Se cuenta con la colaboración de los encargados del Rastro. La cantidad de excretas que afirman pueden donar es en cantidades industriales.

Tipos de excretas

Según datos obtenidos del encargado del lugar, en promedio una vez al día matan entre 15 a 18 vacas, el día pico de la semana es el viernes con un número máximo de 40 vacas. El estómago (rumen) de las vacas es abierto y el material digerido es colocado en recipientes (ver ilustración 15, a y b). La matanza de cerdos, según el encargado, es de 114 a 200 cerdos en el día pico (miércoles por la madrugada).

Ilustración 15. a) Contenedor donde son depositadas las excretas de vaca y de cerdo. Rastro de Mejicanos. b) Abertura de rumen (estómago) de vaca



(a)



(b)

Fuente: grupo de tesis Biodigestor UDB 2006.

Por las visitas de campo realizadas al lugar y por datos proporcionados por el encargado, el volumen de material digerido producido al día es igual al volumen del contenedor. El volumen calculado a partir de las medidas tomadas fue de 3m³. En dicho recipiente es colocado material digerido de vaca y de cerdo. Los intestinos de los cerdos no son abiertos debido al mal olor. Esto dificultaría su transporte ya que no podrían ser bombeados sin antes sacarlos de los intestinos.

Calidad de las excretas

Su calidad se midió a partir de la cantidad de sólidos volátiles encontrados en las muestras tomadas. Se tomaron muestras de excretas de cerdo y de vaca, que fueron tomadas del recipiente de la ilustración 15a. Fueron manipuladas con el cuidado de no mezclarlas. Se midió el peso de cada muestra fresca con una balanza de la marca Carrington para uso de cocina. Luego de identificarlas fueron puestas a secar al sol durante 3 días. Después de tres días el contenido de agua en las excretas se evaporó, esto fue constatado con la obtención de un valor constante de peso en las mediciones al tercer día. Una vez pasado este tiempo se expusieron las excretas a alta temperatura por medio de brasas, para eliminar el contenido de sólidos volátiles en el material sólido (ver ilustración 16).

La exposición de las excretas a las brasas duro hasta que en los recipientes ya solo quedara ceniza. El tiempo aproximado del proceso de quemado fue de 45 minutos. Con el peso de la muestra ya quemada se obtuvo el valor de ST y SV a partir de las fórmulas:

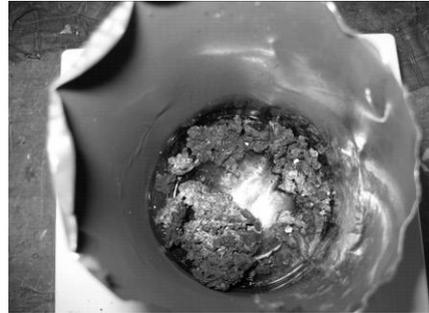
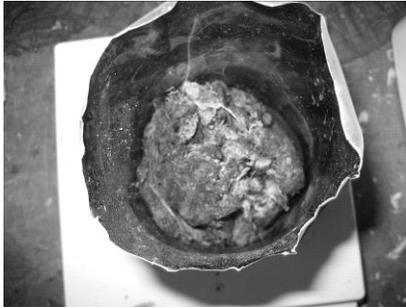
$$\%ST = \frac{\text{masa_del_sustrato_seco(sin_quemarlo)}}{\text{masa_del_sustrato_fresco} + \text{masa_de_agua_a_agregar}} \times 100\%$$

$$\%SV = \frac{\text{masa_del_sustrato_seco} - \text{masa_del_sustrato_despues_de_quemado}}{\text{masa_del_sustrato_fresco}} \times 100\%$$

El %SV puede ser trabajado con respecto a la masa de sustrato seco en el denominador o con respecto a la masa del sustrato fresco. En el caso de nuestra investigación se trabajo con ambas opciones, a la masa seca por lo que se obtuvieron unidades de (gr. SV/ gr. ST) y a la masa de las excretas frescas.

Ilustración 16. Muestras del Rastro de mejicanos después de ser expuestas a alta temperatura.

Izquierda excretas de vaca, Derecha excretas de cerdo.



Fuente: grupo de tesis Biodigestor UDB 2006.

Los resultados del análisis realizado se resumen en los cuadros a continuación.

Tabla 16. Resultados de análisis de excretas de vaca, Mejicanos

Estado	Masa de la Muestra (gr.)
Fresca	179
Seca	111
quemada	21,82
SV(gr. SV/ gr. sustrato)	0.498
SV(gr.SV/gr.ST)	0.803
% ST	20,67%

%ST en muestra con proporción agua-excretas de 2:1

Fuente: Recurso propio

Tabla 17. Resultados de análisis de excretas de cerdo, Mejicanos

Estado	Masa de la Muestra (gr.)
Fresca	55,7
Seca	19,3
Quemada	2,63
SV(gr. SV/gr. sustrato)	0,299
SV(gr.SV/gr,ST)	0.849
%ST	11,55%

% ST en muestra con proporción de agua-excretas de 2:1

Fuente: Recurso propio

Localización geográfica

El Rastro municipal de Mejicanos y el campus de la UDB se encuentran a una distancia aproximada en vehículo de 10km. La localización del local del rastro dentro del municipio de mejicanos como también respecto de la UDB se muestra en el plano anexo 1.

2.10.2 Rastro Municipal de Soyapango

Colaboración de las autoridades

Se cuenta con la colaboración de las autoridades del Rastro, para la obtención de excretas de vaca. En la actualidad el rastro paga a MIDES S.A de C.V. para que las excretas pasen a disposición final en el relleno sanitario de Nejapa

Tipos de excretas

Según datos obtenidos del encargado del lugar en promedio una vez al día matan entre 30 a 60 vacas. Por la visita de campo realizada al lugar y por datos proporcionados por el encargado, el volumen de material digerido producido al día es igual al volumen del contenedor. El volumen calculado a partir de las medidas de campo tomadas fue de 5m³. En la pileta es colocado material digerido de vaca (no fue permitido la toma de fotografías).

Calidad de las excretas

Se tomaron muestras de excretas de vaca y siguiendo el mismo procedimiento utilizado para quemar las muestras del rastro de Mejicanos se obtuvo lo siguiente (ver ilustración 17 y tabla 18).

Ilustración 17. Muestras del Rastro de Soyapango después de ser expuestas a alta temperatura.

Fuente: Recurso propio



Los resultados del análisis realizado se resumen en el cuadro a continuación.

Tabla 18. Resultados de análisis de excretas de vaca, Soyapango

Estado	Masa de la muestra(gr.)
Fresca	179
Seca	39
Quemada	11.9
SV(gr SV/ gr. sustrato)	0.151
SV (gr. SV/gr. ST)	0.694
% ST	7.26%
%ST en muestra con proporción agua-excretas de 2:1	

Fuente: Recurso propio

Localización geográfica

La distancia desde el campus de la UDB al local del rastro es de aproximadamente 4 km. La localización dentro del municipio de Soyapango se aprecia en el plano anexo 1.

2.10.3 AVICOLA SALVADOREÑA S.A. DE S.V

Colaboración de las autoridades

Se cuenta con la colaboración de las autoridades de la empresa. La cantidad de excretas que se generan por sus granjas es del orden de toneladas.

Tipos de excretas

Esta empresa se especializa en la fabricación de productos avícolas. Las excretas generadas son conocidas como pollinaza. Las cantidades manejadas por la empresa se encuentran en el orden de las toneladas y no esta cuantificada su producción a nivel general. Durante la visita de campo a una granja de pollos no fue permitida la toma de fotografías.

Calidad de las excretas

Al tomar muestras de excretas de pollo (pollinaza), y siguiendo el procedimiento utilizado en los casos anteriores, se obtuvo lo siguiente (ver ilustración 18 y tabla 19).

Ilustración 18 Muestras de pollinaza después de ser expuestas a alta temperatura.

Fuente: Recursos propio



Tabla 19. Resultados de análisis de excretas de pollo (pollinaza), AVICOLA SALVADOREÑA.

Estado	M. muestra(gr.)
Fresca	26
Seca	26
Quemada	4,5
SV(gr. SV/ gr. sustrato)	0,823
SV(gr. SV/ gr. ST)	0.823
% ST	33,33%

| %ST en muestra con proporción agua-excretas de 2:1 |
Fuente: Recurso propio

Localización Geográfica

La granja de donde provendrán las excretas esta en disposición de la empresa, por ende para este apartado no se proveerá ningún plano de referencia entre la granja y el campus de la UDB.

CAPITULO 3: Diseño del Biodigestor

3.0 Metodología empleada

El diseño se divide en las siguientes secciones:

- a) Determinación de carga volumétrica de sustrato al digestor, Tiempo de retención, Volumen del digestor, generación de biogás (proyección), volumen de gasómetro;
- b) Diseño, selección de elementos y cálculos de esfuerzos en la cámara de digestión (estructura 1);
- c) Diseño, selección de elementos y cálculos de esfuerzos en la base que soportara el digestor(estructura 2);
- d) Diseño, selección de elementos y cálculos de esfuerzos en la base que soportara la pileta de carga(estructura 3);

3.1 Carga y descarga de sustrato

La primera carga se realizara con excretas de vaca, el sustrato tendrá un contenido de sólidos de 10%. El volumen de sustrato(V_s) es el 70% del volumen del digestor (V_d), la relación de excretas y agua será de 1:1. El tiempo de retención (TR) elegido es de 24 días. Después de este tiempo se iniciara a cargar diariamente el digestor (V_c) con la respectiva descarga de un volumen igual al añadido. Los cálculos a continuación pueden ser encontrados en el anexo 2:

Densidad relativa de excretas = 1.1

$T_{\text{promedio}} = 31^{\circ}\text{C}$

$V_d = 2.5 \text{ m}^3$ (valor propuesto para nuestro proyecto)

$V_s = 0.7 * V_d = 1.75 \text{ m}^3$ o 1750 lt

$V_{\text{estiercol}} = 0.5 V_s = 0.875 \text{ m}^3$ o 875 lt

$V_{\text{agua}} = 0.875 \text{ m}^3$ o 875 lt

3.1.1 Tiempo de retención TR

Para obtener un tiempo de retención de 24 días la carga diaria de sustrato añadida (S_d) al digestor de 2.5 m³ debe ser:

$$S_d = V_s / TR = 1.75 \text{ m}^3 / 24 \text{ días} * 1000 = 72.91 \text{ lt/día}$$

Para obtener un contenido de sólidos totales de 10% en el sustrato la cantidad de excretas frescas y agua en la carga volumétrica (V_c) debe ser calculada de acuerdo al apartado 3.1.2.

3.1.2 Carga volumétrica (V_c)⁴⁰

Con datos obtenidos de las tablas 16 a 19 del capítulo 2 se obtiene

Rastro mejicanos excretas de vaca

$$ST\% = 20.67 \%$$

$$V_c = (ST\% \text{ (elegido 10\%)} \times S_d) / ST\% \text{ (de cada sustrato)} + \text{(restante volumen de agua)}$$

$$V_c = (0.10 * 72.91 \text{ lt/día}) / 0.2067 = 35.27 \text{ lt/día (38.8 kg /día) de excretas} \\ + 37.64 \text{ lt/día (37.64 kg/día) de agua}$$

Rastro de Mejicanos excretas de cerdo

$$ST\% = 11.55 \%$$

$$V_c = (0.10 * 72.91 \text{ lt/día}) / 0.1155 = 63.12 \text{ lt/día (69.43 kg/día) de excretas} \\ + 9.79 \text{ lt/día (9.79 kg/día) de agua}$$

Rastro de Soyapango excretas de vaca

$$ST\% = 7.26 \%$$

$$V_c = 72.91 \text{ kg de excretas ya que su contenido de ST esta por debajo del 10\% de ST.}$$

Avícola Salvadoreña, Pollinaza

$$ST\% = 33.33 \%$$

$$V_c = (0.10 * 72.91 \text{ lt/día}) / 0.333 = 21.87 \text{ lt/día (24.06 kg/día) de excretas} \\ + 51.04 \text{ lt/día (51.04 kg/día) de agua}$$

⁴⁰ Fórmulas obtenidas de publicación: Management and utilization of biodigesters in integrated farming systems, San Thy, University of Tropical Agriculture Foundation Chamcar Daung, PO Box 2423, Phnom Penh 3, Cambodia.

3.1.3 Carga del digestor (C_d)⁴¹

Asumiendo un valor máximo de carga de Sólidos Volátiles (SV) 1.5 Kg. SV/m³x día. Para un volumen de digestor de 2.5m³ y un tiempo de retención de 24 días, y con valores obtenidos de tablas 16 a 19 del capítulo 2, se tiene:

Rastro mejicanos excretas de vaca

Contenido de sólidos 20.67%, contenido de sólidos volátiles 0.498 gr.SV/gr.sustrato. Carga diaria excretas de 38.8 kg/día

$$C_d = V_c \times ST\% \text{ (fracción)} \times SV / V_d \quad \text{COLOCAR BIBLIOGRAFIA}$$

$$C_d = (38.8 \text{ kg/día}) \times 0.2067 \times 0.498 / (2.5 \text{ m}^3) = 1.59 \text{ kg. SV/m}^3 \times \text{día}$$

Rastro de Mejicanos excretas de cerdo

Contenido de sólidos 11.55%, contenido de sólidos volátiles de 0.299 gr.SV/gr.sustrato. Carga diaria excretas de 69.43 kg/día.

$$C_d = (69.43 \text{ kg/día}) \times 0.1155 \times 0.299 / 2.5 \text{ m}^3 = 0.96 \text{ kg SV/m}^3 \times \text{día}$$

Rastro de Soyapango excretas de vaca

Contenido de sólidos de 7.26%, sólidos volátiles 0.151 gr.SV/gr.sustrato. Carga diaria excretas de 72.91 kg/día

$$C_d = (72.91 \text{ kg} \times 0.0726 \times 0.151) / 2.5 \text{ m}^3 = 0.32 \text{ kg SV/m}^3 \times \text{día}$$

Avícola Salvadoreña, Pollinaza

Contenido de sólidos 33.33%, contenido de sólidos volátiles 0.823 gr.SV/gr.sustrato. Carga diaria de excretas de 24.06 kg/día.

$$C_d = (24.06 \text{ kg/día}) \times 0.3333 \times 0.823 / 2.5 = 2.64 \text{ kg. SV/m}^3 \times \text{día}$$

Este valor cumple con el 10% ST pero se encuentra por encima del valor límite de 1.5 Kg. SV/m³x día, debido a esto, la carga del digestor (C_d) debe ser calculada nuevamente para un %ST de 5% y así cumplir con el límite superior de 1.5 SV/m³x día (V_c).

$$V_c = (0.05 \times 72.91 \text{ lt/día}) / 0.333 = 10.94 \text{ lt/día (12.03 kg/día) de excretas} \\ + 61.97 \text{ lt/día (61.97 kg/día) de agua}$$

⁴¹ Fórmulas obtenidas de publicación: Management and utilization of biodigesters in integrated farming systems, San Thy, University of Tropical Agriculture Foundation
Chamcar Daung, PO Box 2423, Phnom Penh 3, Cambodia.

$$\text{Carga digestor } (C_d) = (12.03 \text{ kg/día}) * 0.333 * 0.823 / 2.5 = 1.31 \text{ kg SV} / \text{m}^3\text{día}$$

Tabla 20. Resumen de parámetros de los sustratos a utilizar.

Lugar	Tipo Excretas	Carga volumetrica V _c (kg/día)		Carga digestor C _d (Kg SV/m ³ día)	Sólidos Totales ST (%)
		Agua	Excretas		
Rastro Mejicanos	Vaca	37.64	38.8	1.59	20.67
	Cerdo	9.79	69.43	0.96	11.55
Rastro Soyapango	Vaca	--	72.91	0.32	8.00
Avícola Salvadoreña	Pollinaza	61.97	12.03	1.31	33.33

Fuente: Recursos propios

3.1.4 Volumen del digestor

El dimensionamiento de la planta de biogás depende de la cantidad, calidad y tipo de biomasa disponible, así como también de la temperatura de digestión.

- La temperatura promedio de 31°C es el valor promedio al que se mantiene un sustrato en proceso de digestión (anexo 2).
- Tiempo de retención elegido = 24 días (31°C y $f_{T,RT}=1$ de ilustración 9 capítulo 2)
- Adición de sustrato = Biomasa (volumen) + agua (volumen) = 72.91 lt
- Contenido total de sólidos del digestor de 10%

El volumen del digestor se calcula por medio de la fórmula:

$$\begin{aligned} V_d &= \text{Adición de sustrato} * \text{TR (días)} \\ &= 72.91 * 24 = 1749.84 \text{ lt o } \underline{\underline{1.75 \text{ m}^3}} \end{aligned}$$

En nuestro proyecto este valor (1.75m³) es el elegido para el volumen de sustrato que equivale aproximadamente al 70% del volumen de la cámara de digestión, el volumen de la cámara de digestión será de 2.5 m³. El calculo anterior afirma la valides de asumir un volumen digerido del 70% del volumen total del digestor.

3.1.5 Generación diaria de biogás (G)

La cantidad de biogás generado cada día (G, m³ gas/día), se calcula tomando como base G_e (Generación específica) del sustrato y la adición diaria de este (S_d). La generación diaria (G) se calcula mediante la ecuación:

$$G = C_d * G_e \text{ (específico de cada sustrato, tabla 10 capítulo 2)}$$

Para cada sustrato a evaluar se tiene:

Rastro de Mejicanos

Vaca

$$G = (1.59 \text{ kg.SV/m}^3 \times \text{día}) * 250 \text{ lt.gas/kg SV} = 397.5 \text{ lt gas /día}$$

Cerdo

$$G = (0.96 \text{ kg.SV/m}^3 \times \text{día}) * 450 \text{ lt. gas /kg SV} = 432 \text{ lt gas /día}$$

Rastro de Soyapango

Vaca

$$G = (0.32 \text{ kg.SV/m}^3 \times \text{día}) * 250 \text{ lt. gas/ kg SV} = 80 \text{ lt gas/día}$$

Avícola Salvadoreña

Pollinaza

$$G = (1.31 \text{ kg.SV/m}^3 \times \text{día}) * 460 \text{ lt. gas /kg SV} = 602.6 \text{ lt gas /día}$$

Tabla 21. Generación diaria de biogás (proyecciones)

Lugar	Tipo excretas	Generación diaria (lt/día)
Rastro mejicanos	Vaca	397.5
	Cerdo	432
Rastro Soyapango	Vaca	80
Avicola Salvadoreña	pollinaza	602.6

Fuente: recursos propios

3.1.6 Producción específica de biogás (P_e)

Esta es calculada de acuerdo a la expresión:

$$P_e = G_e \text{ (generación específica) } / V_d \text{ (volumen del digestor)}$$

Para los sustratos a evaluar se tiene:

Rastro de Mejicanos

Vaca

$$P_e = (397.5 \text{ lt gas /día}) / 2500 \text{ lt} = 0.159 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Cerdo

$$P_e = (432 \text{ lt gas /día}) / 2500 \text{ lt} = 0.172 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Rastro de Soyapango

Vaca

$$P_e = (80 \text{ lt gas/día}) / 2500 \text{ lt} = 0.032 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Avícola Salvadoreña

Pollinaza

$$P_e = (602.6 \text{ lt gas /día}) / 2500 \text{ lt.} = 0.241 \text{ lt gas/lt digestor x día}$$

Tabla 22. Producción específica de biogás (proyecciones)

Lugar	Tipo excretas	Producción específica (lt gas/lt digestor x día)
Rastro mejicanos	Vaca	0.159
	Cerdo	0.172
Rastro Soyapango	Vaca	0.032
Avicola Salvadoreña	pollinaza	0.241

Fuente: recursos propios

Con los datos de las tablas 21 y 22, se observa que el gas generado en nuestro biodigestor puede ser utilizado para las siguientes aplicaciones (tabla 23, 24 y 25):

Tabla 23. Consumo de biogás para uso en cocina

Cocina	Frijol 1 lb.	Arroz 1 lb.	Maíz 1 lb.	Tortillas 1 lb.	Carne (caldo) 1 lb.	Café 1 lt.	4 huevos fritos	3 comidas/ 5 personas
Consumo (litros de biogás)	500	175	269	300	400	125	30	2000

Fuente: ICATI, Hoja de datos técnicos No.100

Tabla 24. Consumo de biogás para uso en diferente maquinaria

Equipo	Quemador estufa 8cm.	Quemador estrella comal	Lámpara camisa 25 watt	Motor gasol. 3hp	Motor diesel 7hp 50/50	Refrigerador 8ft ³	Generador por kw
Consumo (litros de biogás/hr.)	500	175	269	300	400	125	30

Fuente: ICATI, Hoja de datos técnicos No.100

Tabla 25. Energía producida por biogás, obtenido de distintos desechos animales

Desecho(1)	Dilución (2)	Rendimiento (3)	Energía (4)
Bovino (300kg)	1:1	0.025	133.37
Porcino (100 kg)	1:1	0.05	266.75
Aviar (2kg)	1:2	0.06	320.10
Humano (70kg)	1:1	0.04	213.4

- (1) Se indica peso de cada animal
- (2) Dilución desecho fresco/agua
- (3) m³ biogás/kg estiércol fresco
- (4) kcal /kg estiércol fresco

Fuente: ICATI, Hoja de datos técnicos No.100

3.1.7 Dimensionamiento del gasómetro

El volumen del gasómetro (V_g), depende de las tasas relativas de generación y consumo de biogás. El gasómetro debe estar dimensionado para:

- a) Cubrir la tasa pico de consumo de biogás (V_{g1})
- b) Almacenar el gas producido durante los periodos mas largos de no consumo (V_{g2}).

Las anteriores se definen así:

$$V_{g1} = g_{c,max} \times t_{c,max} = V_{c,max}$$

$$V_{g2} = G \times t_{z,max}$$

Donde: $g_{c, \max}$ = consume máximo de gas por hora (lt/hr)
 $t_{c, \max}$ = tiempo de consumo máximo (h)
 $V_{c, \max}$ = consumo máximo de biogás
G= producción de gas (lt/hr)
 $t_{z, \max}$ = tiempo máximo de cero consumo (h)

El mayor valor de V_g (V_{g1} o V_{g2}) determinara el volumen del gasómetro. Un margen de seguridad de 10-20% deberá ser añadido. Experiencia práctica muestra que normalmente debe ser almacenado entre 40-60% de la producción diaria de gas. La razón volumen de digester al volumen del gasómetro (V_d / V_g) es un factor principal con relación al diseño básico de la planta de biogás. Para una planta típica de biogás agrícola, esta razón esta entre los valores de 3/1 y 10/1, dándose frecuentemente los valores de 5/1 y 6/1.⁴²

a) Para el consumo pico de biogás. Asumiendo que se consuman 600 lt/hr (pollinaza) durante 2 hr, se tiene:

$$V_{g1} = 600 \times 2 = 1200 \text{lt o } 1.2 \text{ m}^3$$

b) Con un tiempo de almacenamiento de 3 días, y una producción diaria de gas de 432 lt/diarios (excretas de cerdo, Rastro mejicanos)

$$V_{g2} = 600 \times 3 \text{ días} = 1800 \text{ lt o } 1.8 \text{m}^3$$

Asumiendo un factor de seguridad del 50% y tomando el valor obtenido en el literal “b” anterior se obtiene el volumen del gasómetro plástico:

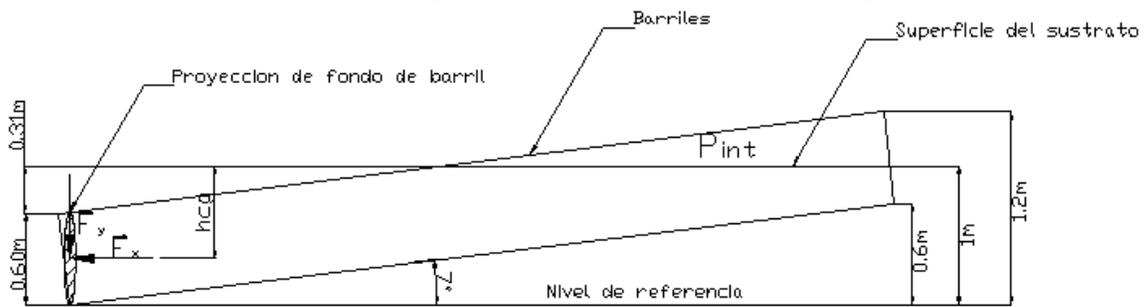
$$V_g = 1.5 * 1.8 = 2.7 \text{ m}^3 \text{ volumen del gasómetro plástico}$$

3.2 Esfuerzos de la cámara de digestión (estructura 1)

Calculando la presión a la cual están sometidas las paredes del cilindro de barriles, el punto mas critico esta ubicado en la cara del fondo de la fila de barriles.

⁴² U. Werner, Ulrich S., Nicolai H., “Biogás plants in Animal Husbandry”, 1989, GTZ, 153 Pág.

Ilustración 19. Diagrama de cuerpo libre, Camara de digestion



Datos:

$$P_{int} = 20 \text{ psi o } 136 \text{ kPa}$$

$\gamma_{sustrato} = 21.56 \text{ kN/m}^3$ Densidad de excretas de cerdo obtenido de mediciones, sin contenido de agua.

Los cálculos sobre los parámetros de fuerza se muestran paso a paso en el anexo 3, de donde se obtuvo:

$$F_y = 11.78 \text{ kN o } 2648 \text{ lbf} \quad F_x = 43.8 \text{ kN o } 9839 \text{ lbf}$$

La resultante sobre la pared inferior del barril es:

$$R = 45.35 \text{ kN o } 10189 \text{ lbf} \quad \text{a un ángulo de } 15.06^\circ \text{ con respecto a la horizontal}$$

Por simplicidad se asumirá que la resultante actúa en el centro de gravedad de la pared del barril. Para evitar que la pared del fondo se vuelva concava con la presión, se añadirá lamina de 1/8" sobre toda la pared.

3.2.1 Esfuerzos en las paredes del barril

El esfuerzo longitudinal en la pared cilíndrica del barril es:

$$1_n = 9.71 \text{ MPa o } 1409 \text{ psi}$$

El esfuerzo tangencial en las paredes del barril esta definido por:

$$1_t = 4.85 \text{ MPa o } 704 \text{ psi}$$

La selección del barril se hace en base a que este soporte una presión hidrostática mayor a 138kPa (20 psi), un grosor de pared igual o mayor a 1.4 mm y que esté diseñado para trabajar con líquidos con una densidad relativa mayor a 2. Por lo que la denominación del barril a utilizar es:

UN IA2 /Y2.2/230/00/USA/M1234/1.4/1/1.4

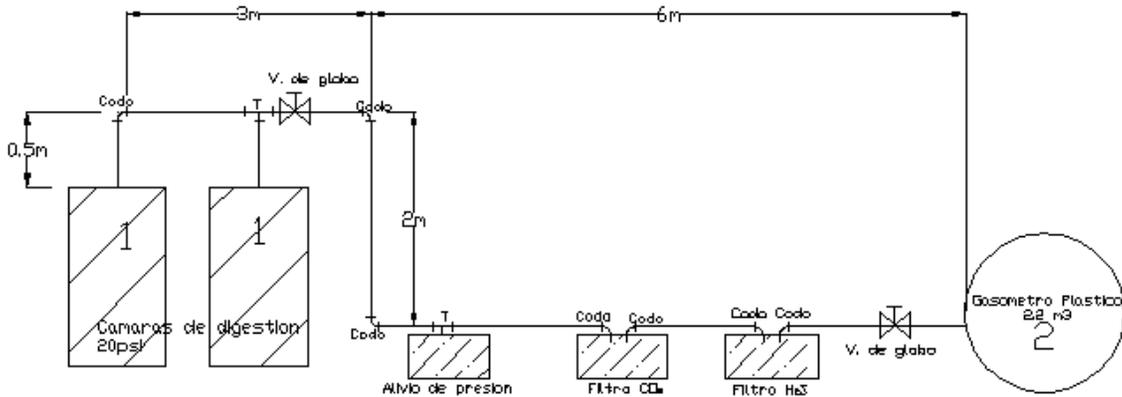
Donde:

UN: Naciones Unidas

I: Barril metálico

A: acero

Ilustración 21. diagrama de tubería de biogás

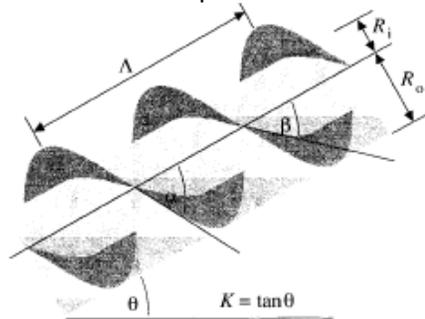


Según la ilustración 21 el número de elementos entre el digestor y el gasómetro son: 2T, 7 codos a 90°, 2 válvulas de globo. Todos los elementos y la tubería serán de PVC para evitar la corrosión provocada por el ácido sulfídrico (H₂S) contenido en el biogás. El diámetro de la tubería será de 3.81cm (1.5”).

3.2.4 Agitador

Para optimizar el proceso de digestión se utilizará un tornillo de Arquímedes (tornillo sin fin) como medio de agitación y de transporte para el sustrato. Su principio de funcionamiento se explica en la ilustración 22.

Ilustración 22. Vista de perfil de un tornillo de Arquímedes de dos hélices



Fuente: Rorres C. 2000

La figura anterior muestra como las cubetas (volumen transportado por cada hélice) son formadas entre pares adyacentes de hélices. Las cubetas se mueven hacia arriba del tornillo en la medida que este es rotado en sentido horario visto desde el reservorio superior. Los bordes internos y externos de cada hélice determinan dos curvas senoidales del mismo periodo. Una tiene una amplitud

igual al radio interno (Ri) y la otra tiene una amplitud igual al radio externo (Ro). El ángulo que el tornillo forma con la horizontal determina la pendiente $K = \tan \theta$.⁴³

Debido a limitaciones financieras el tornillo no será fabricado según nuestro diseño específico, sino que será adquirido en una chatarrera cercana al campus de la UDB. Los parámetros que determinan la geometría del tornillo a nuestra disposición son (según ilustración 22):

Ro = Radio externo del tornillo (7.25 cm o 2.75 “)

L = longitud total del tornillo (3.5 m)

K = pendiente del tornillo (12% o 7°)

Ri = radio interno del eje del tornillo (2.12 cm o 7/8”)

Λ = paso de un tornillo (20 cm o 7.87”)

N = número de hélices (1)

β = ángulo formado entre la curva sinusoidal definida por el borde interno de la hélice y el eje del tornillo (35°)

Volumen de una cubeta⁴⁴

El volumen óptimo (m³) transportado por una cubeta esta definido por:

$$V_T = \frac{\rho \lambda^2 R_o^3}{K} \cdot \Omega(N, U, \rho)$$

Donde: λ : Relación de paso ($0 < \lambda < 1$) , número adimensional

u : Relación de volumen, adimensional

ρ : Relación de radios ($0 < \rho < 1$)

Los valores de los parámetros anteriores se resumen en la tabla 23 a continuación:

Tabla 26. Parámetros adimensionales óptimos para tornillos de Arquímedes de varios números de hélices.

Número de	Relación de	Relación	Volumen	Relación optima
-----------	-------------	----------	---------	-----------------

⁴³ Rorres C., THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW, Enero 2000, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 1.

⁴⁴ Fórmulas obtenidas de: Rorres C., THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW, Enero 2000, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 1.

hélices	Radio	de paso	óptimo por	de volúmenes
N	optima	optima	vuelta	
	!		# ($N, !, \rho$)	# ($N, !, \rho$)
1	0.5358	0.1285	0.0361	0.2811
2	0.5369	0.1863	0.0512	0.2747
3	0.5357	0.2217	0.0598	0.2697
4	0.5353	0.2456	0.0655	0.2667
5	0.5352	0.2630	0.0696	0.2647
6	0.5353	0.2763	0.0727	0.2631
7	0.5354	0.2869	0.0752	0.2619
8	0.5354	0.2957	0.0771	0.2609
9	0.5356	0.3029	0.0788	0.2601
10	0.5356	0.3092	0.0802	0.2592
11	0.5358	0.3145	0.0813	0.2586
12	0.5360	0.3193	0.0824	0.2580
13	0.5360	0.3234	0.0833	0.2574
14	0.5360	0.3270	0.0841	0.2571
15	0.5364	0.3303	0.0848	0.2567
16	0.5362	0.3333	0.0854	0.2562
17	0.5362	0.3364	0.0860	0.2556
18	0.5368	0.3380	0.0865	0.2559
19	0.5364	0.3404	0.0870	0.2555
20	0.5365	0.3426	0.0874	0.2551
21	0.5370	0.3440	0.0878	0.2553
22	0.5365	0.3465	0.0882	0.2544
23	0.5369	0.3481	0.0885	0.2543
24	0.5367	0.3500	0.0888	0.2538
25	0.5371	0.3507	0.0891	0.2542
.....
α	0.5394	0.3953	0.0977	0.2471

Fuente: Rorres C. 2000

Calculando el volumen óptimo transportado por el tornillo a instalar en la cámara de digestión con los valores de la tabla 21 para un tornillo de 1 hélice y las dimensiones descritas anteriormente, se tiene:

$$V_T = 0.0678 \times 0.0361$$

$$V_T = 2.44 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ o } 2.44 \text{ lt /ciclo}$$

El volumen total (V_T) transportado, sucede en un ciclo del tornillo. Un ciclo es un segmento de longitud igual al paso del tornillo (20cm). En toda la longitud del tornillo se transportan (17ciclos):

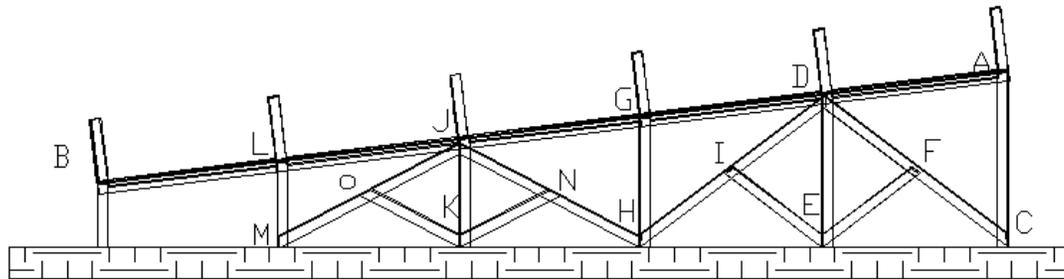
$$V_{\text{transportado}} = 17 \text{ ciclos} \times 2.44 \text{ lt/ciclo} = 42 \text{ lt}$$

Los planos de instalación del tornillo se muestran en el anexo 6. Será utilizado un motor de ½ hp monofasico utilizado para portones residenciales (ver cálculos anexo 3).

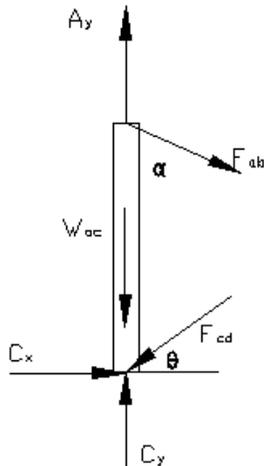
3.3 Análisis De Fuerzas Tramos Estructurales (estructura 2)

3.3.1 Diagrama De Tramos De La Estructura 2

Ver cálculos de todos los tramos estructurales y análisis en viga en Anexo 4.



TRAMO A-C



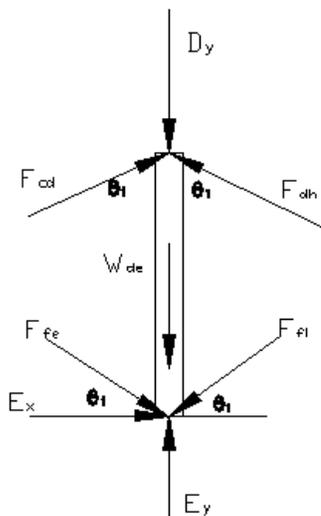
$A_y = C_y$

Resumen de ecuaciones

$$C_x = F_{CD} \cos 1 = (65.78) \cos 30.4^\circ = 56.73 \text{ N o } 12.7 \text{ lbf}$$

$$F_{CD} = W_{ac} / \sin 1 = (33.29) / \sin 30.4^\circ = 65.78 \text{ N o } 14.73$$

TRAMO D-E

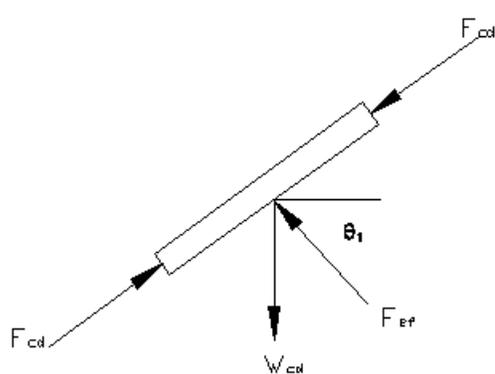


Resumen de ecuaciones

$$E_x = F_{EI} \cos 1 \pm F_{EF} \cos 1$$

$$F_{DH} = F_{CD} = 65.78 \text{ N o } 14.73 \text{ lbf}$$

$$D_y = E_y = R_e$$



TRAMO C-D (mismo análisis para TRAMO D-H)

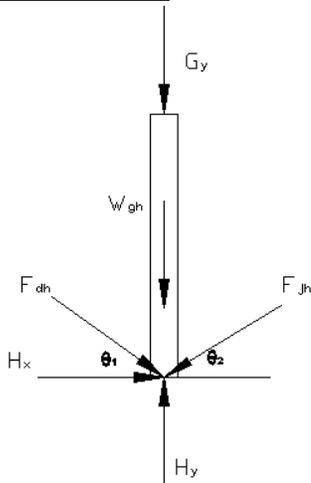
Resumen de ecuaciones

$$F_{EF} = W_{DC} \text{ VHQ} = 37.89 / \text{sen } 30.4^\circ = 74.88 \text{ N o } 16.77 \text{ lbf}$$

$$F_{IH} = F_{EF}$$

Resumen de ecuaciones

TRAMO G-H



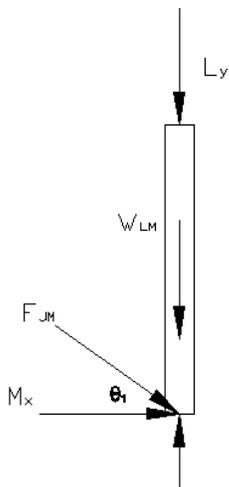
$G_y = H_y$
Resumen de ecuaciones

$$H_x = ((W_{AC} + W_{GH}) \cos \text{VHQ}) \pm (W_{AC} \cos 1 \text{VHQ } 1) = (33.29 + 26.30)(\cos 19) / (\text{sen } 19) \pm (33.29 \cos 30.4 / \text{sen } 30.4) = 173.06 \pm 56.74 = 116.32 \text{ N o } 26.05$$

$$F_{JH} = (W_{AC} + W_{GH}) / \text{sen } 2 = (33.29 + 26.30) / \text{sen } 19 = 183.02 \text{ N o } 41 \text{ lbf}$$

$$G_y = H_y = R_d$$

TRAMO L-M



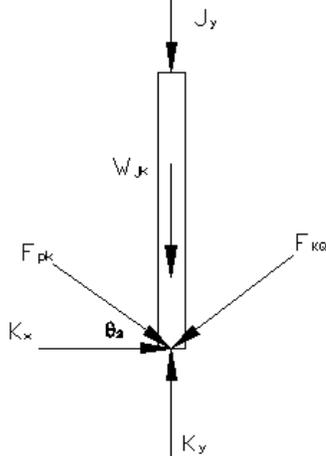
Resumen de ecuaciones
 $L_y = M_y$

$$F_{JM} = (-W_{LM}) / \text{sen } 2 = (-18.27) / \text{sen } 19 = -56.12 \text{ N o } 12.6 \text{ lbf}$$

$$M_x = (W_{LM} \cos \text{VHQ}) = (18.27 \cos 19) / \text{sen } 19 = 53.06 \text{ N o } 12 \text{ lbf}$$

$$L_y = M_y = R_c$$

TRAMO J-K



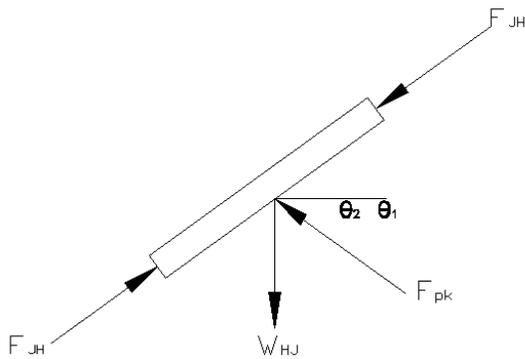
Resumen de ecuaciones

$$J_y = K_y$$

$$K_x = 0$$

$$J_y = K_y = R_b$$

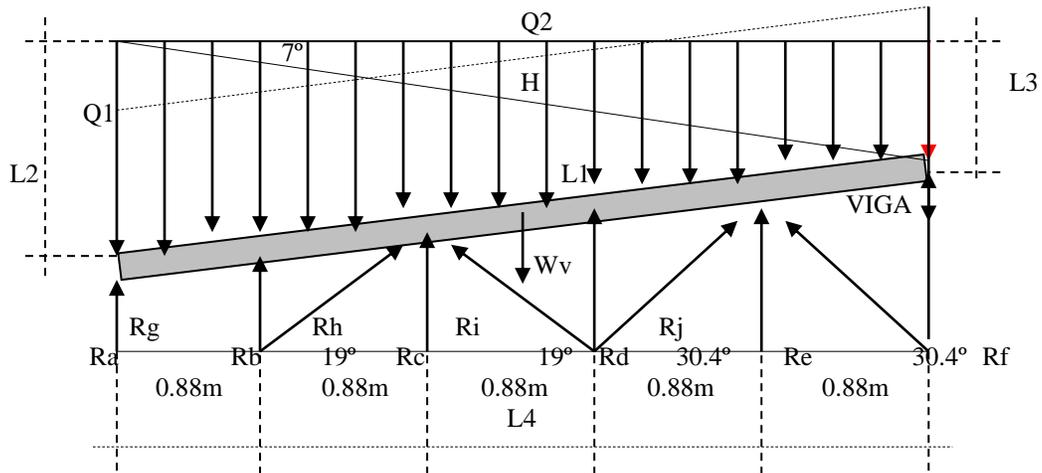
TRAMO H-J (mismo análisis para TRAMO J-M)



Resumen de ecuaciones

$F_{PK} = W_{Hj} \quad V_{HQ} \quad V_{HQ} \checkmark$
121.49N o 27.21 lbf
 $F_{PK} = F_{KQ}$

3.3.2 Diagrama De Cuerpo Libre De Viga, Estructura # 2



Dimensiones de un barril: Alto 0.89 m; diámetro 0.59 m;

Largo de 5 barriles = 0.89 x 5 = 4.45 m

$Q_t = (W_{total70\%}) / (L_1) = (33335.6) / (4.45) = 7491.15 \text{ N/m o}$

$Q_1 = 5333.37 / 5 = 1,066.67 \text{ N/m} \quad \text{Y} \quad Q_2 = 431.56 \text{ N/m,}$

$W_{viga} = 3.77 \text{ kg/m} \times 4.45 \text{ m} \times 9.81 = 164.58 \text{ N o } 37 \text{ lbf}$

$R_f = 1,749.13 \text{ N o } 392 \text{ lbf}$

$$R_a = 1,749.13\text{N o } 392\text{ lbf}$$

$$\sigma_{\text{perm}} = M_{\text{max}} / S = 1045.55\text{MPa o } 151.6\text{ ksi}$$

Se utilizará Ángulo estructural de perfil L ASTM-A514, aunque el esfuerzo permisible de encontrado es mayor a 700MPa o 101.5 ksi, por cuestiones de costo se soldaran dos ángulos en cada una de las vigas que sostendrán a cada digestor, creando así una factor de seguridad, y permitiendo que el esfuerzo permisible ya de ambas vigas sea de 1400MPa o 203 ksi, sobrepasando el esfuerzo encontrado.

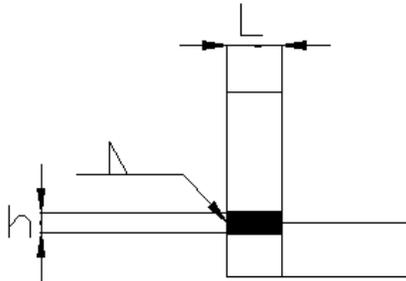
El esfuerzo en cada unión de soldadura es como sigue:

$$\tau = 1.414 F / hl;$$

donde: τ : esfuerzo en la soldadura por filete,
h: garganta de la soldadura,
l: longitud del cordón, tal como se ve en la fig.

Se utiliza metal de aporte E6013 ya que tiene una resistencia de 427MPa o 61.9 ksi

Ilustración 23. Soldadura de filete en ángulos estructurales.
h = 5mm, L = 60mm



Encontrando el esfuerzo cortante en la garganta, para la fuerza o reacción mayor, encontrada en el análisis de fuerzas en los tramos, $R_e = 5446.57\text{N}$ se tiene:

$$\tau = 1.414 F / hl = (1.414 * 5446.57) / (0.005 * 0.060)$$

$$\tau = 25.67\text{ MPa o } 3722.15\text{ psi}$$

El cálculo satisface la resistencia del metal de aporte a utilizar (<61.9 ksi), por tanto se aplicara la misma soldadura para todas las uniones de los tramos de la estructura.

El material a utilizar para la construcción de este elemento es:

Ángulo de 2" x 2" x 1/8": 47 m o 8 ángulos

Platina de 2" x 1/8" : 24 m o 4 platinas

3.4 Análisis de esfuerzos para la estructura 3 (Estructura de carga)

El detalle de los cálculos realizados para la estructura de carga se encuentran en el anexo 5, a continuación se muestra solamente el resumen de dichos cálculos:

Materia prima: $V_{mp} = 1.8 \text{ m}^3$

En cada fila: $V_{cf} = 0.9 \text{ m}^3$

Contenedor: $V_{cont} = 1.0 \text{ m}^3$

Se ha decidido que el contenedor se un tanque de 750 litros, lo que equivale a 0.75 m^3 , esto implica que para llenar las filas de barriles se tendrá que llenar el contenedor 3 veces.

Peso de la materia prima:

$m = 1650 \text{ Kg}$

$W = 16,170 \text{ N o } 3642 \text{ lbf}$

Tomando como viga la estructura con un largo de contenedor de 1.50 m se obtiene una fuerza uniformemente distribuida y si se utiliza un factor de seguridad de $n = 1.5$:

$q = 16,170 \text{ N/m}$ (solamente por el tanque lleno)

Peso de personas:

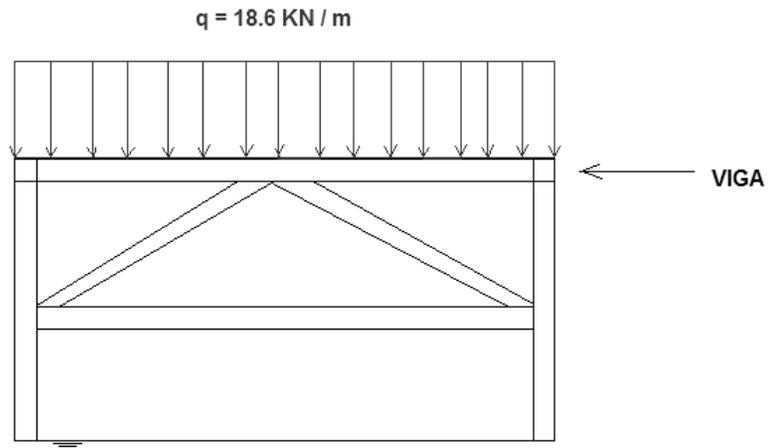
$W = 3,207.3 \text{ N o } 721 \text{ lbf}$

Al sumar el total de cargas distribuidas sobre la viga tenemos (ilustración 24):

$q_{total} = 18,575.5 \text{ N/m}$

Según el análisis de momento flexionante, el mayor esfuerzo se encuentra en donde la fuerza cortante se hace cero, entonces para ambos análisis tenemos:

Ilustración 24. Vista frontal estructura 3



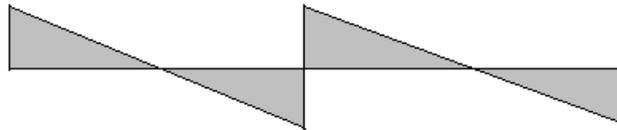
Fuerza cortante:

$$v = 18.6 - (18.6 \cdot 0.5) = 9.3 \text{ KN} \quad \text{o} \quad 2095 \text{ lbf}$$

$$v = 18.6 - (18.6 \cdot 1.0) = 0 \text{ KN}$$

$$v = 18.6 - (18.6 \cdot 1.5) = -9.3 \text{ KN} \quad \text{o} \quad 2095 \text{ lbf}$$

Esto es para ambos tramos, antes y después del apoyo central, así:



El momento flexionante mayor es:

$$M_{\text{máx}} = qL^2/8 = (18.6)(1.0)^2/8 = 2.325 \text{ KN.m} \quad \text{o} \quad 1715 \text{ ft-lbf}$$

El esfuerzo flexionante máximo se enmarca en las exigencias de la estructura de acuerdo al diseño establecido.

Las uniones soldadas en su totalidad serán a un ángulo de 45°, lo que nos da que cada cordón de soldadura tendrá un largo de 7.2 cm. Considerando un ancho de 5mm y la reacción más crítica que se encuentra en la parte donde se suelda la viga en sus extremos, para ese cordón se obtiene un esfuerzo de 48 Mpa.

Cantidad de ángulo de 2 x 2 x 1/8" a utilizar en la estructura de carga:

TOTAL DE ÁNGULO: 82 m o 14 ángulos

Tabla 27. Resumen de elementos de diseño seleccionados para el digestor

ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD
Cámara de digestión	Barril UN IA2 /Y2.2/230/00/USA/M1234/1.4/1/1.4	20
Agitador	Tornillo Sinfin	2

	Motor 0.5 HP monofásico	2
	Balero ET-323/32C	4
	Chumacera UCP206-104D1	4
	Prensa estopa	4
	Trenza grafitada 1/4"	2 lb
	Perno 1/4"	48
Estructura	Ángulo 2 x 2 x 1/8"	22
	Platina 2" x 1/8"	4
	Barilla Ø1/2"	4
	Electrodo E6013 3/32"	30 lb
Pileta de carga	Tanque 750 litros	1
	Válvula de bola 3"	4
	Tubo galvanizado 3"	5 m
	Tubo PVC 1 1/2"	20 m
	Válvula de bola 1 1/2"	3
Gasómetro	Tubo de neumático 29.5 x 25 "	1

CAPITULO 4: Análisis Económico

La economía es parte fundamental de toda inversión, tanto para minimizar gastos como para maximizar ingresos. En este proyecto se muestra la capacidad económica que puede ofrecer un generador de energía alternativa; para tal estudio, a continuación se muestran la siguientes tablas:

4.1 Costos De Inversión De Materiales Para Construcción De Biodigestor

MATERIA PRIMA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	TOTAL US(\$)
---------------	----------	----------------------	--------------

Ángulos de hierro de 2"* 2"	30	8	120.00
platina de 3 1/8" * 6mt	1	32	32.00
Lb. de electrodo 3/32 E6013	50	2	100.00
Lb. de alambre de amarre	3	2	4.50
Tanque de 700 lt	1	150	150.00

Tipo de sustrato y	EN.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.	Prod. anual
--------------------	-----	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	-------------

tubería PVC	1 tubo de 6m de 3" de diámetro y 1 de 6m de 1/2"	30	30.00
Pegamento PVC	1/2 galón	5	5.00
Barriles de lamina de acero	20	6.00	120.00
Pintura anticorrosiva	5 galones	23	115.00
válvulas de carga y descarga	4 de cierre rápido de 3"D	60	240.00
Cemento	6 bolsas	5	30.00
lamina metálica de 1/8" de espesor	1 Pliego	60	60.00
Tubería de hierro negro	3 tubo de 6m de 3" de diámetro	70	210.00
Accesorios para tubería PVC	4 camisas roscadas de 3" D, 2 codos de 90° 3" D,		30.00
Accesorios para tubería PVC de 1/2"			20.00
lijas para hierro	20 Pliegos	1	16.00
Solvente mineral	3 galones	4	12.00
Thinner	3 galones	4	12.00
gasómetro	1	150	150.00
agitador (tornillo sin fin)	2	50	100.00
arena y grava	1 m 3		20.00
varilla corrugada 1/2"	2 quintales	40	80.00
Manómetro	2	12	24.00
otros (combustible y soldadura de barriles)			400.00
TOTAL			\$ 2,080.50

4.2 Pronóstico de generación de gas por sustrato en biodigestor durante un año

generación de gas*													m3
Sustrato de pollo													
Generación proyectada de gas (m3)	18.6	16.8	18.0	18.6	18.6	18.0	18.6	18.6	18.0	18.6	18.0	18.6	219
Sustrato de vaca													
Generación proyectada de gas (m3)	12.4	11.2	12.0	12.4	12.4	12.0	12.4	12.4	12.0	12.4	12.0	12.4	146
Sustrato de cerdo													
Generación proyectada de gas (m3)	13.3	12.0	12.9	13.3	13.3	12.9	13.3	13.3	12.9	13.3	12.9	13.3	157

*Generación diaria de gas por sustrato de pollo 600 litros, con sustrato de vaca 400 litros, y con sustrato de cerdo 430 lt.

4.3 Depreciación De Maquinaria Y Equipo Por Método Línea Recta

MAQUINARIA	CANTIDAD	INVERSIÓN (US\$)	AÑO 1 (US\$)	AÑO 2 (US\$)	AÑO 3 (US\$)	AÑO 4 (US\$)	AÑO 5 (US\$)
Tanque 750lt	1	150.00	150.00	75.00	37.50	19.00	9.50
Válvulas	4	150.00	75.00	35.00			
Biodigestor	1	1,500.00	750.00	375.00	187.50	93.75	46.88
TOTAL DEPRECIACIÓN US(\$)		2,150.00	975.00	485.00	225.00	125.25	56.38

4.4 Costos De Mantenimiento Del Año 1 Al 5

COSTOS MANTENIMIENTO	AÑO 1 (US\$)	AÑO 2 (US\$)	AÑO 3 (US\$)	AÑO 4 (US\$)	AÑO 5 (US\$)
Pintura			5000		
Válvulas	0.00	5000	50.00	0.00	0.00
Gasómetro			0.00		
Tanque 750lt					0.00

Estructura de barriles	0.00	50.00	0.00	0.00	50.00
Estructuras de ángulo	0.00	0.00	45.00	0.00	45.00
Motores		0.00		0.00	
TOTALES (US\$)	0.00	50.00	145.00	0.00	95.00

4.5 Tabla de Amortizacion

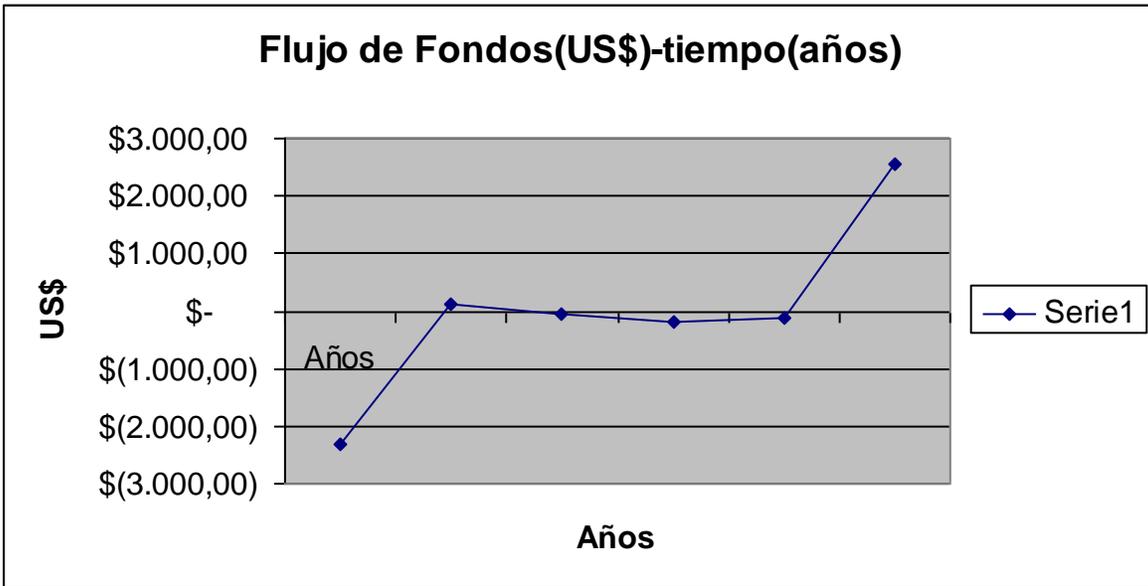
Años	Saldo inicial	Cuota	Interes	Amortizacion
0	\$ 2.300,00			
1	\$ 1.858,00	\$ 603,00	\$ 161,00	\$ 442,00
2	\$ 1.385,06	\$ 603,00	\$ 130,06	\$ 472,94
3	\$ 879,01	\$ 603,00	\$ 96,95	\$ 506,05
4	\$ 337,55	\$ 603,00	\$ 61,53	\$ 541,47
5	\$ (0,00)	\$ 603,00	\$ 23,63	\$ 337,55
		3.015,00	473,17	2.300,00

4.6 Flujo De Efectivo

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
INGRESOS		603,00	603,00	603,00	603,00	603,00
(-) COSTOS OPERATIVOS		-	-	-	-	-
(-) INTERESES		(161,00)	(130,06)	(96,95)	(61,53)	(23,63)
(-) DEPRECIACION		(975,00)	(485,00)	(225,00)	(112,75)	(56,38)
(-) PUBLICIDAD		-	-	-	-	-
(-) COSTOS DE MANTENIMIENTO		-	(50,00)	(145,00)	-	(95,00)
(+) UTILIDAD VENTA DE EQUIPO						2.000,00
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO		(533,00)	(62,06)	136,05	428,72	2.427,99
(-) IMPUESTOS 25%		133,25	15,52	(34,01)	(107,18)	(607,00)
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTO		(399,75)	(46,55)	102,03	321,54	1.820,99
(+) DEPRECIACION		975,00	485,00	225,00	112,75	56,38
(+) VALOR EN LIBROS						-
(-) AMORTIZACION		(442,00)	(472,94)	(506,05)	(541,47)	(337,55)
(+) VALOR RESIDUAL DE EQUIPO						1.000,00
(-) INVERSION	(2.300,00)					
(+) PRESTAMO	-					
FLUJO NETO	\$ (2.300,00)	\$ 133,25	\$ (34,49)	\$ (179,01)	\$ (107,18)	\$ 2.539,82

Los costos de construccion de este prototipo hacienden a US\$2300, el gas generado anualmente según proyecciones es en promedio US\$425m³ que representan 1.5 cilindros de propano de 100lb al mes, equivalente a US\$50 al mes o US\$603 al año. Esta aplicación puede ser utilizada en zonas rurales, ciudad e industria.

Ilustración 25. Flujo de fondos en el tiempo (US\$)



CAPITULO 5: Lugar y proceso de Construcción

5.1 Descripción del Lugar

La universidad Don Bosco se encuentra ubicada en la Zona central de El Salvador. Geográficamente se encuentra en la latitud $13^{\circ} 42'59''$ y una longitud $89^{\circ}09'07''$, a una altura aproximada de 650 msn que es catalogada por el SNET

(Servicio Nacional de Estudios Territoriales) como zonas calientes-valles intermedios-faldas de montañas (460 a 725 msn). La temperatura anual tiene un mínimo de 20°C un máximo de 33°C y un promedio anual de 24°C; con una precipitación anual acumulada de 2400 mm. La humedad relativa anual preponderante en la zona es de 79%.⁴⁵

5.2 Reconocimiento de las Áreas para instalación del Biodigestor

Para iniciar el proyecto fue necesario reconocer las áreas disponibles para la construcción del mismo. Los criterios ambientales que se tomaron en cuenta para la selección se muestran en la matriz causa/efecto en anexo 7. Los tres lugares a evaluar son:

Ilustración 26. Terreno contiguo al edificio de laboratorios de Mecánica de la UDB (opción 1).



Fuente: recursos propios

Ilustración 27. Terreno contiguo a edificio de Ortesis y prótesis (opción 2)

⁴⁵ Datos obtenidos de: Boletín Climático Anual, Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET, 2005, El Salvador.



Fuente: recursos propios

Ilustración 28. Terreno fuera del campus UDB, Contigo a muro del CITT



Fuente: recursos propios

El área necesaria para la construcción es de 2.5 m x 9m. Los parámetros principales que debe reunir dicho lugar son:

1. Recibir la luz del sol durante el día (ausencia de árboles que proporcionen sombra). La absorción de energía solar en las cámaras de digestión aumenta la temperatura del sustrato y disminuye el tiempo de retención hidráulico (tiempo de fermentación).
2. No debe interferir con la expansión del campus de la UDB.

3. Debe estar a una distancia de al menos 10 m de cualquier asentamiento humano, ya que durante la carga se manipula excretas causando malos olores y atrayendo moscas.⁴⁶
4. Disponibilidad de servicios de agua y electricidad para realizar trabajos en el biodigestor.
5. Seguridad para todos los elementos y componentes del digestor.

De acuerdo al anexo 7, el lugar con la menor puntuación causara el menor impacto. Se selecciona la opción 2 con un puntaje total de 338 puntos. El plano de ubicación dentro de la universidad se muestra en el anexo 8.

5.3 Hojas de ruta de construcción (ver anexo 9)

⁴⁶ Better Farming Series 31 - Biogas: What it is; How it is made; How to use it (FAO, 1984, 52 p.)

CAPITULO 6: operación del Biodigestor y resultados de experimentación

6.1 Descripción del sistema de Biodigestor

El sistema del Biodigestor esta conformado por tres subsistemas (ver ilustración 28), el manual de funcionamiento se encuentra en el anexo 10:

1. Sistema de carga de materia prima
2. Cámara de Digestión
3. Sistema de transporte y almacenamiento de biogás

Ilustración 29. Subsistemas del biodigestor



Fuente: recursos propios

6.1.1 Sistema de carga de materia prima

Su función es proporcionar el espacio para realizar la mezcla de la excretas con agua, para luego dejarla fluir por las tuberías de 3" de diámetro hasta las cámaras de digestión. Este sistema lo conforman (ver ilustración 29):

1. Tanque de 450 lt (numero 1, ilustración 28)
2. tubo de hierro negro de 3"
3. Junta universal de PVC de 3"
4. Niple todo rosca de 3"
5. Válvula de Bola de PVC de 3"

Ilustración 30. Sistema de Carga



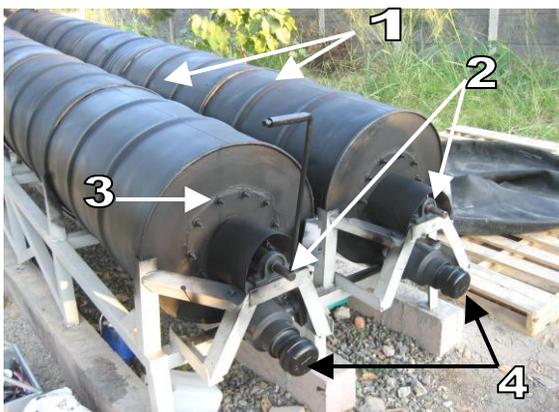
Fuente: recursos propios

6.1.2 Cámara de digestión

Su función es mantener bajo condiciones anaeróbicas al sustrato. Cuenta con un sistema de agitación que remueve el sustrato en toda la longitud del digestor. La cámara de digestión posee una válvula de descarga de sustrato en el nivel de cota cero, para extraer por gravedad el sustrato después de pasado el tiempo de retención elegido. El ángulo de inclinación que poseen ambas cámaras es de 7°. Los elementos que la componen son (ver ilustración 30):

1. Cilindro de barriles inclinado a 7°
2. Agitador
3. Compuerta de mantenimiento
4. Válvula de descarga
5. Tubería de carga
6. Manómetros
7. válvulas de salida de Biogás

Ilustración 31. Cámaras de digestión



Fuente: recursos propios

6.1.3 Agitador

Remueve el sustrato en toda la longitud de la cámara de digestión, proporcionando un proceso de digestión mas uniforme y disminuyendo el tiempo de retención hidráulico elegido. El sistema funciona por medio de una manivela que hace girar un eje. El sustrato se mantiene dentro de la cámara por medio un prensa estopas que posee empaque grafitado.

Los ejes que pasan a través de las cámaras de digestión son como muestra la ilustración 31, Poseen una aspa fabricada de ángulo de 2"x2"x1/8" cada 0.9 m, que es equivalente a poseer un aspa por barril. En los primero 3 barriles el eje tiene un tornillo sin fin que agitara todo el sustrato sedimentado.

Ilustración 32. Eje agitador, visto desde la compuerta de mantenimiento



Fuente: recursos propios

El sello hidráulico entre el eje y la cámara de digestión se logra por medio de una prensa estopa que consta de dos piezas fabricadas de acero 6018. La pieza hembra aloja las trenzas grafitadas de 1/4" como lo muestra las ilustraciones 32, 33, 34, esta pieza esta soldada a las paredes de la cámara de digestión.

Ilustración 33. Prensa estopa hembra



Fuente: recursos propios

Posee el espacio necesario para alojar las trenzas grafitadas y permitir que el prensa estopas macho ejerza presión formando un sello hermético.

Ilustración 34. Prensa estopa macho



Fuente: recursos propios

Posee un sección cilíndrica que presiona las trenzas, deformándolas.

Ilustración 35. Conjunto de Prensa estopa



Fuente: recursos propios

La compresión realizada por la pieza macho deforma las trenzas sellando la cámara de digestión. La compresión se logra con tres pernos de 1"x 3/8" no mostrados en la ilustración.

6.1.4 Sistema de Transporte y almacenamiento de Biogás

Transporta el gas por medio de una tubería de PVC de 1 1/2" de diámetro hacia un gasómetro plástico. Este sistema posee válvulas para cerrar el paso de gas desde cada cámara de digestión. También posee Filtros para purificación de gases no deseados en el biogás CO₂ y H₂S. El sistema lo componen los elementos mostrados en la ilustración 35:

1. Válvulas de bola 1 1/2" PVC
2. Manómetros de 0-30psi
3. Alivio de presión
4. Filtro de CO₂

5. Filtro de H₂S
6. Válvulas para muestras de gas
7. Gasómetro plástico

Ilustración 36. Componentes del sistema de transporte y almacenamiento de biogás



Fuente: recursos propios

6.1.5 Procedimiento para la carga inicial de sustrato

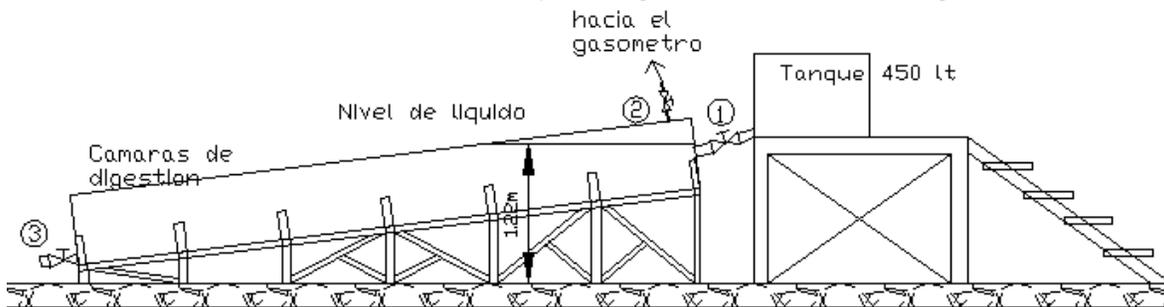
El digester posee dos cámaras de digestión. Al cargar el digester por primera vez se debe esperar un tiempo de 24 días hasta que se alcance el máximo de generación de biogás. La mezcla de excretas y agua se realiza en el tanque de 450 lt. Se agrega la cantidad de excretas calculada y luego se agrega agua (relación agua:excretas, 2:1 excretas de vaca y cerdo, 6:1 excretas de pollo).

Procedimiento:

- 1- Cerrar las válvulas 1 según la ilustración 36
- 2- Colocar el volumen de excretas en el tanque de 450 lt según cálculos realizados
- 3- Se agrega un volumen de agua según la relación excretas: agua
- 4- Se realiza una agitación suave para homogeneizar la mezcla
- 5- Las válvulas 2 deben estar abiertas para que el influente desplace el aire al interior de las cámaras de digestión o cámara que será cargada. Las válvulas 3 deben estar cerradas para evitar que las cámaras se vacíen al mismo tiempo que son cargadas.
- 6- Según que cámara será cargada se abre una de las válvulas 1
- 7- Se deja fluir el sustrato hasta que el tanque de 450lt esta vacío.

- 8- El volumen máximo de sustrato en cada cámara es de 0.87 m^3 , lo que equivale a llenar dos veces el tanque 450 lt por cámara. El nivel de líquido dentro de las cámaras debe de ser de aproximadamente 1.22 m sobre el piso de cemento, inundando así la tubería de carga y evitando fuga de gas o entrada de oxígeno.
- 9- Realizar los pasos 1 a 8 para cargar cada una de las cámaras de digestión.
- 10- Las válvulas 1 y 3 deben permanecer cerradas todo el tiempo. Las válvulas 2 permiten el paso del biogás al gasómetro. De mantener cerradas las válvulas 2 todo el tiempo la presión de las cámaras aumentara, la presión máxima no debe sobrepasar 20 psi.

Ilustración 37. Procedimiento para carga de sustrato en el Biodigestor



Fuente: recursos propios

6.1.6 Procedimiento para carga diaria de sustrato

Luego de pasados 24 días de la primera carga, la generación de biogás alcanzara su valor máximo. Para mantener el nivel de generación se realizaran cargas diarias de sustrato dando alimento nuevo a las bacterias metanogénicas. Los valores calculados de carga diaria se encuentran especificados en la tabla 20 capítulo 3. (Ver ilustración 36 en procedimiento anterior)

Procedimiento:

- 1- Las válvulas 1 deben estar cerradas
- 2- Hacer la mezcla de agua:excretas en el tanque tanque de 450 lt según el sustrato a utilizar y usando valores de tabla 20 Cáp.3.
- 3- Las válvulas 2 deben abrirse para reducir la presión de las cámaras de digestión o cámara a cargar, permitiendo así la entrada del sustrato nuevo.
- 4- Una vez realizada la mezcla en el tanque de 450 lt, abrir la válvula 1 de la cámara correspondiente.

- 5- La válvula 3 deberá permanecer cerrada
- 6- Una vez realizada la carga se deberá retirar una cantidad igual en volumen de sustrato digerido de la válvula 3 correspondiente a la cámara cargada.
- 7- Al retirar un volumen igual al agregado tener cuidado en no extraer demasiado sustrato o la tubería de carga no quedara sumergida y habrá fuga de gas o ingreso de oxígeno.

6.1.7 Procedimiento para Agitación de sustrato

Los objetivos de la agitación fueron establecidos en el apartado 2.6.2. El agitador del digestor recorre toda la longitud de cada cámara de digestión. Cuenta en el lado de la descarga con un tornillo sin fin de 2.2 m de largo. En toda su longitud posee aspas fabricadas de ángulo de 2x2x1/8" y 12 cm de alto, ubicadas cada 90 cm. orientadas para impulsar el sustrato en dirección de la tubería de carga. (ver ilustración 37)

Procedimiento:

- 1- Colocar la manivela en el eje del agitador de la cámara a agitar
- 2- Girar en sentido antihorario por 4 a 5 minutos suavemente(no se puede especificar una velocidad de agitación, ya que no existe en la actualidad estudios del efecto de agitación sobre la generación de biogás)
- 3- La agitación debe ser una vez al día, un exceso de agitación inhibirá el proceso resultando en un mayor tiempo de retención o disminuyendo la calidad del biogás (concentración de metano).

Ilustración 38. Sentido de giro del agitador



Fuente: recursos propios

6.1.8 Filtros de CO₂ y H₂S

El principio de funcionamiento de cada filtro fue establecido en el apartado 2.9.1. Con una generación diaria de 600 lt (tabla 21 Cáp. 3) de biogás y con una composición de 6.9% CO₂:

$$\begin{aligned} \text{Volumen diario de CO}_2 &= 600 \times 0.069 = 41.4 \text{ lt/día} \\ \text{Volumen de un gas ideal} &= 22.4 \text{ lt/mol} \\ \text{Moles de CO}_2 \text{ diarios (n)} &= 41.4 / 22.4 = 1.84 \text{ moles/día} \end{aligned}$$

Al multiplicar por el peso molecular ($M = 56.1 \text{ gr./mol}$) se obtiene:

$$m = n \times M = 1.84 \times 56.1 = 103.22 \text{ gr/día de cal}$$

La masa purificadora de CaO será calculada para un periodo de 7 días, por lo que:

$$\mathbf{m = 723 \text{ gr. de CaO}}$$

Según la evaluación realizada por Coto R. y Maldonado M.⁴⁷ las pruebas de dilución del compuesto químico se trabaja a temperatura ambiente mostrando una buena suspensión la relación de tres partes de agua y una parte del compuesto (CaO) ya que no presenta problemas como: poca dilución, exceso de precipitado suspensión con exceso de viscosidad, etc.

De lo anterior la masa de agua a utilizar es:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 723 \times 3 = \mathbf{2.16 \text{ Kg. de H}_2\text{O o aproximadamente 2.2 lt}}$$

⁴⁷ Procedimiento y porcentaje obtenido de: Coto R., Maldonado M., Diciembre 2005, Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás, en EARTH, Trabajo de Graduación, Guacimo, Costa Rica, Pág. 41.

Filtro de H₂S

El Filtro lo compone viruta de hierro oxidada dentro de un tubo de PVC de 3" x 44.5 cm. El filtro utilizado se muestra en la ilustración 38:

Ilustración 39. Filtro de H₂S



Fuente: recursos propios

La masa de virutas utilizada es renovada al ser expuesta al aire.

6.2 Manual De Mantenimiento Del Biodigestor

* **Partes que necesitan mantenimiento preventivo**

* **Partes que necesitan mantenimiento correctivo**

* **Higiene y Seguridad**

PARTES QUE NECESITAN MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Parte	Descripción de desmontaje	Descripción de montaje	Repuesto	Tiempo de ejecución	Fallas
Chumaceras	- Desmontar cubierta De chumacera - Quitar grasera para aceitar el balero	- Colocar grasera - empernar cubierta de chumacera	- Graseras	8 minutos por las cuatro chumaceras	Valeros no aceitados
Válvulas de carga	- Remover junta universal de ambos brazos - Retroceder un poco el tanque de carga - Remover junta de válvulas - Verificar desgaste de sello o-ring	- Colocar cinta teflón en rosca - Colocar junta de válvulas con sello - colocar brazo con junta universal y acercar el tanque de carga	- cinta teflón - hule sellador - grasa	15 minutos para ambas válvulas	Fuga de liquido
Juntas universales	- Remover parte roscada de la junta - Verificar desgaste de sello o-ring	- colocar parte roscada de junta	- hule sellador -cinta teflón	8 minutos para ambas juntas universales	Fuga de liquido
Válvulas de descarga	- remover válvula de niple de descarga - Remover junta de válvulas - Verificar desgaste de sello o-ring - Colocar cinta teflón en rosca	- Colocar junta de válvulas con sello - colocar válvula en niple de descarga	- cinta teflón - hule sellador - grasa	10 minutos para ambas válvulas	Fugas de liquido
Niples de salida de tanque de carga	- Colocar silicón sellador alrededor de tuerca de niple y en unión con brazo de carga	-----	- sellador silicón	5 minutos para ambos niples del tanque	Fuga de liquido
Tubería PVC	- verificar estado y uniones de pvc	- realizar cambio de tramo de pvc defectuoso	- tubería pvc	Depende de la complejidad de los cambios	Fugas de gas e infiltración de aire
Cilindros del digestor	- Verificar fuga en paredes del cilindro - limpiar con cepillo de alambre poro de fuga - pulir área defectuosa - soldar área afectada - verificación de porosidad con líquidos penetrantes. - realizar prueba hidrostática en el cilindro	- colocar pintura selladora al área tratada - pintar área con pintura anticorrosiva - cargar de nuevo el cilindro con sustrato	- soldadura TIG - pintura sellado. - pintura anticorrosiva.	Depende de la complejidad de la fuga	Fuga de liquido
neumático acumulador de gas	- verificación de fuga	- colocar parche protector	- Parche	10 minutos	Fuga de gas
Filtro de acido sulfhídrico	- remover junta universal - Extraer viruta de hierro	- Colocar viruta de hierro nueva - colocar junta universal	- Viruta de hierro	20 minutos	no filtración de acido sulfhídrico

Filtro de CO2	- Remover silicón protector en tubería de entrada	- colocar nueva mezcla de cal y agua	- cal	20 minutos	
---------------	---	--------------------------------------	-------	------------	--

de gas - Extraer mezcla de cal y agua usadas	- Colocar silicón protector	- agua		no filtración de CO2
---	-----------------------------	--------	--	----------------------

PARTES QUE NECESITAN MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Parte	Descripción de desmontaje	Descripción de montaje	Repuesto	Tiempo de ejecución	Fallas
Chumaceras	- Desmontar cubierta De chumacera - desempernar chumacera - Cambiar balero	- Colocar balero - Empernar chumacera - empernar cubierta de chumacera	- Valeros	20 minutos por cada chumacera	Valeros no aceitados o atascados.
Válvulas de carga	- Remover junta universal de ambos brazos - Retroceder un poco el tanque de carga - Remover junta de válvulas - remover válvula de niple de descarga	- Colocar cinta teflón en niples - Colocar nueva válvula - colocar brazo con junta universal y acercar el tanque de carga	- cinta teflón - válvula - grasa	15 minutos para cada válvula	válvula quebrada
Juntas universales	- Remover junta defectuosa	- colocar junta nueva	- Junta universal -cinta teflón	10 minutos para cada junta universal	Junta quebrada
Válvulas de descarga	- remover válvula de niple de descarga - Remover junta de válvulas - Desmontar válvula completa	- Colocar válvula nueva al niple - colocar tapón roscado al niple de salida de válvula	- cinta teflón - hule sellador - grasa	10 minutos para ambas válvulas	válvula quebrada
Ejes o tornillos sin fin	- Desmontar cubierta de chumaceras - Desempernar chumaceras, delanteras y trasera. - Desempernar prensa estopas - Desempernar compuerta trasera - Extraer el eje del cilindro - Revisar aspas del eje - Revisar perno que sujetan la compuerta	- reparar tramos dañados por corrosión - alinear ejes en banco de rosillos - calentar con flama áreas del eje torcidas - Pintar reparaciones - montar eje en cilindro - hacer nuevo juego de empaques - empernar compuerta con empaques - colocar silicón alrededor de la compuerta - cortar nuevo juego de trenzas - colocar trenzas en trenza estopas - empernar trenza estopas - colocar y empernar chumaceras - apretar bien trenza estopas - colocar cubierta de chumaceras	- ángulo estruct. - pintura - trenza grafitada nueva - 1/2 pliego de vitorite (empaque) -tubos de silicón rojo	de 2 a 3 horas	aspas dañadas eje cortado o quebrado eje desalineado

Trenza estopas	- Desmontar cubierta de chumaceras - Desempernar chumaceras, delanteras y trasera. - Desempernar trenza estopas	- cortar nuevo juego de trenzas - colocar trenzas en trenza estopas - empernar trenza estopas - colocar y empernar chumaceras - apretar bien trenza estopas - colocar cubierta de chumaceras	- trenza grafitada nueva	1 hora	Fuga de liquido
Cilindro de barriles	- Desmontar cubierta de chumaceras - Desempernar chumaceras, delanteras y trasera. - girar el cilindro dependiendo donde se encuentre la fuga o parte deteriorada	- soldar y reparar parte dañada - girar el cilindro y colocarlo en posición original		2 a 3 horas	Fuga de liquido
		- colocar y empernar chumaceras - apretar bien trenza estopas - colocar chumaceras - colocar cubierta de chumaceras			

RECOMENDACIONES DE HIGIENE Y SEGURIDAD

- Se recomienda no fumar cerca del digestor y del acumulador de gas
- Al momento de cargar el digestor, es necesario utilizar una varilla para empujar el sustrato, por la parte del tanque de 450 lt o tanque de carga
- Verificar que el nivel de agua dentro del digestor, de modo que no haya fuga de gas por las válvulas de entrada, para ello se debe desenroscar la junta universal y verificar que el nivel de agua sobrepase a la válvula de entrada.
- Cualquier derramamiento de agua y sustrato en los alrededores del área de entrada de carga y salida o descarga, se recomienda esparcir CAL sobre el área mojada, para evitar Malos olores.
- Se recomienda tapar y cubrir con bolsas plásticas los barriles que contienen excremento y esparcir CAL en sus alrededores para evitar malos olores.
- Se recomienda agitar el filtro de CO₂.
- Es necesario introducir una o dos bolsitas de abate o colocarle unas gotas de lejía al balde que sirve como recipiente de alivio de presiones.
- Se recomienda no generar flama a las salidas de cada chorro de muestras de gas, para evitar cualquier incendio o explosión.
 - Se recomienda lavar bien el tanque de carga después de cada carga, para evitar malos olores.
 - Se recomienda cargar con agua extra el tanque tanque de 450 lt por lo menos un cuarto de su volumen total, con el objeto de evitar perdidas de gas por las válvulas de carga, además esto evita que el digestor se quede sin agua y que se retrase el proceso de digestión.
 - Al momento de realizar la carga de sustrato, es necesario mantener abierta la válvula de salida de gas en la cámara correspondiente, para permitir que la presión interna del gas no evite el flujo de sustrato hacia dentro del digestor.

6.3 Cuantificación de Biogás Generado

El proceso de cuantificación se realiza de manera visual estimando cuanto del volumen del tubo de llanta esta ocupado (1.33 m^3).

La primera carga de sustrato fue realizada el día sábado 10 de febrero de 2007. La cámara de digestión contraria al gasómetro se cargo excretas de vaca (2:1) y la derecha contigua al gasómetro, con excretas de pollo (6:1).

El tiempo calculado de retención hidráulica (TRH) fue de 24 días. Debido a que las cámaras alcanzan una temperatura mayor a la realizada en la toma de mediciones en el digestor de anexo 2, el tiempo de generación se redujo a 6 días. Se obtuvo un volumen de aproximadamente 1.33 m^3 el día 16 de febrero de 2007, lo que equivale a 221 lt/día . El registro visual de este volumen se muestra en las ilustración 39.

Ilustración 40. Volumen almacenado dentro del gasómetro 1.33 m^3



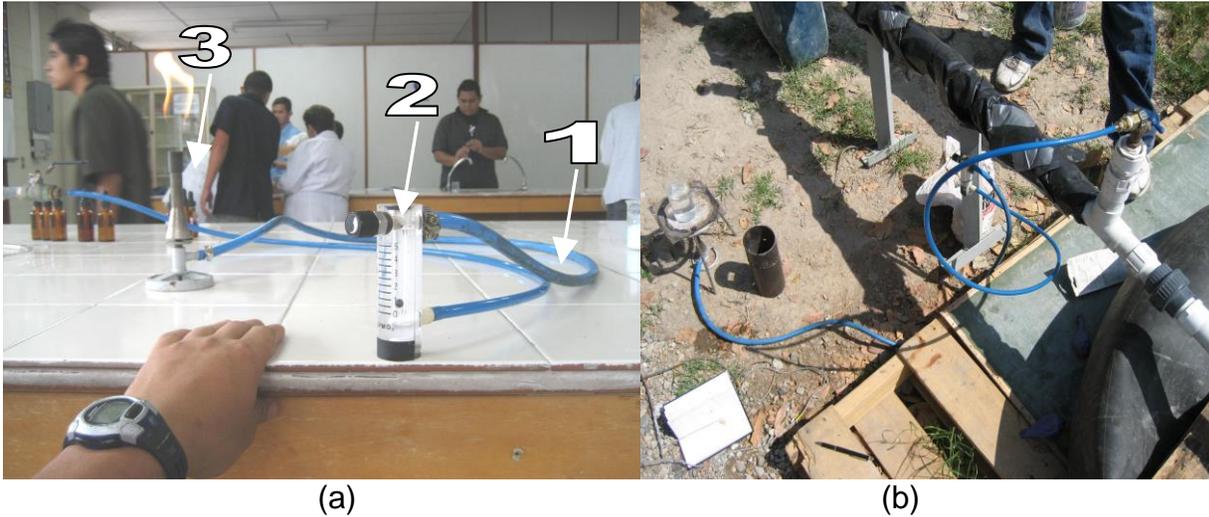
Fuente: recursos propios

Para la comprobación del contenido de metano (CH_4) en el gas almacenado se procedió a una quema del gas en una de las válvulas de obtención de muestras. Asumiendo despreciables las pérdidas de calor con los alrededores (ver ilustración 16).

El sistema utilizado para la quema del gas lo componen:

1. Mangueras
2. medidor de flujo LPM (0-5 lpm)
3. quemador bunsen

Ilustración 41. Sistema utilizado para la quema de biogás en el laboratorio (a) y en el sitio del digestor (b)



Volumen de agua = 200ml

T₁ H₂O= 35.6°C

T_{ambiente}= 32.7°C

T_{tiempo de combustión}= 19 min.

T_{max} =82°C

Flujo de biogás= 2.5lpm (el coeficiente de aire primario en el quemador fue de 0)

De esto se puede calcular el poder calorífico del biogás por unidad de tiempo como:

$$Q/t = mc\Delta T$$

Donde: Q/t : Calor por unidad de tiempo

m: masa de agua

c: poder calorífico

ΔT : cambio de temperatura

$$Q/t = 0.2\text{kg} \times 4.186 \text{ kJ/kgK} \times (82 - 35.6) / 1140 \text{ sg} = 34.07 \text{ J/s}$$

Expresándolo por unidad de volumen:

$$(Q/t) / V = 34.07 / 0.048 = 0.71 \text{ kW/m}^3$$

El pH de los sustratos en ambas cámaras de digestión fue monitoreado a partir de la segunda semana de fermentación. La medición se realizó abriendo la válvula de descarga y sacando un pequeño volumen de sustrato. El medidor utilizado es de

la marca PHYWE para medición de pH y temperatura, proporcionado por el departamento de medio ambiente de la UDB. Los resultados de la medición son:

Tabla 28. Resultado de mediciones de pH en sustratos de pollo y vaca

Fecha	16/02/07	22/02/07	28/03/07
pH Sustrato Vaca	7.52	7.35	7.14
pH Sustrato de pollo	5.91	7.08	6.74

Fuente: recursos propios

De la tabla 28 se observa que la fermentación anaeróbica del sustrato de pollo ha pasado de un valor levemente ácido a un valor neutro; ha pasado la etapa de acidificación. El sustrato de vaca varió levemente, este sustrato fue utilizado en el digester de domo flotante presentado para el primer avance de este proyecto (anexo 2); por lo que no ha experimentado una etapa de acidificación.

CONCLUSIONES

1. Con la realización de este proyecto, se ha demostrado que en el país hay capacidad para desarrollar tecnologías sobre energía renovable.
2. De acuerdo a los análisis hechos en la primera parte de esta investigación se han comprobado los potenciales energéticos de las excretas de vaca y pollo.
3. Con la combinación de estos dos sustratos se alcanzaron niveles de generación de 1.18 m³ de biogás diario, lo cual está dentro del rango calculado, demostrando la efectividad de ambos sustratos.
4. El biodigestor diseñado reduce considerablemente el tiempo de retención hidráulica comparado con sistemas más sencillos mencionados en los antecedentes, que tardan un mes en generar biogás. Lo cual se comprobó con una reducción de tiempo de generación de 24 a 6 días.
5. La temperatura tropical de nuestro país ayuda en gran manera a la aceleración del proceso de digestión para la generación de biogás.
6. La llama producida al hacer arder el metano, es de color celeste e inodora.
7. En la primera etapa de la fermentación anaeróbica se genera biogás con un bajo porcentaje de metano. Este gas produce un mal olor debido al contenido de ácido sulfhídrico.
8. Los costos de construcción de este prototipo ascienden a US \$2300, el gas generado anualmente según proyecciones es en promedio 425 m³ que representan 1.5 cilindros de propano de 100lb al mes equivalente a US\$50 al mes o US\$603 al año. Esta aplicación del biogás puede ser utilizada en zonas rurales, ciudad, industria.
9. Con las lecciones aprendidas en la construcción de este prototipo de biodigestor se puede mejorar el proceso de fabricación en futuras construcciones del mismo diseño; abaratando los costos de construcción.

RECOMENDACIONES

1. La Universidad Don Bosco debe continuar apoyando este tipo de proyectos ya que permiten a los estudiantes adquirir un grado de experiencia en el campo de su carrera, comprobando y adquiriendo conocimientos nuevos no cubiertos a nivel teórico y práctico.
2. Dar seguimiento a este proyecto, para garantizar la generación continua de biogás. Según los manuales de seguridad y operación entregados en este documento.
3. Establecer relaciones institucionales con Rastros, Granjas de pollos, etc. Para la obtención de materia prima (excretas) y desarrollar proyectos de generación de biogás.
4. La Universidad Don Bosco debe adquirir nuevo equipo de análisis de gases, ahora que esta incursionando en el campo de energía renovable.
5. La unión por soldadura entre barriles, requiere un alto grado de experiencia. Las paredes de ellos son de espesor delgado y es difícil garantizar la no existencia de fugas.
6. Deben mantenerse limpios los alrededores y la zona del digester para evitar malos olores y proliferación de vectores.
7. Tener los cuidados necesarios con el gasómetro plástico para evitar fugas o deterioro de este. Revisar periódicamente.
8. Renovar periódicamente el contenido de los filtros de biogás.
9. El recipiente de alivio de presión debe ser debidamente abatizado para evitar criadero de zancudos.
10. El Sustrato que esta en proceso de digestión debe ser agitado 1 vez al día para acelerar la generación de biogás, pero de manera moderada.
11. Durante la carga de sustrato debe contarse con varilla metálica para evitar la formación de tapones en las tuberías de carga.
12. Para cada tipo de excretas debe utilizarse la mezcla agua:excretas correspondiente para garantizar que el nivel de sólidos volátiles esta por debajo de 1.5 Kg SV/m³día y no provocar condiciones acidas en el sustrato.

13. Para futuras construcciones de biodigestores, y de acuerdo a las lecciones aprendidas se recomienda para evitar fugas en las cámaras de digestión introducirse el tubo de carga dentro de los barriles para evitar el llenado de la tubería de carga como sello hidráulico.
14. La agitación del sustrato debe realizarse previo a la carga diaria de sustrato.

GLOSARIO

Ácido: es un compuesto químico que disuelto en agua, da una solución con un pH menor de 7. También cualquier compuesto químico que puede ceder protones es un ácido.

Ácido acético: es un ácido que se encuentra en el vinagre, y que es el principal responsable de su sabor y olor agrios. Su fórmula es $\text{CH}_3\text{-COOH}$, y, de acuerdo con la IUPAC se denomina sistemáticamente ácido etanoico.

Ácido fórmico: es un ácido orgánico de un solo átomo de carbono, y por lo tanto el más simple de los ácidos orgánicos. Su fórmula es H-COOH , el grupo carboxilo es el que le confiere las propiedades ácidas a la molécula.

Ácido láctico: se produce a partir del piruvato a través de la enzima lactato deshidrogenasa (LDH) en procesos de fermentación. El lactato se produce constantemente durante el metabolismo y sobre todo durante el ejercicio, pero no aumenta su concentración hasta que el índice de producción no supere al índice de eliminación de lactato.

Almidón: Polisacárido ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) de los organismos verdes de las plantas.

Amoníaco: es un compuesto químico cuya molécula consiste en un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H) de acuerdo a la fórmula NH_3 . El amoníaco es producido naturalmente en el suelo por bacterias, por plantas y animales en descomposición y por desechos animales. El amoníaco es esencial para muchos procesos biológicos. La mayor parte del amoníaco producido en plantas químicas es usado para fabricar abonos.

Antibiótico: es un medicamento que mata o impide el crecimiento de ciertas clases de bacterias, pero que normalmente es inofensivo (aunque en base a la reacción adversa a medicamento) para el huésped y que se utiliza para tratar una infección.

Azúcares: nombre dado para designar a los diferentes monosacáridos y disacáridos, que generalmente tienen sabor dulce, aunque por extensión se refiere a todos los hidratos de carbono.

Carbohidratos: Son la forma biológica primaria de almacén o consumo de energía; otras formas son las grasas y las proteínas.

Citogénesis: desarrollo de las células; reproducción celular.

Citogenética: rama de la genética que estudia los elementos celulares determinantes de la herencia, es decir los cromosomas.

Manto Freático: Aguas acumuladas en el subsuelo.

Grasa: es un término genérico para varias clases de lípidos, aunque generalmente se refiere a los acilglicéridos, ésteres en los que uno o varios ácidos grasos se unen a una molécula de glicerina. Las grasas están presentes en muchas formas de vida, y tienen funciones tanto estructurales como metabólicas.

Hidrólisis: es una reacción química del agua con una sustancia. Entre las sustancias que pueden sufrir esta reacción se encuentran numerosas sales, que al ser disueltas en agua, sus iones constituyentes se combinan con los iones hidronio u oxonio, H_3O^+ o bien con los iones hidroxilo, OH^- , o ambos. Dichos iones proceden de la disociación o autoprotólisis del agua. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH.

Microbios: son organismos dotados de individualidad que presentan, a diferencia de las metafitas y los metazoos, una organización biológica elemental. En su mayoría son unicelulares, aunque en algunos casos se trate de organismos cenóticos compuestos por células multinucleadas, o incluso multicelulares.

Metanol: El compuesto químico metanol, también conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es el alcohol más sencillo. Es un líquido ligero, incoloro, inflamable y tóxico que se emplea como anticongelante, disolvente y combustible. Su fórmula química es CH_3OH .

Patógenos: adjetivo que se le da al microorganismo que tiene la propiedad de producir enfermedad en los seres humanos, animales o plantas.

Proteínas: (del griego *proteion*, primero) son macromoléculas de masa molecular elevada, formadas por aminoácidos unidos mediante enlaces peptídicos. Pueden estar formadas por una o varias cadenas. Las proteínas son biomoléculas

formadas básicamente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Suelen además contener azufre y algunas proteínas contienen además fósforo, hierro, magnesio o cobre, entre otros elementos.

Policloruro de vinilo o PVC: (del inglés *PolyVinyl Chloride*) es un polímero termoplástico. Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80°C y se descompone sobre 140°C.

PE: El polietileno es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$. Por su alta producción mundial (aproximadamente 60 millones de toneladas son producidas anualmente (2005) alrededor del mundo) es también el más barato, siendo uno de los plásticos más comunes. Es químicamente inerte. Se obtiene de la polimerización del etileno (de fórmula química es $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ y llamado eteno por la IUPAC), del que deriva su nombre

pH: Mide la concentración del ion hidrogeno. Se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrogeno

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^{1+})$$

El intervalo de pH para las soluciones acidas es

$$0(\text{acido}) \text{ \AA } 7(\text{neutro}) \text{ \AA } 14(\text{basico})$$

Sulfatos: inorgánicos son las sales del ácido sulfúrico. En la naturaleza se encuentran en forma de yeso (sulfato cálcico dihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), barita (sulfato de bario) o sulfato sódico (Na_2SO_4). Por oxidación se forma de los sulfuros de muchos elementos cuando estos entren en contacto con el oxígeno del aire.

Bibliografía

1. Agencia Norteamericana de protección medioambiental, Invierno 2002, Managing Manure with Biogas Recovery Systems Improved Performance at Competitive Costs, The AgSTAR Program, USA.
2. Arnott M. , 1982, The Biogas/Biofertilizer Business Handbook, Cuerpos de paz.
3. Arens P.L., Algunos datos sobre proyección y utilización del biogás, FAO.
4. Black H., Oct. 18-Nov. 9, 1960, Engineering studies of coffee mill wastes in El Salvador, C.A.,Cincinnati, Robert A. Sanitary Engineering Center, 1961.
5. Carrillo L. 2003. Microbiología Agrícola.
6. Comité en la división de ciencias de cambio climático y estudios de la tierra y la vida, 2001, "CLIMATE CHANGE SCIENCE AN ANALYSIS OF SOME KEY QUESTIONS", Consejo nacional de investigación, Prensa nacional académica, Washington D.C., USA.
7. Curso de Capacitación: "Reciclaje de materias orgánicas y biogás, Una experiencia en China, Chengdu, Sept.- Oct 1984, FAO, oficina regional para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile.
8. Dirección General de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía, 1984, desarrollo de la Biodigestión en Guatemala, Guatemala.
9. FAO, 1984, Better Farming Series 31 - Biogas: What it is; How it is made; How to use it .
10. Fry, L.J., R. Merrill, 1973, Methane digesters for fuel gas and fertilizer, Santa Cruz, California, Nuevo Instituto de Alquimia, Boletín No. 3.
11. Fontana F., Fermentación Anaeróbica De Desechos Orgánicos En El Altiplano, PHI UNESCO.
12. GTZ, "Biogas Digest", Volumen I, Información y servicio de asesoría en tecnología apropiada.
13. Henríquez L., J. Mantilla y M. Niño, 6 Septiembre 2006, Influencia de la temperatura interna en digestores tipo batch cargados con pollinaza, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia.

14. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI), Digestor para biogás, Construcción convencional, Proyecto Leña y fuentes alternas de energía, Hoja de datos técnicos, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
15. Larde G., Conceptos generales sobre digestión anaeróbica, Instituto Salvadoreño de investigaciones del café, Departamento de suelos y química agrícola, El Salvador.
16. Larde G., Flores N., Digestores Anaeróbicos rurales en El Salvador, 1960-1984, Instituto Salvadoreño de Investigaciones del Café, Departamento de suelos y química agrícola, Centro de Tecnologías Agrícola, El Salvador.
17. Lockemann G., 1960, Historia de la Química, Traducción de la 1º edición alemana por Maria Teresa Toral, México D.F., UTEHA.
18. Martin J., 17 Marzo 2003, "A Comparison of Dairy Cattle Manure Management with and without Anaerobic Digestion and Biogas Utilization", Eastern Research Group, Inc., Boston MA, USA.
19. Mattocks R., Barry K., W. Ann, 1992, AgSTAR Handbook and Software, Segunda edición, USA.
20. Merck, 1650, Index of chemicals and Drugs, 9º ed. Monografía.
21. Monterrosa J., Abril 1987, La fermentación anaeróbica y los parámetros que afectan la biodigestion, Proyecto: "investigación de modelos de digestores para producción de biogás, convenio CENTA-ENA-CEL", Santa Tecla, El Salvador.
22. Moser M., Richard M, G. Stacy, R., 1997, Keeping The Neighbors Happy – Reducing Odor While Making Biogas.
23. Muche H., Harald Z., 1985 , The Purification of Biogas, GTZ, GATE.
24. Rene A., R. Víctor, 2004, Producción Anaeróbica De Biogás Aprovechamiento De Los Residuos Del Proceso Anaeróbico, Cámara Nacional De Industrias, IIDEPROQ, La Paz, Bolivia
25. Richard M., B. Kintzer, A. Wilkie, K. Roos, 1992, "AgSTAR Handbook and Software", Segunda edición, USA.

26. Rorres C., Enero 2000, THE TURN OF THE SCREW: OPTIMAL DESIGN OF AN ARCHIMEDES SCREW, Boletín de ingeniería hidráulica, Vol. 126, No. 1.
27. Santa M.F., 1969, "Experiencias en la disposición de los desechos de la industria del café", Tesis, Ing. Civ. San Salvador, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
28. Shigley J., Charles R.M., 1989, Diseño en Ingeniería Mecánica, 5ª edición.
29. Singh, Ram Bux, 1971, Some Experiments with Bio-Gas, Estación de investigación de gas Gorbora, Ajitmal, Etawah (U.P.) India.
30. Thy S., Management and utilization of biodigesters in integrated farming systems, Universidad de Agricultura Tropical Fundación Chamcar Daung, Camboya.
31. Werner U., S. Ulrich, H. Nicolai, 1989, "Biogas plants in Animal Husbandry", GTZ.

ANEXOS