

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN BIODIGESTOR EXPERIMENTAL PARA FINES DIDÁCTICOS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**EDISON RODRIGO RAZO ACHIG
MÍLTON IVÁN VILLAFUERTE LÓPEZ**

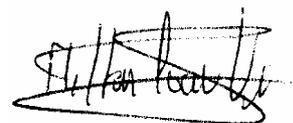
DIRECTOR: Fis. MSc. MARCO YÁNEZ

Quito, marzo 2007

DECLARACIÓN

Nosotros, EDISON RODRIGO RAZO ACHIG Y MÍLTON IVÁN VILLAFUERTE LÓPEZ declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

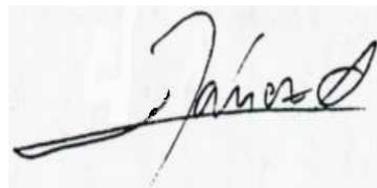
A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Edison Rodrigo Razo Achig		Milton Iván Villafuerte López
---------------------------	--	-------------------------------

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por EDISON RODRIGO RAZO ACHIG y MÍLTON IVÁN VILLAFUERTE LÓPEZ, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yáñez', is centered on a light gray rectangular background.

Fís. MSc. Marco Yáñez
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mis profesores por haberme proporcionado las herramientas para mi desarrollo personal y profesional.

A mi director de tesis, Físico Marco Yáñez, por su guía en la elaboración de esta tesis.

En especial a mis padres por el sacrificio la confianza y el apoyo que me han brindado en todas las etapas de mi vida.

En general, a todas las instituciones, organismos, bibliotecas, que de alguna manera contribuyeron a facilitarme acceso a la información requerida para alcanzar los objetivos trazados en esta tesis.

EDISON RODRIGO RAZO ACHIG

A Dios por bendecirme y cuidarme siempre aunque a veces no lo merezca.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica por formarme profesionalmente.

Al Fis. Marco Yáñez por su colaboración y acertada dirección.

MILTÓN IVÁN VILLAFUERTE LÓPEZ

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis amados padres, Germán y Maria Rosario quienes me enseñaron desde pequeño a luchar para alcanzar mis metas. Mi triunfo es el de ustedes.

A mi esposa, Diana Ruiz y nuestro futuro bebe Sebastián, quien me brindó su amor, su cariño, su estímulo y su apoyo constante,

A mis queridos hermanos, Germania, Andrés y a mi sobrino Josué quienes confiaron en mí.

A ti Víctor Hugo mi hermano querido, que guías nuestras vidas desde el cielo.

EDISON RODRIGO RAZO ACHIG

A mis padres, a quienes adoro y debo todo lo que soy y seré.

A mis hermanos Patricio y Verónica por apoyarme siempre.

A mi cuñado Freddy por cuyo consejo seguí esta querida profesión.

A mis sobrinos Camila, Christian y Pamela a quienes quiero mucho.

A mis amigos y compañeros con quienes pasamos tantos momentos agradables que siempre recordaré.

MÍLTON IVÁN VILLAFUERTE LÓPEZ

ÍNDICE Y CONTENIDO

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 EL BIOGÁS	4
2.1.1 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS.....	4
2.1.2 PRINCIPIOS DE LA COMBUSTION.....	5
2.1.3 EQUIPOS DONDE EL BIOGAS PUEDE SER UTILIZADO.....	5
2.1.4 USOS DEL BIOGAS.....	8
2.2 PROCESOS DE DESCOMPOSICION DE MATERIA ORGANICA	9
2.2.1 DESCOMPOSICION AEROBICA.....	9
2.2.2 DESCOMPOSICION ANAEROBICA.....	10
2.2.2.1 Principios de la descomposición anaeróbica.....	10
2.2.2.2 Prerrequisitos necesarios para iniciar el proceso.....	10
2.2.2.3 Etapas intervinientes.....	11
2.2.2.3.1 <i>Primera etapa llamada periodo de licuefacción</i>	11
2.2.2.3.2 <i>Segunda etapa llamada periodo de acidogénesis</i>	11
2.2.2.3.3 <i>Tercera etapa conocida como periodo productor de metano</i>	12

2.3	CONDICIONES BÁSICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO. ...	13
2.3.1	AMBIENTE ESTRICTAMENTE ANAERÓBICO.	14
2.3.2	TEMPERATURA APROPIADA.	14
2.3.2.1	Fermentación a alta temperatura.	14
2.3.2.2	Fermentación a temperatura media (mesofílico).	14
2.3.2.3	Fermentación a temperatura normal.	15
2.3.3	PH APROPIADO Y ALCALINIDAD.	15
2.3.4	AGITACIÓN.	15
2.3.5	ÁCIDOS VOLÁTILES.	16
2.3.6	SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES.	16
2.3.7	TIPO DE MATERIA PRIMA.	16

CAPÍTULO 3

BIODIGESTORES

3.1	INTRODUCCIÓN.	19
3.2	VENTAJAS DEL USO DE LOS BIODIGESTORES.	19
3.2.1	RELACIONADAS CON EL MEDIO AMBIENTE.	19
3.2.2	ASOCIADO CON EL BIENESTAR FAMILIAR.	20
3.3	FACTORES QUE AFECTAN LA POBLACION MICROBIANA DE LOS BIODIGESTORES.	21
3.3.1	FACTORES AMBIENTALES.	22
3.3.1.1	Especie microbiana.	22
3.3.1.2	pH.	23
3.3.1.3	Concentración de AGV.	23
3.3.1.4	Temperatura.	24
3.3.1.5	Disponibilidad de nutrientes.	24
3.3.1.6	Materiales tóxicos.	25
3.3.1.7	Factores operacionales.	26
3.3.1.8	Tiempo de retención.	26
3.3.1.9	Mezclaje.	26

3.3.1.10	Calentamiento.....	27
3.4	TIPOS DE BIODIGESTORES	27
3.4.1	DIGESTORES DE LOTE (batch).....	27
3.4.1.1	Usos comunes.....	28
3.4.2	DIGESTOR DE REGIMEN SEMICONTINUO.	29
3.4.3	DIGESTOR DE CAMPANA FLOTANTE (TIPO HINDU).....	29
3.4.4	DIGESTOR DE CAMPANA FIJA (TIPO CHINO).....	31
3.4.5	DIGESTORES HORIZONTALES O DE FLUJO PISTON.	32
3.4.6	TIPO TUBULAR	33
3.4.7	DE REGIMEN CONTINUO.....	34
3.4.8	COMPLETAMENTE MEZCLADOS	35
3.4.9	DE DOS ETAPAS.....	35
3.4.10	DE DIGESTION ANAEROBICA SECA.	36

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

4.1	ALTERNATIVAS DE DISEÑO.	37
4.1.1	ALTERNATIVA A: BIODIGESTOR PLÁSTICO TRANSPARENTE CALENTADO MEDIANTE UNA NIQUELINA.	37
4.1.2	ALTERNATIVA B: BIODIGESTOR METÁLICO CON TAPAS DE DURALÓN	39
4.1.3	ALTERNATIVA C: BIODIGESTOR DE METAL CALENTADO MEDIANTE UNA NIQUELINA.	40
4.2	MÉTODO DE SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.....	41
4.2.1	EJEMPLO DE CÁLCULO.	43
4.3	CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTO.....	44
4.3.1	CÁMARA.....	44
4.3.2	CALCULO DE LA CABEZA DEL RECIPIENTE.....	47
4.3.3	CALCULO DEL AISLANTE.....	49
4.4	CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO.....	52
4.5	CÁLCULO DE LA CARGA DEL BIODIGESTOR.....	53

4.5.1	LA MASA SECA (MS, ST).....	53
4.5.2	LA MASA ORGÁNICA SECA (MOS, SVT).....	53
4.5.3	LA CARGA DEL BIODIGESTOR.	53
4.5.4	TIEMPO DE RETENCION (TR).	54
4.6	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.	57
4.7	ANÁLISIS ECONÓMICO.	57
4.7.1	MATERIALES DIRECTOS.	57
4.7.2	MANO DE OBRA DIRECTA.	58
4.7.3	COSTOS INDIRECTOS.	59
4.7.4	COSTOS VARIOS.	60
4.7.5	COSTO TOTAL DE PROYECTO.	60

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES:.....	61
5.2	RECOMENDACIONES.	63

BIBLIOGRAFÍA.....	65
--------------------------	-----------

ANEXOS

ANEXO 1	FOTOGRAFÍAS DE LAS PRUEBAS DE PRESIÓN ALTERNATIVA A.....	68
ANEXO 2	FOTOGRAFÍAS DE CONSTRUCCIÓN Y CARGA DEL PROTOTIPO.....	71
ANEXO 3	DIAGRAMAS ELÉCTRICOS	77
ANEXO 4	PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Características del biogás	4
Tabla 2.2	Aplicaciones del biogás	5
Tabla 3.1	Ventajas y desventajas de un biodigestor de campana flotante	30
Tabla 3.2	Ventajas y desventajas de un biodigestor de campana fija	31
Tabla 3.3	Ventajas y desventajas de un biodigestor horizontal	32
Tabla 4.1	Asignación de jerarquía para cada atributo	42
Tabla 4.2	Puntuaciones de atributos y valores de evaluación de las alternativas	42
Tabla 4.3	Resultado del método de atributos ponderados	43
Tabla 4.4	Resultados aplicando método iterativo	52
Tabla 4.5	Valores y características de algunos materiales orgánicos	56
Tabla 4.6	Material sólido (MST) y material orgánico sólido (MSO) de algunos desechos vegetales y posible producción de biogás	56
Tabla 4.7	Costo de los materiales directos	57
Tabla 4.8	Costos de mano de obra directa	58
Tabla 4.9	Costos indirectos	59
Tabla 4.10	Gastos de movilización y transporte	59
Tabla 4.11	Costo total del proyecto	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Alternativas de utilización de un metro cúbico de biogás	7
Figura 2.2	Usos del biogás	9
Figura 2.3	Productos finales de la descomposición orgánica	18
Figura 3.1	Biodigestor de Lote (Batch)	28
Figura 3.2	Biodigestor de campana flotante	30
Figura 3.3	Biodigestor de campana fija	32
Figura 3.4	Biodigestor horizontal	33
Figura 3.5	Biodigestor tubular	34
Figura 4.1	Alternativa A	38

Figura 4.2	Alternativa B	39
Figura 4.3	Alternativa C	40
Figura 4.4	Esfuerzos en recipientes sometidos a presión interna	45
Figura 4.5	Cabeza elipsoidal	48
Figura 4.6	Determinación de la superficie de control	50

SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
pH	potencial hidrógeno.
AGV	ácidos grasos volátiles.
C/N	relación carbono – nitrógeno.
TR	Tiempo de retención.

RESUMEN

El siguiente proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico consta de cinco capítulos:

En el primer capítulo se detalla los objetivos, alcance y justificación del presente proyecto, basándose en la necesidad por la cual estamos atravesando debido a que los recursos provenientes del petróleo a más de ser una causa para el continuo deterioro de nuestro planeta están por terminarse a corto tiempo, y se ve la necesidad de encontrar un tipo de energía alternativa que sea una solución viable y no continuar sufriendo los efectos de la utilización de los derivados del petróleo.

En el segundo capítulo se da una explicación del biogás composición, forma de obtención, ventajas, usos, aplicaciones, procesos de descomposición de materia orgánica, etapas intervinientes y condiciones básicas para la obtención del biogás.

El capítulo tres se detalla lo que es un biodigestor, clasificación, funcionamiento, ventajas, desventajas aplicaciones dependiendo de la materia prima a descomponer y el lugar donde van a funcionar.

El capítulo cuatro consta del diseño, elección de la mejor alternativa para los objetivos propuestos, cálculo de la carga de biodigestor, detalle y costo de su construcción.

En el capítulo cinco se detallan las conclusiones y recomendaciones que surgieron durante la realización de este proyecto con el objetivo de proporcionar una guía para posteriores investigaciones dentro de esta área.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto nace de la necesidad de encontrar una forma alternativa de producción de energía que sea capaz de disminuir la actual dependencia de los derivados del petróleo.

Por la preocupación del Laboratorio de Energías Alternativas de brindar a los estudiantes de la EPN y del país un modelo para fines didácticos donde se puede observar la obtención de biogás a base de aprovechar los recursos naturales y desechos orgánicos que se producen en gran cantidad dentro y mas aun fuera de la ciudad.

Se realizó un estudio de biodigestores con la finalidad de encontrar el más adecuado para cubrir necesidades de rendimiento y tiempos de producción de biogás.

La construcción de este biodigestor da como resultado la obtención de gas metano que sirve como un combustible de similares características al gas licuado de petróleo.

Se expone en imágenes el proceso de construcción y prueba del biodigestor para que sirva de guía en la elaboración de futuros proyectos. El presente trabajo servirá como una referencia para la construcción de biodigestores a gran escala en las comunidades.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.⁽¹⁾

A raíz de las crisis energéticas de los años setenta y de la necesidad planteada en la cumbre económica mundial en 1978 en Nairobi, de desarrollar programas energéticos específicos para los países en vías de desarrollo entonces aquejados por su alta dependencia de importaciones de crudo, la República Federal de Alemania concibió el programa Especial de Energías Renovables para diversos proyectos de cooperación técnica.

Objetivo principal de este programa es contribuir a mejorar el abastecimiento de energía de países en desarrollo y aminorar los entonces ya visibles efectos ecológicos de la erosión producida por la sobre explotación de madera.

Con el fin de reducir la dependencia tecnológica de los países industrializados, el programa debería fomentar la producción local de las tecnologías a implementar y usar al máximo posible las capacidades de investigación y desarrollo existentes en los países.

Para la realización práctica del programa, se escogieron inicialmente diez países con distintas estructuras socio-económicas y diversos recursos energéticos: Sudan, Kenia, Tanzania, Malí Níger, Senegal en África. Las Filipinas en Asia. Perú y Colombia en Latinoamérica.

Para la planeación y ejecución de los proyectos, el gobierno alemán en el año de 1979, designó a la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, la cual elaboró para cada país un estudio energético en los que se estudian los recursos físicos e institucionales existentes, así como las posibilidades de implementar tecnologías apropiadas para el uso de energéticos renovables, en los campos de:

- Energía solar fotovoltaica y termodinámica.
- Energía eólica.
- Biogás.
- Biomasa.
- Energía solar térmica.
- Energía hidráulica.

Dentro de este campo, los sistemas de biogás se revelan como los de más inmediata y segura aplicación, con recursos renovables y prácticamente inagotables con costos razonables. Por otro lado prestan diversas ventajas a saber: no utilizan combustibles fósiles agotables, reducen la peligrosidad y la contaminación de los residuos portadores de gérmenes patógenos, eliminan el olor desagradable de los desechos, no producen desequilibrio en el ecosistema y finalmente como subproducto se obtiene un efluente con altas propiedades biofertilizantes que también puede utilizarse para el enriquecimiento de estanques dedicados al desarrollo de algas, cría de patos y peces, con alto contenido proteínico para utilizarlo en alimentación de animales.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar, construir y probar un biodigestor experimental para fines didácticos a utilizarse en el laboratorio de Energías alternativas y Eficiencia Energética; que aproveche la biomasa animal y vegetal como parte del sustrato para la obtención de biogás, con el propósito de obtener un modelo de utilidad que sirva como referencia para el desarrollo de sistemas de aplicación de campo, en especial en comunidades marginales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Diseñar y construir un prototipo experimental de laboratorio para realizar estudios del gas producido.
- Construir un modelo de biodigestor que permita optimizar la biodegradación de desechos animales y vegetales, y que sirva como parámetro para diseños que se puedan aplicar en regiones donde sea necesario.
- Contribuir con el Laboratorio de Energías Alternativas para la difusión de las ventajas del uso de biodigestores en prácticas de laboratorio.

1.3 ALCANCE.

En este trabajo se propone generar un modelo que permita la utilización de desechos animales y vegetales para la producción de biogás, mediante un método relativamente simple y de bajo costo.

1.4 JUSTIFICACION.

Muchas zonas marginales del país en la actualidad no cuentan con energía eléctrica para realizar las actividades normales que hace todo individuo, por lo que se han visto en la triste obligación de vivir como hace siglos atrás, en la oscuridad. Con este trabajo se pretende dar una guía para que esta gente pueda contar con una fuente de energía inagotable de bajo costo y muy segura; para que de esta manera puedan ahorrar o sustituir, si tienen los medios, el uso de energía eléctrica, además de contribuir con el medio ambiente y de obtener un bio abono de alta calidad.

Además este proyecto nace de la necesidad de tener un prototipo para prácticas del laboratorio, para que los estudiantes de la EPN y del país, tengan una mejor visión de la utilidad y beneficio de este tipo de fuente de energía alternativa.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO.

2.1 EL BIOGÁS.⁽²⁾

2.1.1 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

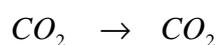
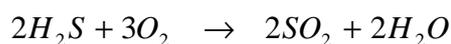
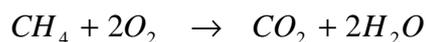
Se llama biogás a la mezcla constituida por metano (CH₄), en una proporción que oscila entre un 60% a un 65% y dióxido de carbono (CO₂), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Sus características han sido resumidas en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1 Características del biogás.⁽²⁾

CARACTERISTICAS	CH ₄	CO ₂	H ₂ -H ₂ S	OTROS	BIOGAS 60/40
Proporciones % Volumen	55-70	27- 44	1	3	100
Valor Calórico MJ/m ³	35.8	--	10.8	22	21.5
kCal/m ³	8600	--	2581	5258	5140
Ignición % en aire	5-15	--	--	--	6-12
Temp. Ignición (°C)	650-750	--	--	--	650-750
Presión critica (Mpa)	4.7	7.5	1.2	8.9	7.5-8.9
Densidad nominal (g/l)	0.7	1.9	0.08	--	1.2
Densidad relativa	0.55	2.5	0.07	1.2	0.83
Inflamabilidad Vol. % en aire	5-15	--	--	--	6-12

2.1.1 PRINCIPIOS DE LA COMBUSTION.

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO₂ y agua, H₂O. La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas.⁽³⁾



2.1.2 EQUIPOS DONDE EL BIOGÁS PUEDE SER UTILIZADO.

En la **Tabla 2.2** se han listado los principales artefactos que utilizan biogás, su consumo medio y su eficiencia.

Tabla 2.2 Aplicaciones del biogás.⁽¹⁾

ARTEFACTO	CONSUMO MEDIO	RENDIMIENTO (%)
Quemador de cocina	300-600 l/h	50 – 60
Lámpara (60W)	120-170 l/h	30 – 50
Heladera de 100 L	30-75 l/h	20 – 30
Motor a gas	0.5 m ³ /kWh o Hph	25 – 30
Quemador de 10 Kw.	2 m ³ /h	80 – 90
Infrarrojo de 200 W	30 l/h	95 – 99
Cogenerador	0.5 m ³ /kWh: 1 kW elect. 2 kW térmica	hasta 90

Las cocinas y calentadores son fácilmente modificables, agrandando ó disminuyendo el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala, en especial en nuestro país.

Las lámparas a gas tienen una muy baja eficiencia y el ambiente donde se las utilice debe estar adecuadamente ventilado para disipar el calor que generan. Las heladeras domésticas constituyen un interesante campo de aplicación directa del biogás debido a que tienen un consumo parejo y distribuido a lo largo de las 24 horas del día, lo cual minimiza la necesidad de almacenaje del gas. Recientemente se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y/u otros productos agrícolas lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del mismo.

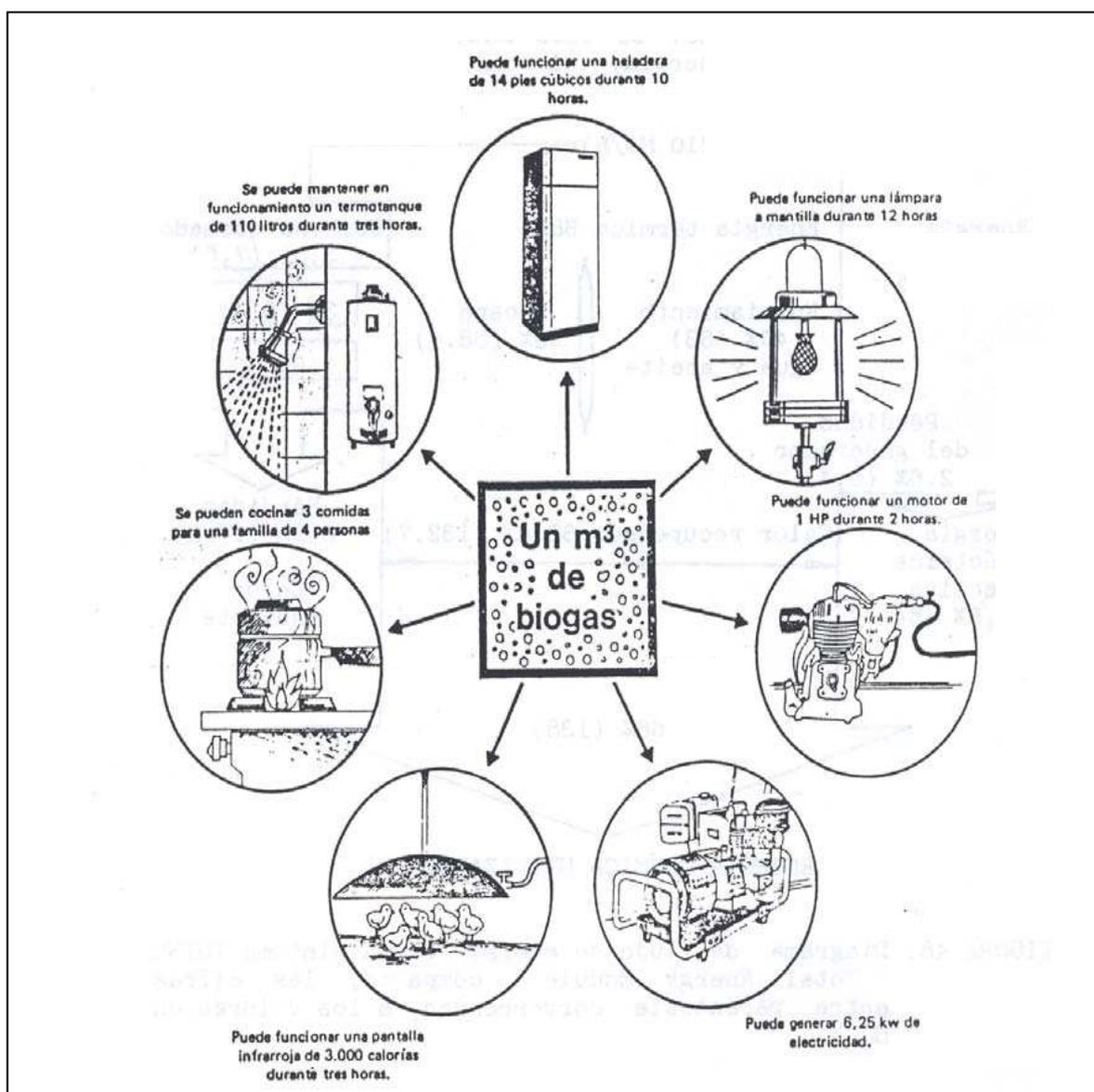
Los quemadores infrarrojos comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes (especialmente en criaderos y parideras) presentan como ventaja su alta eficiencia, lo cual minimiza el consumo de gas para un determinado requerimiento térmico. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido.

En los motores de Ciclo Otto, el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen funcionando con un 100% de biogás, con una merma de la potencia máxima del 20% al 30%. A los motores de Ciclo Diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control, manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás y diesel, así también pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual los hace muy confiables. Se ha observado que la proporción de H_2S en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los

aceites lubricantes. El grado de deterioro en los motores varía considerablemente y los resultados obtenidos experimentalmente suelen ser contradictorios.

Los motores a biogás tienen amplio espectro de aplicación siendo los más usuales: el bombeo de agua; el picado de raciones y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural; el otro uso muy generalizado es su empleo para activar generadores de electricidad. En la **Figura 2.1**, se muestran distintas alternativas de utilización de un metro cúbico de biogás, con sus respectivos consumos.

Figura 2.1 Alternativas de utilización de un metro cúbico de biogás.⁽²⁾



Un capítulo aparte merecen los sistemas de cogeneración. Dichos sistemas buscan la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás.

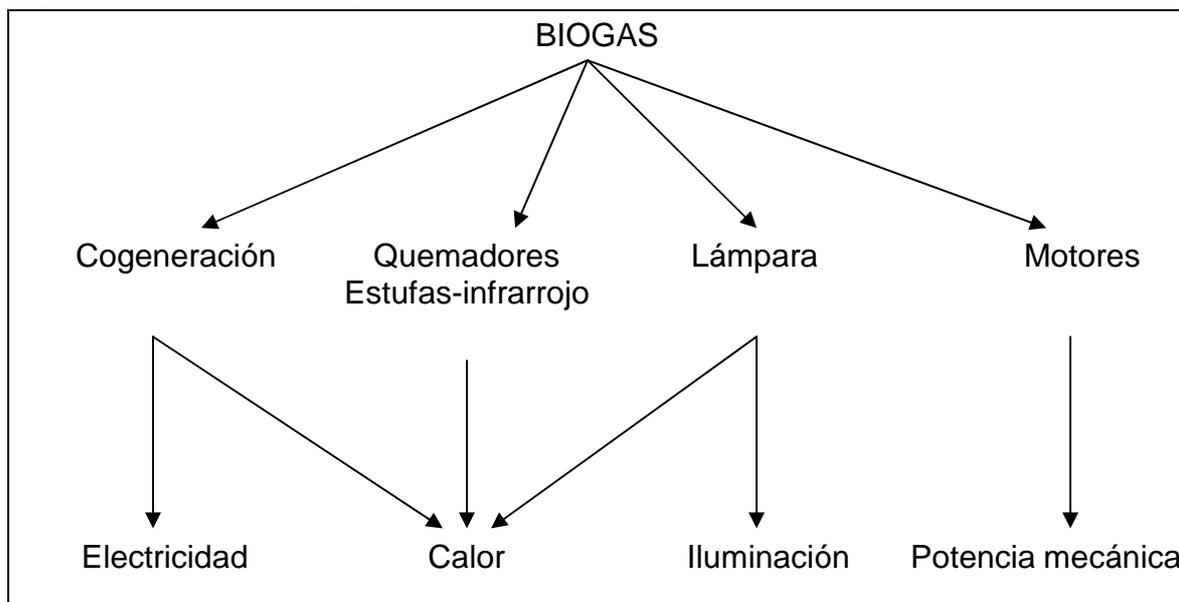
En estos casos la potencia mecánica provista por el eje del motor es aprovechada para generar electricidad a través de un generador. Simultáneamente y por medio de una serie de intercambiadores de calor ubicados en los sistemas de refrigeración (agua y aceite) del motor y en la salida de los gases de escape, se recupera la energía térmica liberada en la combustión interna. De este modo se logra un mejor aprovechamiento de la energía.

La difusión de estos sistemas estará condicionada por la rentabilidad final. Sin embargo representa la utilización más racional del biogás ya que se obtiene una forma de energía extremadamente dúctil como la electricidad, al mismo tiempo que una fuente de calor muy necesaria para la calefacción de digestores en zonas frías. El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Sin embargo su difusión está limitada por una serie de problemas:

- A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.
- La conversión de los motores es cara y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.
- Por último la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de uso.

2.1.3 USOS DEL BIOGAS.

En principio, el biogás puede ser utilizado en cualquier tipo de equipo comercial para uso como gas natural, la **Figura 2.2** resume estos posibles usos.

Figura 2.2 Usos del biogás.⁽²⁾

2.2 PROCESOS DE DESCOMPOSICION DE MATERIA ORGANICA.⁽²⁾

El biogás es producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de materia orgánica en condiciones anaeróbicas, que artificialmente se obtiene en biodigestores.

Este proceso de biodegradación de materia orgánica se da por dos vías:

2.2.1 DESCOMPOSICION AEROBICA.

El oxígeno es el receptor de los electrones desprendidos en la descomposición biológica o degradación. Los organismos aerobios emplean la energía desprendida en el fenómeno de la descomposición para sus procesos de crecimiento y reproducción, y al mismo tiempo liberan una cantidad de calor.

$$\Delta \text{Energía} = \text{Biomasa} + \text{Calor} \quad (2.1)$$

2.2.2 DESCOMPOSICION ANAEROBICA.

Es, en la que el agente receptor de los electrones desprendidos de la degradación es otro compuesto distinto al oxígeno. Para el caso de la digestión anaeróbica la energía desprendida del proceso de descomposición es receptada por los enlaces de metano. La energía restante se emplea, al igual que en la descomposición aerobia, en los procesos metabólicos y en liberación de calor.

$$\Delta\text{Energía} = \text{Biomasa} + \text{Calor} + \text{CH}_4 \quad (2.2)$$

El biodigestor a desarrollarse, empleará éste fenómeno de biodegradación. El proceso por el cual se obtiene el biogás es una fuente de energía renovable, que se obtiene a partir de sustratos de escaso valor económico y que, además, son una fuente de contaminación y enfermedades.

2.2.2.1 Principios de la descomposición anaeróbica.

La generación de biogás, mezcla constituida fundamentalmente por metano (CH₄) dióxido de carbono (CO₂), pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (SH₂) y nitrógeno (N), constituye un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza.

Las bacterias metanogénicas, en efecto constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Se estima que anualmente la actividad microbiológica libera a la atmósfera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano.

2.2.2.2 Prerrequisitos necesarios para iniciar el proceso.⁽¹⁾

La fermentación anaeróbica involucra a un complejo número de microorganismos de distinto tipo, los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos principales. La real producción de metano es la última parte del proceso y no ocurre si no han actuado los primeros dos grupos de microorganismos.

Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno atmosférico. Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual será necesario un mantenimiento casi constante de los parámetros básicos como la temperatura.

Las dificultades en el manejo de estas delicadas bacterias explican que la investigación sistemática tanto de su morfología como de la bioquímica fisiológica sólo se halla iniciado hace cincuenta años.

Hoy en día gracias a estudios muy recientes podemos conocer mejor el mecanismo y funcionamiento de este complejo sistema microbiológico involucrado en la descomposición de la materia orgánica que la reduce a sus componentes básicos CH_4 y CO_2 .

2.2.2.3 Etapas intervinientes.⁽¹⁾

Las diferentes etapas intervinientes y sus principales características son:

2.2.2.3.1 Primera etapa llamada periodo de licuefacción.

Enzimas extracelulares de ciertas bacterias tales como celulosa, lipasa, proteasa, etc., hidrolizan externamente la materia orgánica. Así por ejemplo, los polisacáridos son metabolizados a mono y disacáridos, las proteínas a polipéptidos y aminoácidos, las grasas a glicerol y ácidos grasos. En otras palabras, la materia orgánica sólida es transformada en materia soluble.

2.2.2.3.2 Segunda etapa llamada periodo de acidogénesis.

Los productos de la primera fase penetran en las células bacterianas, donde por medio de endoenzimas son transformados a compuestos macromoleculares tales

como ácidos grasos, alcohol, etc. Las fases de licuefacción y acidogénesis son procesos consecutivos que juntos se conocen como período no productor de metano.

En este período, debido a la acción conjunta de varios tipos de microorganismos, la materia prima se descompone bajo condiciones anaeróbicas, en compuestos micromoleculares simples: dióxido de carbono e hidrógeno. Ácidos de bajo peso molecular, alcohol, CO_2 e H_2 son todos sustratos para la síntesis de metano. Por lo tanto, el período no productor de metano puede verse como un proceso en el que la materia orgánica compleja es convertida en sustancias que pueden ser usadas por las bacterias productoras de metano y que son necesarias para su subsistencia y actividad normal. Los microorganismos que tienen importancia en la fase no productora de metano son especies muy diversas, dependiendo del tipo de materia prima que se desee fermentar.

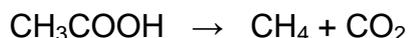
Las bacterias estrictamente anaeróbicas tienen un papel muy importante en este período y su población puede ser 200 ó 300 veces mayor que la de las bacterias aeróbicas facultativas y aeróbicas. La presencia de microorganismos productores de H_2 en este período es fundamental, ya que el hidrógeno debe estar presente a la hora de la producción de metano por reducción de CO_2 .

2.2.2.3.3 Tercera etapa conocida como periodo productor de metano.

En esta etapa los sustratos producidos son transformados a metano por la acción de un grupo particular de bacterias, que requieren de un ambiente estrictamente anaeróbico, son muy sensibles al oxígeno y a otros tipos de agentes oxidantes. Hasta la fecha se han identificado cuatro géneros y once especies de bacterias.

El metano se puede formar de 3 maneras mediante el metabolismo bacteriano, que son las siguientes:

- Fermentación del ácido acético:

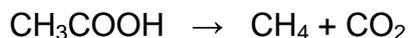


- Fermentación del ácido propiónico:

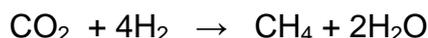
1era. etapa



2da. etapa



- Reducción del dióxido de carbono:



El producto final puede llegar a tener un 60% de metano y un 40% de CO_2 dependiendo estos valores de la calidad de la materia prima.

Dependientes uno de otro, los tres períodos de fermentación anaeróbica son procesos sucesivos y mantienen un balance dinámico. Cualquier desequilibrio puede incluso detener el proceso.

2.3 CONDICIONES BÁSICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO.⁽¹⁾

Para obtener un proceso eficiente de fermentación y por consiguiente una buena producción de gas, es necesario asegurar las siguientes condiciones básicas requeridas por las bacterias productoras de metano para realizar su actividad vital normal (crecimiento, desarrollo, multiplicación, etc.).

2.3.1 AMBIENTE ESTRICTAMENTE ANAERÓBICO.

Los microorganismos principales para el proceso son estrictamente anaeróbicos. La descomposición de la materia orgánica en ambientes aeróbicos produce CO_2 mientras que en condiciones anaeróbicas resulta en metano (CH_4). Por lo tanto, es esencial construir un digestor bien sellado para lograr un ambiente estrictamente anaeróbico y también para evitar escapes del gas que se produce.

2.3.2 TEMPERATURA APROPIADA.

La temperatura afecta directamente la tasa de producción de biogás. Este puede ser producido a cualquier temperatura entre los 5°C , y los 60°C . Dentro de este rango entre más alta la temperatura mayor será la producción de gas. Pueden ser identificados tres rangos de temperatura: alta, media y normal.

2.3.2.1 Fermentación a alta temperatura.

En un rango de temperatura entre los 47 y 55°C la producción de gas puede llegar a ser de 2 a 2.5 m^3 de gas. Este proceso, llamado "termofílico", es de alta eficiencia pero no muy económico desde el punto de vista de energía requerida para calentar y mantener el digestor dentro del rango de temperatura antes mencionado. Además la materia prima sería digerida mucho más rápido por lo que se necesita mucha cantidad de desechos.

2.3.2.2 Fermentación a temperatura media (mesofílico).

A temperaturas entre los 35 y 38°C la producción diaria de gas puede estar entre 1 y 1.5 m^3 de gas.

2.3.2.3 Fermentación a temperatura normal.

Si la temperatura dentro del digestor se encuentra entre los 22 y 28°C, se puede obtener un promedio de 0.2 - 0.5 m³ de gas. Si la temperatura es inferior a los 22°C la producción puede descender hasta 0.15 m³ por volumen de digestor. De manera que, a estas temperaturas, se deben tomar medidas efectivas para calentar el digestor y obtener una mayor producción de metano.

2.3.3 PH APROPIADO Y ALCALINIDAD.

El pH dentro del digestor tiene un impacto muy importante en la actividad biológica de las bacterias productoras de gas. El proceso normal requiere un valor de pH constante, aproximadamente neutro (pH 7) o ligeramente mayor y esto se logra mediante la acción del bicarbonato. Si el pH desciende de valores inferiores a 7 la producción de metano decrece notablemente.

Una vez que se ha llenado el digestor, el tiempo que dura para obtenerse el pH adecuado depende de la temperatura, la clase y la cantidad de materia prima utilizada.

Una mezcla inadecuada de materiales o métodos de manejo inapropiados harían que los ácidos volátiles se acumulen en gran cantidad, resultando en una caída del valor de pH. La operación normal del biodigestor se alteraría y por tanto la producción de gas se reduciría. En tales casos se debe reajustar el pH.

2.3.4 AGITACIÓN.

Un aumento en la producción de gas está relacionado con la agitación frecuente de la mezcla. Cuando la mezcla está en reposo se pueden diferenciar en ella tres capas:

- La capa superior o nata en donde hay todavía mucha materia prima pero pocas especies de bacterias para fermentación. Si esta nata es muy espesa el paso de gas se ve bloqueado.
- La capa intermedia está constituida por gran cantidad de agua y poca materia prima.
- La capa del fondo formada por los desechos de sedimentación, y en la que tanto la materia prima como las bacterias son abundantes.

2.3.5 ÁCIDOS VOLÁTILES.

La determinación de los ácidos volátiles indica cuánto alimento hay disponible para la formación de metano. Sin embargo una excesiva cantidad de ácidos pueden envenenar la mezcla y reducir el pH, disminuyendo así la producción de biogás. Si la razón, alcalinidad: ácidos volátiles, está sobre dos, el bicarbonato puede neutralizar los ácidos en el digestor previniendo una caída en el pH.

2.3.6 SÓLIDOS TOTALES Y SÓLIDOS VOLÁTILES.

Los sólidos totales representan la porción seca de la materia prima. Los sólidos volátiles son la porción de materia orgánica volátil contenida en los sólidos totales. La determinación de estos dos factores es importante para obtener las materias primas apropiadas para el digestor porque de ello dependerá el potencial de producción de biogás.

2.3.7 TIPO DE MATERIA PRIMA.

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar

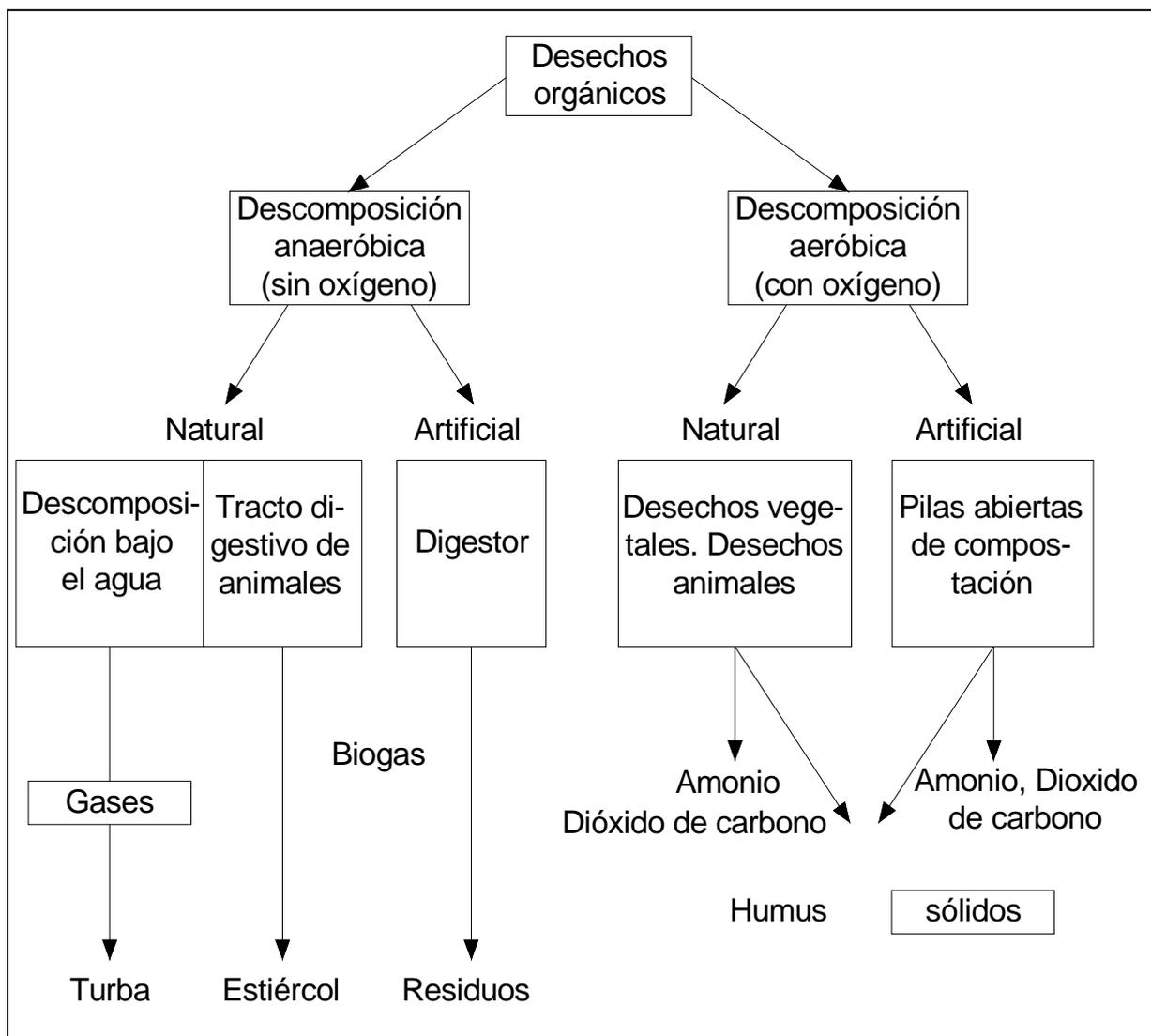
presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico. Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina.

En cuanto a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias entre distintos autores. Esto es debido al sinnúmero de factores intervinientes que hacen muy difícil la comparación de resultados.

Como norma se deberá tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico sólo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas. En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se emplazará el digestor.

En la **figura 2.3** se muestra la producción de biogás desde los desechos orgánicos.

Figura 2.3 Productos finales de la descomposición orgánica.⁽¹⁾



CAPÍTULO 3

BIODIGESTORES

3.1 INTRODUCCIÓN.

El biogás se produce en un recipiente cerrado o tanque denominado biodigestor, el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo, cemento, metal o plástico. El biodigestor de forma cilíndrica o esférica, posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, estiércol animal o humano, las aguas sucias de las ciudades, residuos de matadero, etc) en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor. Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

3.2 VENTAJAS DEL USO DE LOS BIODIGESTORES.⁽³⁾

Los biodigestores se constituyen en una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias, pues con su instalación, se derivan una serie de ventajas, las cuales, se agruparán en:

3.2.1 RELACIONADAS CON EL MEDIO AMBIENTE.

- Reducción de la producción del CO₂: el excremento en estado natural expulsa grandes cantidades al espacio de este gas, que es uno de los más perjudiciales para la capa de ozono y el calentamiento global.
- Evita los malos olores entre el 90 y 100%: esta situación es la que perjudica a los vecinos que habitan cerca de las actividades pecuarias (porquerizas) y provoca gran cantidad de quejas ante las autoridades.

- Se evita en un 100% la contaminación de suelos y agua: los excrementos constituyen uno de los elementos más contaminantes de nuestro medio ambiente.
- Se evita la corta de árboles para ser utilizados en la cocción: los biodigestores son una de las grandes posibilidades para evitar la tala desmedida que se está produciendo.
- Producción de fertilizante orgánico: es una opción para cambiar la agricultura tradicional por una orgánica, el aporte del biodigestor es una excelente alternativa.
- No se produce humo: este es uno de los males que afectan la salud de las amas de casa que cocinan con leña.
- No se da la proliferación de insectos: en las actividades pecuarias abundan los insectos, especialmente moscas y zancudos.
- La leña que se utilizaría en la cocción de los alimentos se deja en el campo y tiene gran importancia como abono orgánico, a la vez también retiene la escorrentía del agua y permite mejorar las condiciones del suelo; ejemplo: leña de café.
- Control de patógenos: aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha demostrado experimentalmente que alrededor del 85% de los patógenos no sobreviven al proceso de biodigestión.

3.2.2 ASOCIADO CON EL BIENESTAR FAMILIAR.

- El hollín de los trastos, techo y toda la casa de habitación, cuando se cocina con leña es inevitable, la familia tiene que construir una cocina aparte de la casa para evitar los efectos del humo. Además, debe invertir para la reposición de trastos y techo para su casa, lo que se traduce en un gasto económico muy alto.
- No hay peligro de explosiones, el cilindro de gas tradicional siempre es un peligro constante; el biodigestor nunca podrá ser una amenaza dentro de su casa.
- Mejora la economía familiar.

- Es muy rápido para cocinar. Este gas tiene una llama azul con una alta concentración de calor, lo que facilita una cocción rápida.
- El fuego del biodigestor se prende solo cuando se ocupa. En el caso de cocinas con leña, ésta debe estar todo el día prendida y supone peligros, como cuando se caen tizones, que atentan con quemar la casa.
- En el caso de las porquerizas, existen muchos problemas y el biodigestor le permite a sus usuarios mantenerse como un productor de cerdos, con un manejo adecuado de los desechos que además mejora sus ingresos.
- Las reparaciones del biodigestor son sencillas. Cuando se tiene un conocimiento mínimo de cómo manejarlo, se puede realizar sin problemas.
- Es una inversión de bajo costo para la familia; muchos materiales los puede obtener de cualquier finca y gran parte de la mano de obra la aporta la familia y el técnico sólo debe ofrecer la asesoría.
- Es una inversión para muchos años. Según datos, los materiales utilizados en la construcción del biodigestor, garantizan que será una actividad que dura hasta 30 años y más.
- El mantenimiento es de bajo costo. En lo que se puede llegar a tener problemas es en el plástico pero este se puede cambiar o reparar sin mucha inversión de dinero.

3.3 FACTORES QUE AFECTAN LA POBLACION MICROBIANA DE LOS BIODIGESTORES.⁽¹⁾

El funcionamiento de un biodigestor es similar al de la digestión de los rumiantes. En ambos, la condición principal es el estado anaeróbico; el proceso se basa en la fermentación del material orgánico y la finalidad es la producción de energía. En el caso de los rumiantes se producen ácidos grasos volátiles (AGV) que son recursos energéticos para el animal y en los digestores se produce metano, un recurso energético utilizado por el hombre.

La recirculación de desechos tiene además la ventaja de que es una forma de mantener al medio ambiente libre de contaminación. Al trabajar con biodigestores, deben tomarse en cuenta tanto factores ambientales como operacionales que afectan directa o indirectamente su funcionamiento y eficiencia, o más bien, que afectan a la población microbiana del digestor. Entre los factores ambientales tenemos: temperaturas, pH, concentración de AGV, disponibilidad de nutrientes y otros. Como factores operacionales cuentan: porcentaje de sólidos presentes, naturaleza del sustrato, mezcla presente, tiempo de retención, efecto del diseño y calentamiento.

3.3.1 FACTORES AMBIENTALES.

3.3.1.1 Especie microbiana.

Aunque la condición anaeróbica se presenta en el biodigestor y en la digestión de los rumiantes, ambos procesos tienen diferencias entre sí. Por ejemplo: los rumiantes, la mayoría de las veces, ingieren material fresco; en cambio, en el digestor solo entran desechos, compuestos entre otras cosas por celulosa, lignina, polisacáridos, residuos de desechos humanos, papel, células intestinales, desechos de mataderos y grasas.

Tanto los desechos como el alimento animal contienen miles de bacterias por gramo, muchas de ellas son facultativamente aeróbicas o anaeróbicas. Cuando se ha tratado de determinar el tipo de bacterias presentes en digestores usando métodos para tipo ruminal, se ha visto que las facultativamente anaeróbicas forman gran parte de la población.

Se ha investigado cuáles son exactamente las bacterias formadoras de metano, aunque todavía no se tiene una respuesta definitiva. Se ha encontrado que el mejor sustrato para estas bacterias son los componentes simples que caen dentro de estos grupos:

- a) Ácidos grasos de 1 a 6 carbonos.

- b) Alcoholes de 1 a 5 átomos de carbono.
- c) CO_2 , H_2 , y CO .

3.3.1.2 pH.

las bacterias metanogénicas son afectadas por las fluctuaciones del pH. Este obedece a la función del sistema alcalino de bicarbonato, del CO_2 y de la concentración de AGV. La alcalinidad protege de fluctuaciones del pH y éste se mantiene por el CO_2 durante la formación de metano. Se ha encontrado que el pH óptimo para la producción de biogás es de 7 a 8 o sea, neutro o ligeramente alcalino. Al comenzar la producción de las bacterias, se forman ácidos, por lo que el pH puede acidificarse, pero luego que se estabiliza la producción, tiende a normalizarse.

En digestores de aguas estancadas, se puede elevar el pH con la adición de cal (hidróxido de calcio), que es altamente alcalino, pero que presenta la desventaja de que se puede combinar con el CO_2 y formar carbonato de calcio, que por ser poco soluble en agua, puede formar incrustaciones que interfieren en la eficiencia del calentamiento del digestor (en caso de que sea un digestor calentado), y que ocupan espacio dentro del mismo.

3.3.1.3 Concentración de AGV.

Cuando las bacterias degradan el material orgánico, se forman los ácidos grasos volátiles (AGV). En este momento puede fluctuar el pH, de modo que en un digestor habrá problemas cuando la acumulación de AGV sea alta. Quizá el problema es mayor en digestores provistos con material fresco. Este es punto controversial en los estudios, unos dicen que la concentración tóxica es alrededor de 2000 mg, AGV/litro, otros que la acidez que se asocia a ello es la causa de la toxicidad.

3.3.1.4 Temperatura.

La digestión anaeróbica ocurre en un rango de temperatura que va desde 5°C hasta 55°C. La temperatura que tenga el digestor determina la especie bacteriana que puede vivir en esas condiciones. Se han reportado tres clases diferentes de bacterias: criofílicas, que viven en temperaturas menores de 20°C, mesofílicas que viven en rangos de 20°C a 45°C y por último las termofílicas en rangos mayores de 45°C.

La producción de gas crece a medida que aumenta la temperatura pero decrece después de que pasa los 40°C, quizás porque disminuye la cantidad de bacterias que pueden vivir en tales circunstancias; por el gasto de energía que se requiere para operar un digestor en tal condición; y porque las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambios ambientales.

Se ha encontrado que la temperatura óptima para la digestión es de 30°C a 35°C, pues se combinan las mejores condiciones para el crecimiento de las bacterias y la producción de metano, con un corto tiempo de retención de los desechos en el digestor.

3.3.1.5 Disponibilidad de nutrientes.

Dependiendo de la materia prima que se use para aprovisionar el digestor, las proporciones de nutrientes disponibles para la bacteria serán diferentes. Si se usan aguas estancadas como materia prima, el material se comporta como líquido, si se usan desechos de animales, será semi-sólido y si se emplean desechos vegetales, el material se considera sólido.

En cuanto a los nutrientes propiamente dichos, es de gran importancia la razón C:N (relación carbono - nitrógeno). Se ha encontrado que lo óptimo es 25:1. Si hay mucho carbono y pequeña cantidad de nitrógeno, la bacteria no puede utilizar todo el carbono presente y la degradación de la materia orgánica será ineficiente.

Si la presencia de nitrógeno es alta, no habrá en qué utilizarlo y se acumulará principalmente en forma de amoníaco (NH_3) que puede inhibir el crecimiento de las bacterias o producir su muerte, especialmente de las productoras de metano.

Las bacterias también necesitan fosfatos y aunque su exceso no es tan grave, su carencia inhibiría el proceso. La razón C:P (relación carbono - fósforo) óptima es de 150:1. El azufre es también necesario pero se requiere menos que el fosfato, Sin embargo, si los desechos contienen azufre en forma de ácido sulfhídrico (H_2S) al quemar el metano se presentan problemas de corrosión.

También son necesarios, en pequeñas concentraciones, los siguientes elementos: calcio, magnesio, potasio, hierro y zinc. El monóxido de carbono es necesario para la reacción de metanogénesis. Las bacterias necesitan vitaminas para su crecimiento, pero ellas mismas sintetizan las que necesitan. Si la bacteria no dispone, habrá quien se las facilite dentro de la población.

3.3.1.6 Materiales tóxicos.

Frecuentemente, los sistemas biológicos se ven afectados cuando la concentración de los componentes rebasa los niveles normales. Las bacterias metanogénicas son afectadas por la elevación de la cantidad de NH_3 , particularmente cuando el pH es inferior a 7. No hay consenso sobre la forma en que las afecta la alta concentración de AGV. También la presencia de iones de sodio y potasio en concentraciones altas puede afectar, y por esto se usa el hidróxido de calcio para elevar el pH de los digestores.

Las sales de metales pesados pueden ocasionar problemas, pero en condiciones alcalinas y en presencia de sulfito, precipitan y tienen poco efecto sobre el sistema. La presencia de cobre es un problema cuando se utilizan desechos de cerdos, pues éstos contienen alrededor de 8.0 mg/l y el proceso se inhibe con solo 200 mg/l.

Los materiales sintéticos tóxicos (detergentes o hidrocarburos clorados como cloroformo) y los detergentes en concentraciones de 15 mg/l pueden causar dificultades. También son tóxicos los antibióticos, desinfectantes y pesticidas.

3.3.1.7 Factores operacionales.

Los componentes orgánicos e inorgánicos en el sustrato determinan un ecosistema. La selección de bacterias debe hacerse basándose en su habilidad para metabolizar el sustrato. La cantidad de metano producido depende del total de material que esté en fermentación. El monto de metano producido puede ser determinado por la descomposición del sustrato, comprobando la reducción del material orgánico.

3.3.1.8 Tiempo de retención.

El tiempo de retención (TR) es el período que tarda el material dentro del digestor para ser degradado. Se calcula dividiendo la capacidad del tanque por la tasa a la que la materia orgánica es introducida en él.

El tiempo de retención mínimo es de 2 a 4 días, que es lo que tardan las bacterias para multiplicarse. Si el tiempo de retención se reduce, se lavan las bacterias y se interrumpe el ciclo. Usualmente, el TR promedio oscila entre 20 y 30 días, y su duración está muy relacionada con la temperatura.

3.3.1.9 Mezclaje.

El digestor puede ser diseñado para que se haya mezclado o no. El mezclaje se puede hacer por medio del flujo o en forma mecánica y tiene la ventaja de que el sustrato está muy unido, que las bacterias tienen mayor distribución dentro de él y que la formación de nata es mínima, sabiendo que ésta se puede constituir en una barrera para el escape de gas.

3.3.1.10 Calentamiento

Para mantener constante la temperatura en el digestor y evitar los cambios que dañan a la población microbiana, puede recurrirse al calentamiento, usando su misma energía en cualquiera de las siguientes formas:

- a. Calentamiento interno: poniendo tubos dentro del biodigestor y haciendo pasar agua caliente a través de ellos.
- b. Calentamiento externo: por medio de intercambiadores de calor.
- c. Llama directa.
- d. Vapor directo.

3.4 TIPOS DE BIODIGESTORES.⁽⁴⁾

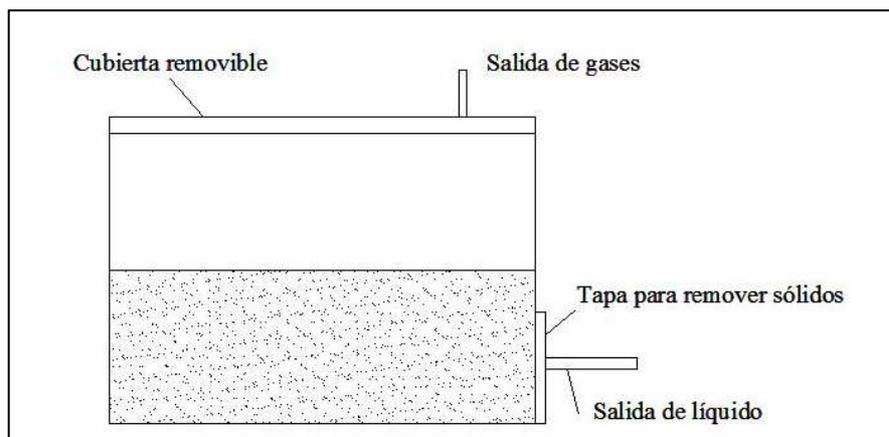
Hay que tener en cuenta que los primeros biodigestores que se construyeron en China y en la India fueron de cúpula fija y de campana flotante respectivamente, más tarde se han desarrollado otros más sencillos, rápidos de hacer y con materiales más baratos como goma, poli-vinil-cloruro (PVC), red-mud-plastic (RMP) y polietileno.

Además, ya en los últimos años en varios países subdesarrollados se están utilizando digestores tubulares de polietileno con el objetivo de reducir los costos de producción mediante el uso de materiales locales y la simplificación de instalaciones, operación y mantenimiento.

3.4.1 DIGESTORES DE LOTE (BATCH).

Se cargan de una vez en forma total o por intervalos durante varios días, y la descarga se efectúa cuando han dejado de producir gas combustible. Es aplicable cuando se presentan problemas de manejo o cuando la materia orgánica está disponible de forma intermitente.

Figura 3.1 Biodigestor de Lote (Batch).⁽⁴⁾



Este tipo de digestores, se caracterizan por ser una estructura hermética bastante simple, de forma cúbica o cilíndrica, que puede ser construida sobre o dentro de la tierra. En éste último caso la tierra actúa en dos formas sobre el reactor: por un lado, gracias a su alta conductancia se convierte en un aislante económico y por otro lado, si no es arenosa, se puede convertir en un excelente soporte estructural.

Una vez que se ha construido el reactor, se carga con la materia prima más sustrato con células que permitan el inicio de la fermentación. Algunas veces es necesario colocar algún químico para mantener un pH satisfactorio.

3.4.1.1 Usos comunes.

- a) Cuando se dispone de materia orgánica en forma intermitente.
- b) Cuando el interés principal es el de obtener bioabono, en una época específica del año.
- c) En una investigación de laboratorio con el objeto de medir parámetros de interés.

3.4.2 DIGESTOR DE REGIMEN SEMICONTINUO.

Este tipo de digestores es más usado en la zona rural, cuando se trata de sistemas de uso doméstico. Se cargan por gravedad una vez al día con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de fermentación. Producen una cantidad de gas constante al día.

3.4.3 DIGESTOR DE CAMPANA FLOTANTE (TIPO HINDU).

De campana flotante o tipo hindú. Es el más popular en la India, país en el que varias instituciones hasta 1985 han construido diferentes tipos de estas plantas, resultando en la instalación de más de 460 000 unidades. Estos biodigestores poseen una campana donde se almacena el biogás y que a su vez flota sobre el residual. La campana sube a medida que se produce gas y baja a medida que es consumido, lo que produce que la presión dentro del reactor sea baja y constante.

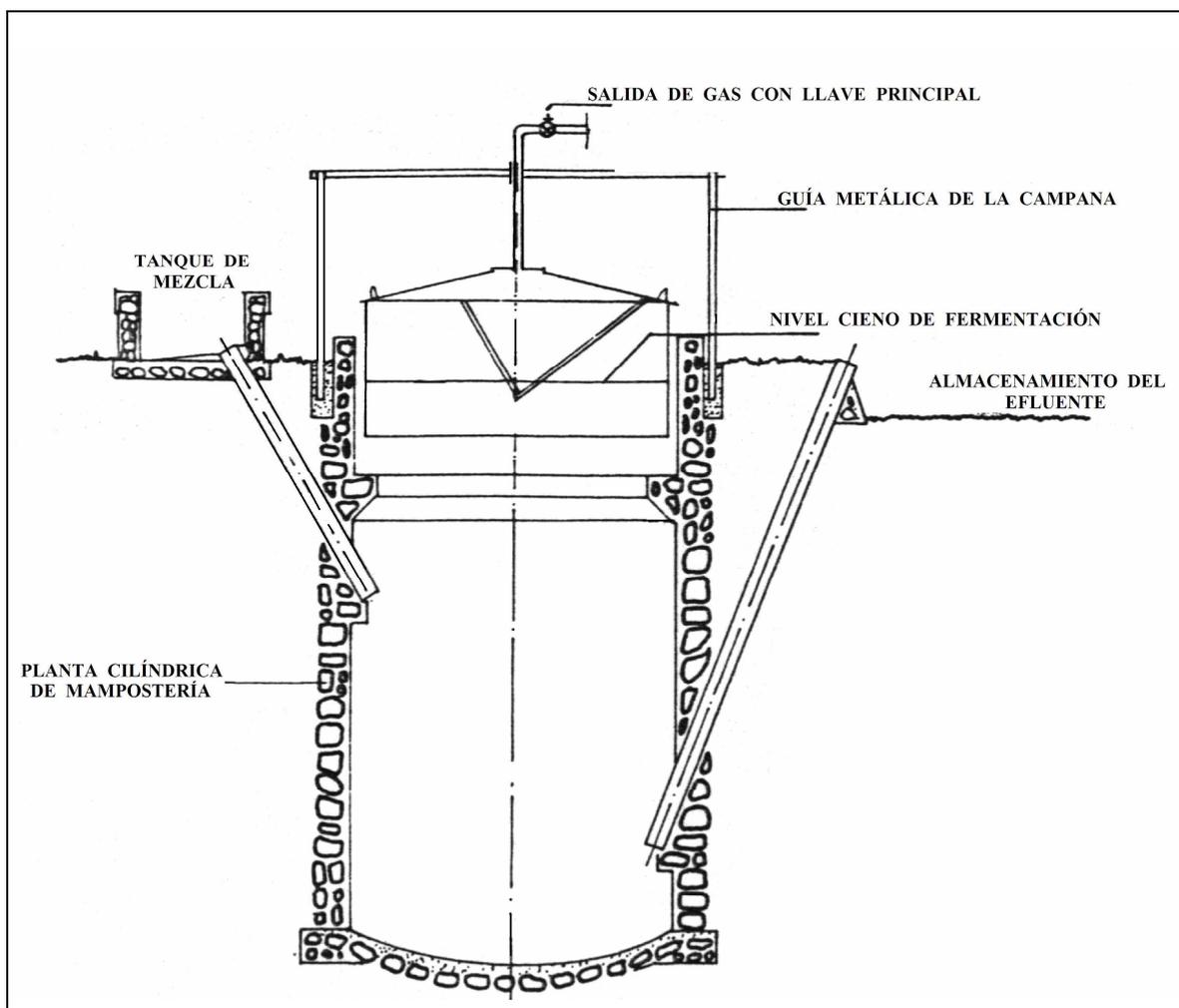
La experiencia demuestra que la presión dentro del reactor puede estar entre 0.015 y 0.017 atm. En el caso de que se desee una mayor presión se puede colocar peso sobre la campana.

La campana se desliza sobre una guía lo que proporciona cierta facilidad de movimiento. Esto produce el rompimiento de la nata que se suele formar en la superficie de la mezcla y que puede llegar a impedir que el gas escape.

Aunque una gran cantidad de estas plantas fueron construidas con ladrillos, cemento y acero, más tarde se desarrolló la tecnología KVIC con campana de diversos materiales como: ferrocemento, fibra de vidrio, de polietileno de alta densidad, de PVC, de láminas rígidas de PVC y hasta de cemento y bambú. Esta variante se construye de forma vertical u horizontal y en cuanto a su uso social y volumen pueden ser individuales o comunales.

TABLA 3.1: Ventajas y desventajas de un biodigestor de campana flotante.⁽⁴⁾

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Trabaja a una presión constante • Se puede determinar con facilidad la cantidad de gas observando el nivel de la campana 	<ul style="list-style-type: none"> • La campana si no es de acero inoxidable, está expuesta a corrosión. • Los costos de construcción y mantenimiento de la campana son altos, si ésta es metálica.

Figura 3.2 Biodigestor de campana flotante.⁽⁴⁾

3.4.4 DIGESTOR DE CAMPANA FIJA (TIPO CHINO).

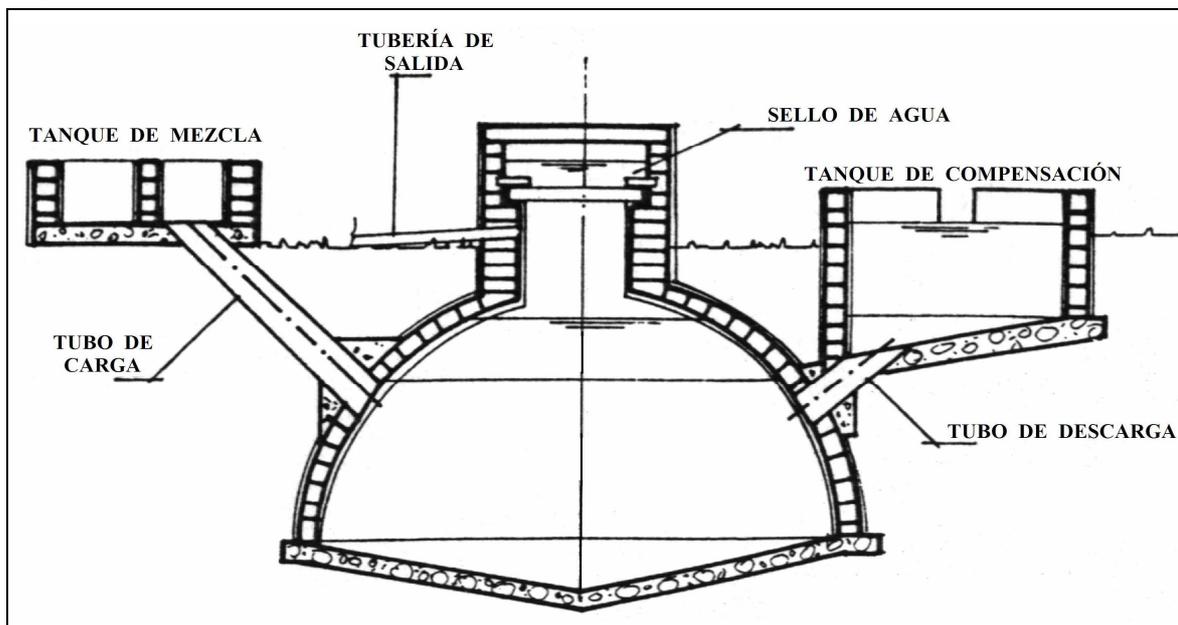
De tipo chino o de cúpula fija. Alrededor de 7 millones de plantas han sido construidas en China, las cuales son fabricadas de distintas formas y capacidades, con diferentes materiales, pero tienen un diseño básico en el que el biogás es colectado en una cúpula fija. En Tailandia se ha diseñado este tipo de biodigestor pero con anillos de bambú, mientras los coreanos desarrollaron uno de bajo costo que consiste en un tanque de ladrillos y cemento cubierto con lona de PVC.

Su principal característica es que trabaja con presión variable. Y consiste en un digestor cerrado en forma de bóveda esférica, con el gasómetro fijo e inmóvil. El gas se almacena en un volumen libre de la parte superior del digestor; cuando éste se llena, la presión desplaza el material de fermentación hacia el tanque de compensación. Si el consumo excede a la producción, el volumen ocupado por el biogás disminuye, y por lo tanto, el sustrato desplazado regresa al digestor. En consecuencia, la presión oscila dependiendo de la cantidad de gas almacenado en la parte superior del digestor.

TABLA 3.2 Ventajas y desventajas de un biodigestor de campana fija.⁽⁴⁾

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Se emplean materiales convencionales como ladrillo, bloque, cemento, etc. • No hay partes metálicas sujetas a corrosión • Con un buen mantenimiento puede tener una vida útil de hasta 20 años. 	<ul style="list-style-type: none"> • La presión de gas no es constante, esto afecta a la eficiencia de los equipos y en ciertas ocasiones puede ser la causa de fugas en el biodigestor debido a los esfuerzos cíclicos que se presentan en las paredes del biodigestor • Debido a su principio de funcionamiento, la cúpula debe ser hermética, lo que requiere una construcción compleja • Los costos de impermeabilización son altos

Figura 3.3 Biodigestor de campana fija.⁽⁴⁾



3.4.5 DIGESTORES HORIZONTALES O DE FLUJO PISTON.

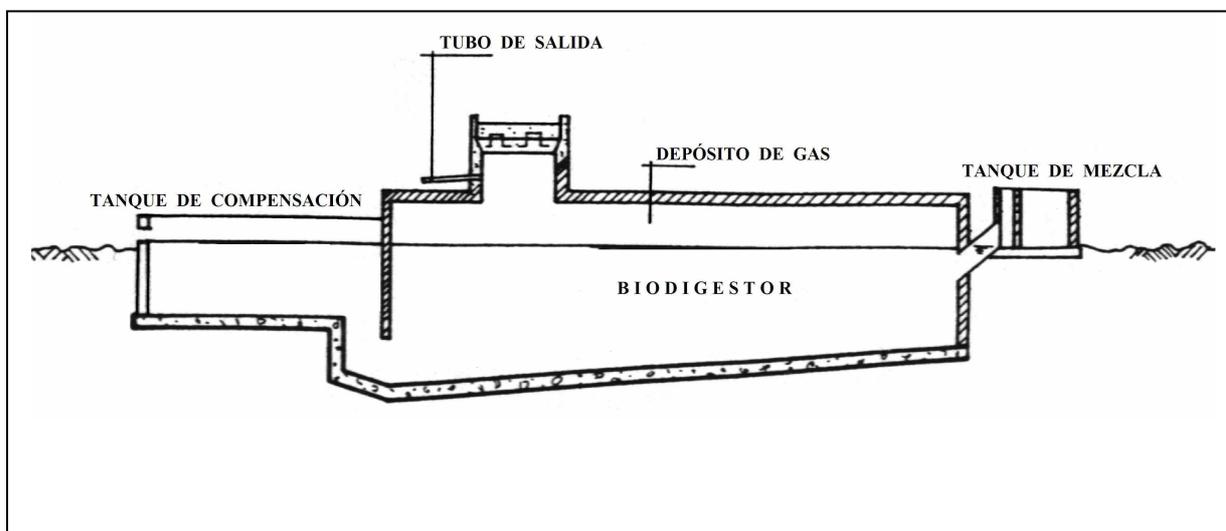
Son recipientes semejantes a un canal o túnel y que se construyen bajo tierra. Su sección es cuadrada o en forma de "V". La relación largo ancho fluctúa entre 5:1 y 8:1. Para evitar que la carga salga antes de cumplir el tiempo de retención adecuado, se construyen paredes divisorias ranuradas que provocan que el material fluya sinusoidalmente.

Es utilizado para aplicaciones mayores a 15 m³, donde la excavación de un pozo vertical presenta dificultades.

TABLA 3.3 Ventajas y desventajas de un biodigestor horizontal.⁽⁴⁾

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Su costo puede ser 50% más bajo que el de un biodigestor de cúpula fija. • Puede producir una mayor cantidad de gas que un reactor completamente mezclado 	<ul style="list-style-type: none"> • Su vida útil es de aproximadamente 5 años.

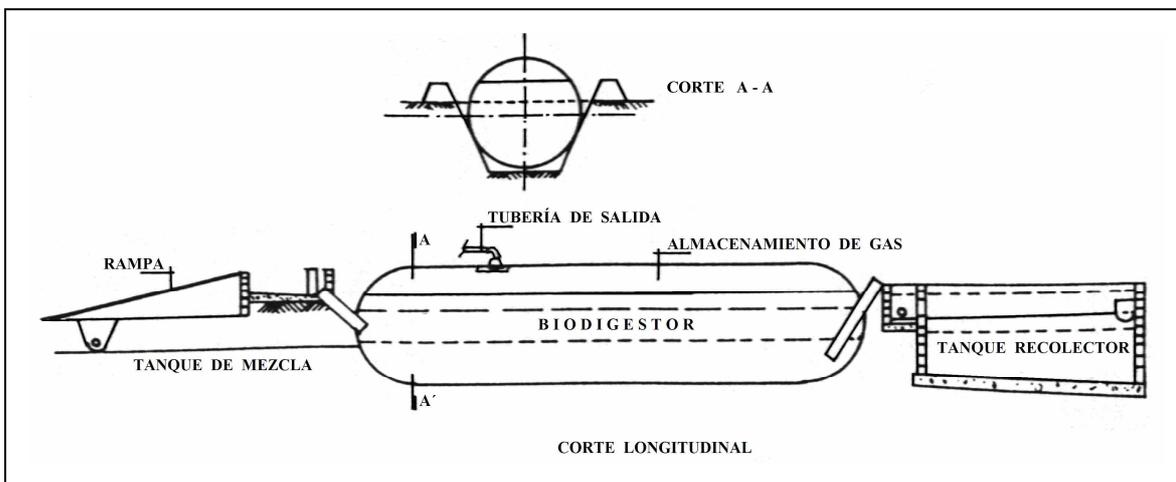
Figura 3.4 Biodigestor horizontal.⁽⁴⁾



3.4.6 TIPO TUBULAR.

Consiste en una bolsa o balón plástico completamente sellado. El gas se almacena en la parte superior, aproximadamente un 25% del volumen total. Los tubos de entrada y salida están directamente sujetos a la pared de la bolsa. Esta planta funciona como una de cúpula fija, cuando la cámara de gas está llena. El costo en relación con el digestor de cúpula fija se puede reducir en un 50% o más. Este tipo de planta es recomendado donde el peligro de que se dañe la bolsa es mínimo, y donde hay temperaturas altas y constantes. Su instalación es rápida y sencilla pero debido a su baja presión cerca de 15 cm de columna de agua es necesario colocarle sobrepesos al balón para aumentarla.

Figura 3.5 Biodigestor tubular.⁽⁴⁾



El material plástico debe ser resistente a la intemperie, así como a los rayos ultravioletas.

Al principio los digestores se hacían tubulares, más tarde se construyeron en forma de tiendas de campaña. También de esta forma se han construido biodigestores en Nepal, pero de PVC. En los últimos años, países como Colombia, Etiopía, Tanzania, Vietnam, Camboya y Bangladesh han estado utilizando este tipo de biodigestor.

También han sido bien recibidos por los campesinos pobres en Vietnam para producir combustible limpio y reemplazar la leña. En tres años se instalaron en Vietnam más de 800 digestores de polietileno, en su mayoría pagados por los propios campesinos.

3.4.7 DE REGIMEN CONTINUO.⁽²⁾

Este tipo de digestor se desarrolló principalmente para el tratamiento de aguas negras y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de otros substratos. Son plantas de gran tamaño en las que se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles agitación y control. Por estas razones son grandes consumidoras de energía.

3.4.8 COMPLETAMENTE MEZCLADOS.⁽²⁾

Estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato en cuestión.

En la actualidad, para garantizar la mezcla en el interior del reactor se emplean diversos sistemas tales como: sistema de paletas internas, con movimiento circular a través de un eje central y por medio del retorno del propio biogás a presión.

El tiempo de mezclado varía en dependencia de la complejidad del sustrato empleado, regulándose en cada caso a fin de controlar la velocidad global del proceso. La principal desventaja de estos reactores la constituyen las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados y los relativamente altos tiempos de retención requeridos.

3.4.9 DE DOS ETAPAS.⁽²⁾

Existen múltiples combinaciones de digestores de dos etapas. La concepción de estos sistemas está basada en el hecho de que varios grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica compleja requieren de diferentes condiciones de pH y tiempo de retención para su óptimo crecimiento. En estos sistemas, en el primer reactor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en el segundo se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado.

Las variantes estudiadas de estos sistemas de doble etapa presentan como desventaja largos tiempos de retención hidráulicos, requeridos en la primera fase del tratamiento y las bajas eficiencias de conversión reportadas. Aún con la aplicación de reactores de alta tasa en la segunda etapa, la velocidad de conversión total y la eficiencia global es determinada por la etapa de la hidrólisis y acidificación, por lo que cualquier estudio en cuanto al mejoramiento de la

velocidad de esta primera etapa sería de gran importancia a los efectos económicos de esta variante.

3.4.10 DE DIGESTION ANAEROBICA SECA.⁽²⁾

Este tipo de digestión es referida al proceso de degradación de residuos orgánicos con concentraciones de sólidos totales del orden del 20% o superiores. Las principales ventajas de este sistema comparado con los procesos de digestión de lodos anteriormente citados son los siguientes:

- Bajo consumo de agua. Solamente se requiere una mínima cantidad de agua para llevar a cabo el proceso.
- El volumen del reactor es relativamente pequeño, debido a la alta densidad de materia orgánica con que es operado
- Los requerimientos energéticos, con el fin de mantener una temperatura controlada del sistema son bajos (producción endógena).

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

4.1 ALTERNATIVAS DE DISEÑO.

Se han propuesto tres alternativas diferentes de diseño que cumplen con los objetivos de este proyecto, las cuales se detallan a continuación.

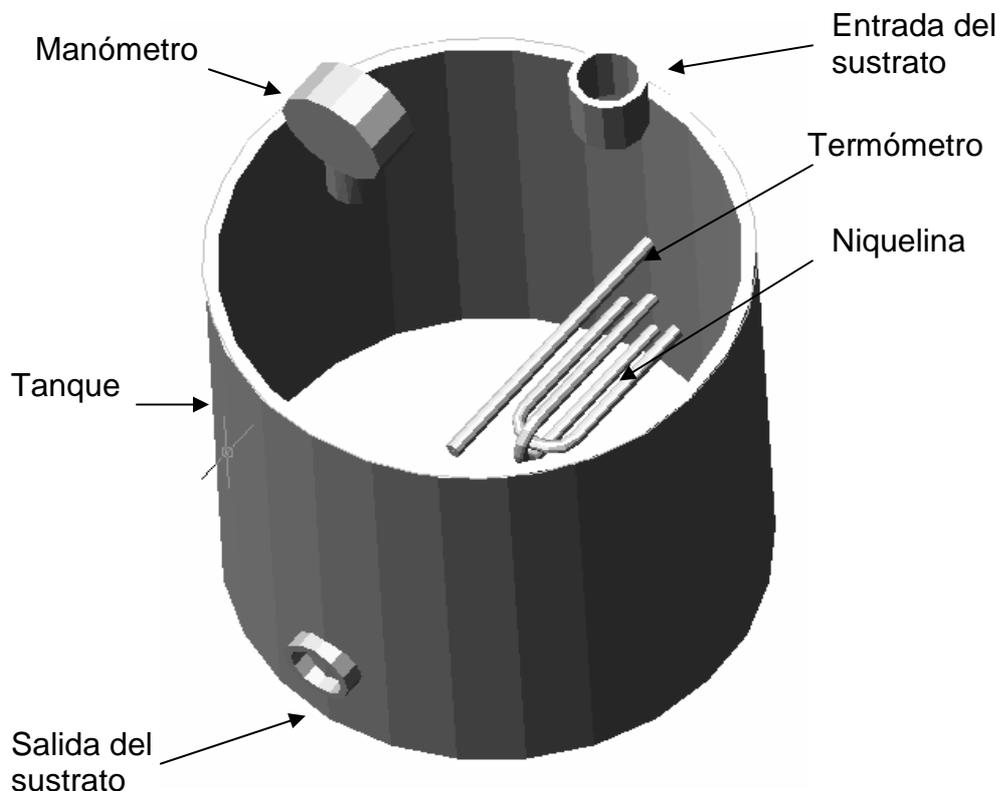
4.1.1 ALTERNATIVA A: BIODIGESTOR PLÁSTICO TRANSPARENTE CALENTADO MEDIANTE UNA NIQUELINA.

Este modelo consta de un tanque plástico transparente, con el fin de que se pueda ver las diferentes capas que se presentan en el proceso de biodegradación. Además éste consta de una niquelina, la cual mantendrá al sustrato a una temperatura casi constante, para la entrada y salida de la mezcla se instala dos aberturas en la parte superior e inferior del tanque respectivamente.

También consta de unos refuerzos laterales que sirven para dar mayor resistencia al recipiente de plástico debido a los esfuerzos por la presión interna a las que será sometido. Para el control permanente de temperatura este modelo cuenta con un termómetro de bulbo, el cual está instalado a la mitad de la altura que tendrá el sustrato dentro del recipiente.

Una ilustración de esta alternativa se muestra en la **Figura 4.1** y además las fotografías de las pruebas de presión se hallan en el Anexo 1.

Figura 4.1 Alternativa A.



Ventajas:

- Bajo costo.
- Fácil visualización de las capas que se forman en el proceso de biodegradación.
- No hay problemas de corrosión y oxidación.

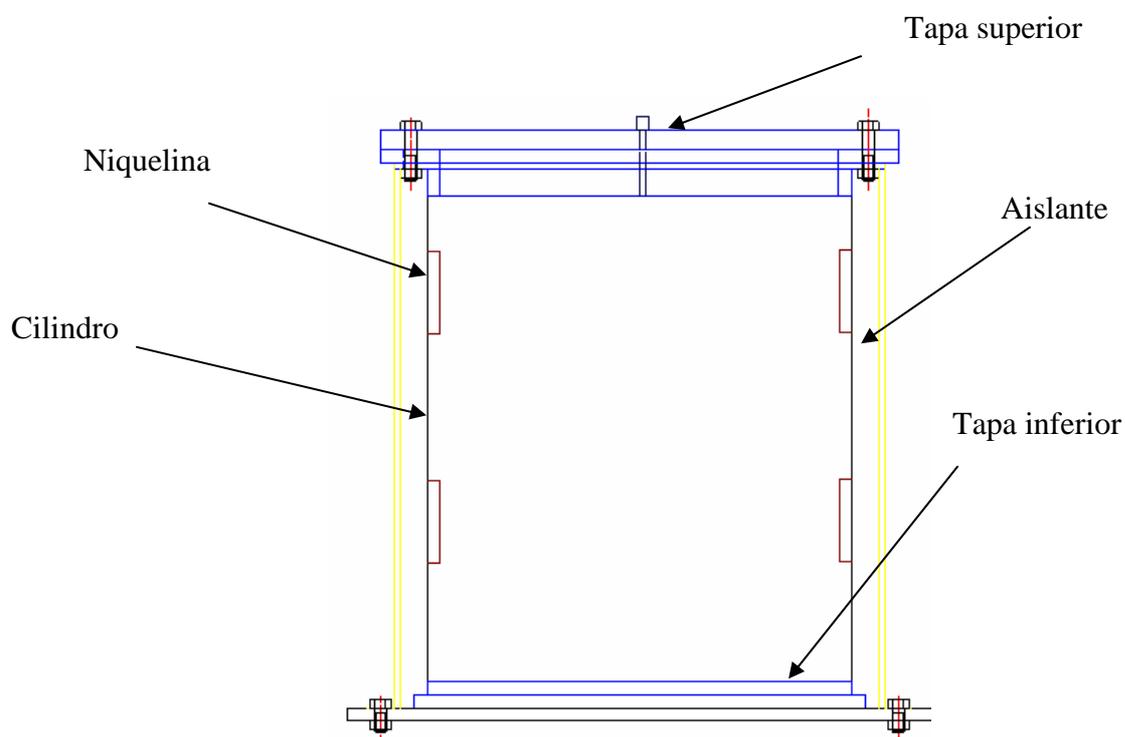
Desventajas:

- Problemas con lograr un buen sellado debido al material del recipiente.
- El recipiente debido a su material se deformaría al ser sometido a presiones relativamente altas por lo que daría una medida inexacta de la presión.
- Los accesorios tendrían que ser instalados usando material sellador o silicón lo cual no da una buena seguridad de sellado.

4.1.2 ALTERNATIVA B: BIODIGESTOR METÁLICO CON TAPAS DE DURALÓN

Este modelo consta de un cilindro metálico en el cual se generara el gas metano. Consta de tapas superior e inferior de duralón, un revestimiento aislante, y niquelina en las paredes del cilindro, la que dará la temperatura requerida al sustrato.

Figura 4.2 Alternativa B.



Ventajas:

- Fácil construcción
- Costo moderado.
- Mejor manejo de la temperatura.

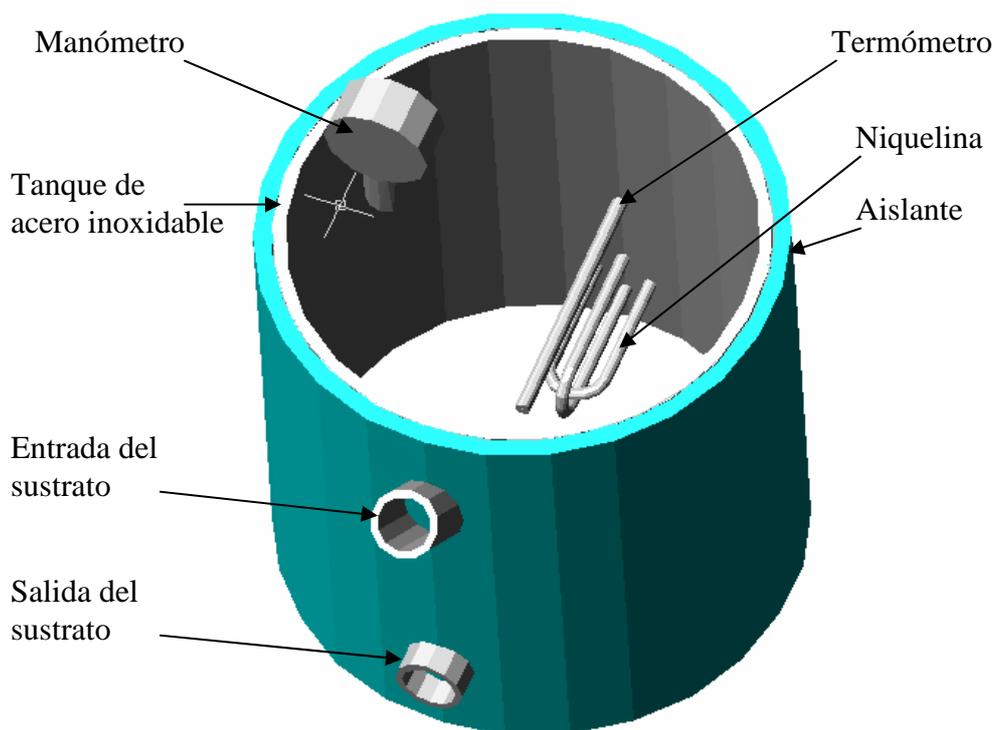
Desventajas:

- Problemas en la hermetización debido a la presión interna del cilindro.
- Dificultad al momento de la carga y descarga de sustrato.
- El aislante puede deteriorarse debido a golpes y raspones.

4.1.3 ALTERNATIVA C: BIODIGESTOR DE METAL CALENTADO MEDIANTE UNA NIQUELINA.

Este modelo consta de un recipiente de acero inoxidable, el cual proporciona una excelente condición en cuanto al sellado, ya que todos los accesorios estarían soldados o sellados mediante roscas. Para calentar el agua se utiliza una niquelina, y para evitar la pérdida de calor se reviste todo el cuerpo con lana de vidrio. Además consta de un orificio de carga y otro de descarga, con accesorios como un termómetro de bulbo y un manómetro de precisión. Una ilustración de esta alternativa se puede observar en la **figura 4.3**.

Figura 4.3 Alternativa C.



Ventajas:

- Sellado muy seguro del recipiente y de los accesorios, con lo cual se asegura un ambiente anaeróbico.
- El tanque no se deformaría debido a la presión.
- El material es resistente a golpes y deformaciones.

Desventajas:

- Costo de construcción.
- Al ser de acero inoxidable no se podría observar lo que sucede en el proceso de biodegradación.
- Se perdería calor debido a la conductividad que tienen los metales, por lo que es necesario revestirlo con un aislante, que aumenta su costo.

4.2 MÉTODO DE SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.⁽⁵⁾

El modelo que se usará para seleccionar la alternativa es el método de atributo ponderado. La medida de evaluación, simbolizada por R_j para cada alternativa j se define como:

$$R_j = \sum_{i=1}^n W_i V_{ij} \quad (4.1)$$

Los números W_i son los pesos importantes del atributo, y V_{ij} es la evaluación del valor del atributo i para cada alternativa j . Si los atributos son del mismo peso (también llamados no ponderados), $W_i = 1/m$, según se determina de acuerdo con la ecuación 4.2.

$$W_i = \frac{\text{puntuación } i \text{ de importancia}}{\sum_{i=1}^m \text{puntuación } i \text{ de importancia}} \quad (4.2)$$

Lo anterior significa que W_i puede sacarse de la sumatoria en la fórmula de R_j . La directriz de elección es la siguiente:

Se elige la alternativa con mayor valor R_j . Esta medida supone que pesos altos W_i implican atributos de mayor importancia, y puntuaciones altas V_{ij} indican un mejor desempeño de una alternativa. Se aplica un análisis de sensibilidad para

cualquier puntuación, peso y valor de evaluación con el objetivo de determinar la sensibilidad de la decisión de éste.

Tabla 4.1 Asignación de jerarquía para cada atributo.

Evaluación de atributo	Jerarquización entre numero
Muy pobre	0-2
Pobre	3-5
Bueno	6-8
Muy bueno	7-10

Tabla 4.2 Puntuaciones de atributos y valores de evaluación de las alternativas.(Valores de evaluación 0 a 10)

Atributo <i>i</i>	Puntuación de importancia	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Costo	7	6	8	8
Seguridad de sellado	10	7	8	10
Facilidad de conseguir materiales en el mercado	6	9	9	9
Mantenimiento	5	6	6	5
Adquisición y cambio de piezas	5	8	8	8
Consumo energético	6	7	5	7
Total	39			

La puntuación de importancia se la obtiene después de hacer un análisis de los atributos para cada alternativa, y de acuerdo con eso se la una valoración usando el mismo concepto de la **tabla 4.1**.

Tabla 4.3 Resultado del método de atributos ponderados.

Atributo <i>i</i>	Peso normalizado	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Costo	0.18	1.08	1.44	1.44
Seguridad de sellado	0.26	1.82	2.08	2.6
Facilidad de materiales en el mercado	0.15	1.35	1.35	1.35
Mantenimiento	0.13	0.78	0.78	0.65
Adquisición y cambio de piezas	0.13	1.04	1.04	1.04
Consumo energético	0.15	1.05	0.75	1.05
Totales (R_j)	1.00	7.12	7.44	8.13

4.2.1 EJEMPLO DE CÁLCULO.

El valor del peso normalizado, para el caso del costo, se obtiene aplicando la ecuación 4.2, así:

$$W_i = \frac{\text{puntuación } i \text{ de importancia}}{\sum_{i=1}^m \text{puntuación } i \text{ de importancia}} = \frac{7}{39} = 0.18$$

Luego se procede a calcular el valor de R_j para la alternativa A, mediante la ecuación 4.1; entonces:

$$R_j = \sum_{j=1}^n W_i V_{ij}$$

$$R_j = (0.18 \times 6) + (0.26 \times 7) + (0.15 \times 9) + (0.13 \times 6) + (0.13 \times 8) + (0.15 \times 7)$$

$$R_j = 7.12$$

La **Tabla 4.3** incluye los pesos normalizados de cada atributo con la ayuda de la ecuación 4.2, el total es de 1.0 como se requería. La medida de evaluación R_j se obtiene aplicando la ecuación 4.1 a cada columna.

Cuando los totales se revisan en el caso de la máxima medida, la alternativa C es la mejor elección con $R_3 = 8.13$.

4.3 CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTO.

4.3.1 CÁMARA.

La cámara debe ser un prototipo que permita realizar diferentes pruebas, tiene que ser capaz de soportar altas presiones por ser un biodigestor de tipo lote, es decir se carga en su totalidad y después de haber transcurrido el tiempo de retención necesario para que la materia orgánica contenida en el sustrato se haya degradado, entonces se procede a descargar el biodigestor. Además, hay que tomar en cuenta que es un prototipo de laboratorio por lo que sus dimensiones no deben ser demasiado grandes ya que este, debe ser trasladado a diferentes sitios sin mayor dificultad.

Para el cálculo se utiliza la teoría de esfuerzos en las paredes de recipientes de presión interna para cilindros de pared delgada.⁽⁶⁾

Se considera cilindro de pared delgada si cumple con:

$$\frac{r}{t} \geq 10 \quad (4.3)$$

Donde:

r = radio del recipiente.

t = espesor.

Debido a que el prototipo no debe ser muy grande por efectos de fácil transporte, se escoge construir un recipiente de acero inoxidable ($S_y = 36$ KSI) de $r = 150$ mm (5.905 pulg) y un $t = 1.5$ mm (0.059 pulg), entonces:

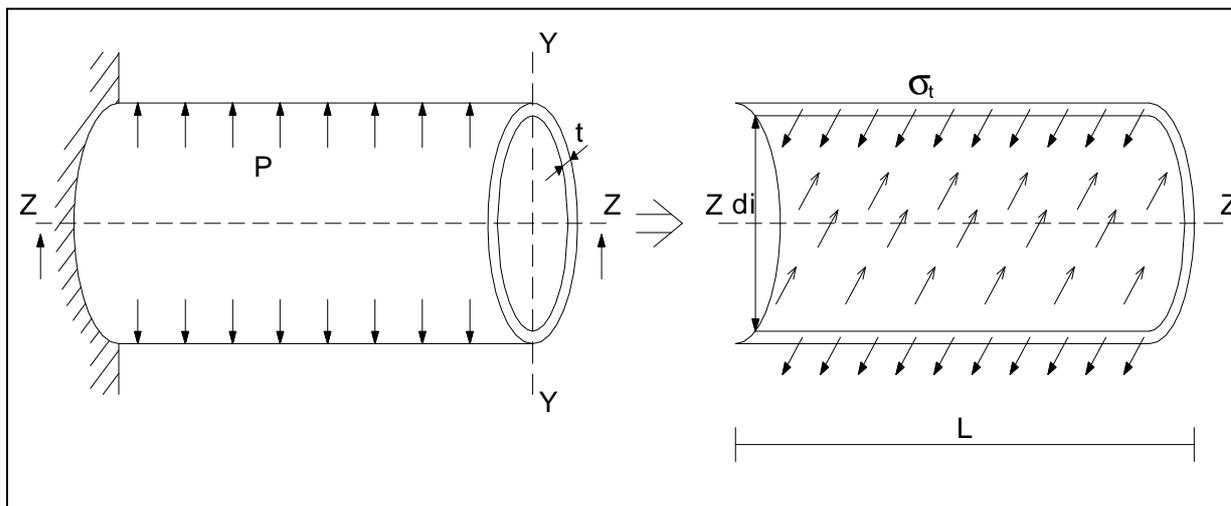
$$\frac{150}{1.5} = 100$$

$$100 \geq 10$$

Por lo cual se puede tratar como un cilindro de pared delgada.

La presión de un fluido en un recipiente cerrado produce esfuerzos de tensión en las paredes del recipiente como se puede apreciar en la **Figura 4.4**.

Figura 4.4 Esfuerzos en recipientes sometidos a presión interna.



Entonces el esfuerzo de tensión es:

$$\sigma_t = \frac{p d}{2t} \quad (4.4)$$

Donde:

σ_t = esfuerzo de tensión.

p = Presión interna del fluido (60 psi).

d = diámetro.

t = espesor del tanque.

Para determinar si el recipiente soportará la presión interna a la que va a estar expuesto se debe cumplir lo siguiente:

$$\sigma_{m\acute{a}x} \leq [\sigma]_m \quad (4.5)$$

Donde:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_t = \frac{p d}{2t} \quad \text{y} \quad [\sigma]_m = \frac{S y_t}{(FS)}$$

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo máximo.

$[\sigma]_m$ = Esfuerzo admisible.

$S y_t$ = Resistencia a la tensión (36 KSI).

(FS) = factor de seguridad (1.67).

Sustituyendo los valores en las respectivas ecuaciones se tiene:

$$\sigma_t = \frac{60 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right) \cdot 11.81 (pu\lg)}{2 \cdot 0.059 (pu\lg)}$$

$$\sigma_t = 6,005.08 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right)$$

Ahora se determina el esfuerzo admisible.

$$[\sigma]_m = \frac{36,000 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right)}{(1.67)}$$

$$[\sigma]_m = 21,556.88 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right)$$

Entonces se procede a comparar los valores de los esfuerzos.

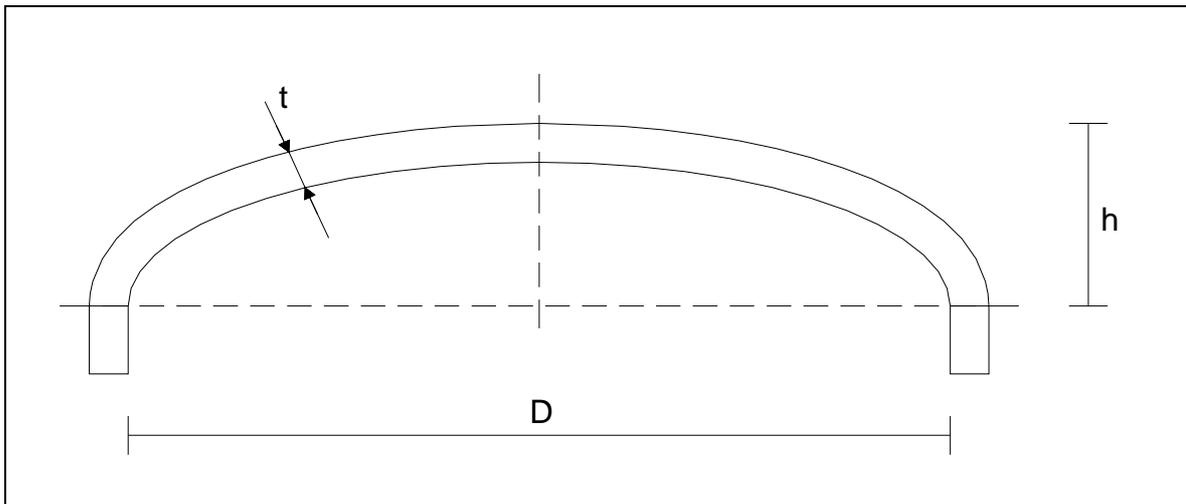
$$\sigma_t = 6,005.08 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right) \leq [\sigma]_m = 21,556.88 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right) \quad (4.6)$$

Por lo tanto se verifica que el recipiente con esas dimensiones puede soportar la presión a la que va estar sometido.

4.3.2 CÁLCULO DE LA CABEZA DEL RECIPIENTE.⁽⁷⁾

Para la cabeza del recipiente se escoge la de tipo elipsoidal debido a su bajo costo y su facilidad de realización en el mercado. Este tipo de cabeza basa su diseño en la relación que existe entre el eje mayor y el eje menor. Comúnmente el eje menor es la mitad del eje mayor, es por ello que a estas cabezas se las denomina elipsoidal un esquema de la misma se muestra en la **Figura 4.5**.

Figura 4.5 Cabeza elipsoidal.⁽⁷⁾



Para el dimensionamiento de este tipo de cabezas se utilizan las siguientes fórmulas:

$$t = \frac{P \cdot D \cdot K}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} \quad (4.7)$$

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{K \cdot D + 0.2 \cdot t} \quad (4.8)$$

Donde:

t = mínimo espesor requerido de las cabezas luego de ser formadas (pulg).

P = Presión interna de diseño o máxima presión de trabajo (lb/pulg²).

D = Diámetro interior de la cabeza (pulg).

S = Máximo valor de esfuerzo permisible a tensión (lb/pulg²).

E = Máxima eficiencia de cualquier junta en la tapa.

K es un factor de forma que depende del diámetro D y de la longitud del eje mayor h de la cabeza elipsoidal.

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right] \quad (4.9)$$

Para la cabeza del prototipo de tiene lo siguiente:

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{11.81(pu\lg)}{2 \cdot 1.57(pu\lg)} \right)^2 \right]$$

$$K = 2.69$$

Este valor de K se reemplaza junto con los demás datos en la ecuación (4.7), así se tiene:

$$t = \frac{60 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right) \cdot 11.81(pu\lg) \cdot 2.69}{2 \cdot 1 \cdot 36000 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right) - 0.2 \cdot 60 \left(\frac{lb}{pu\lg^2} \right)}$$

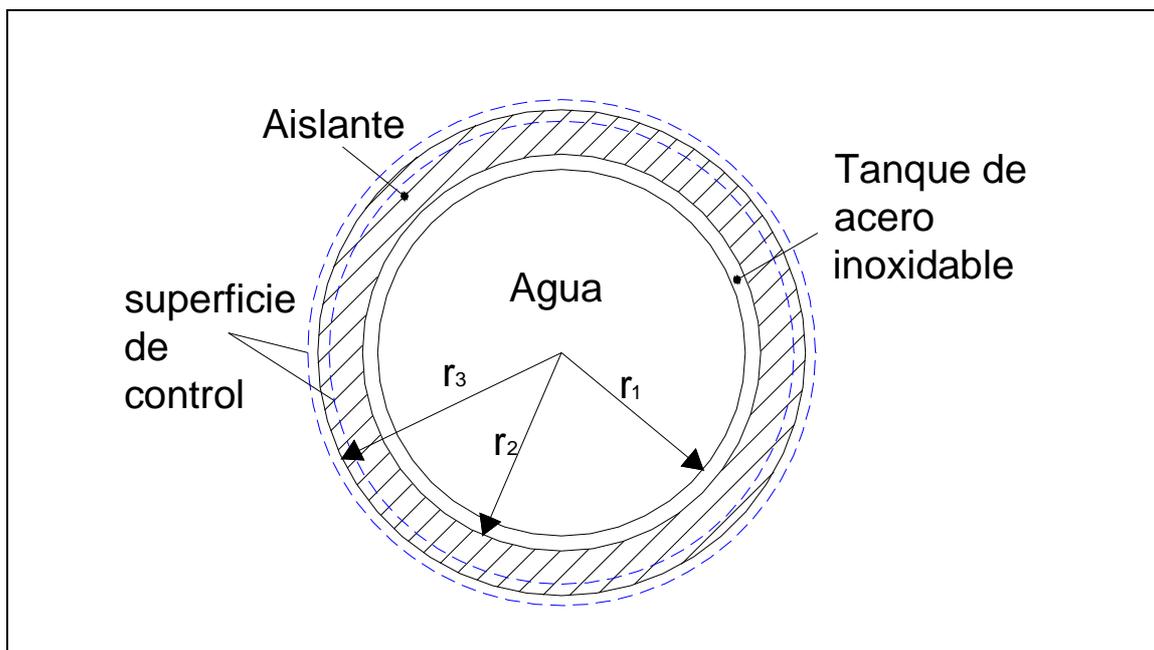
$$t = 0.026(pu\lg) = 0.6(mm)$$

Con lo cual se asegura que una cabeza del mismo espesor que el tanque es decir 1.5 mm no tendrá ningún problema con la operación del biodigestor.

4.3.3 CÁLCULO DEL AISLANTE.⁽⁸⁾

Para el cálculo del aislante se empieza por hacer un balance de energía en una superficie con el fin de obtener el espesor necesario para reducir al mínimo la pérdida de calor, En este caso la superficie de control no incluye masa o volumen y aparece como se indica en la **Figura 4.6**; en concordancia los términos de generación y almacenamiento de la expresión de conservación ya no son relevantes y solo es necesario tratar con el fenómeno superficial.

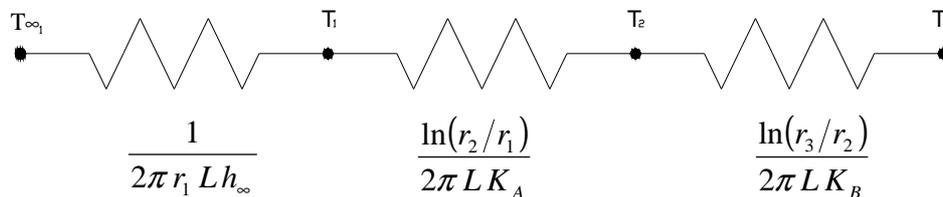
Figura 4.6 Determinación de la superficie de control.



El balance de energía en esa superficie de control es:

$$\dot{E}_{en} = \dot{E}_{sal} \quad (4.10)$$

El circuito térmico es el siguiente:



Donde:

$$\dot{E}_{en} = \frac{T_{\infty_1} - T_3}{\frac{1}{2\pi L r_1 h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi K_B L}} \quad (4.11)$$

$$\dot{E}_{sal} = h_2 2\pi r_3 L (T_3 - T_{aire}) \quad (4.12)$$

Donde:

T_{∞_1} = Temperatura del agua dentro del tanque.

T_3 = Temperatura superficial del aislante.

T_{aire} = Temperatura del aire exterior.

L = Longitud del tanque.

r_1 = Radio de interior del tanque.

r_2 = Radio exterior del tanque.

r_3 = Radio exterior del aislante.

h_1 = Coeficiente de convección del agua.

h_2 = Coeficiente de convección del aire.

K_A = Coeficiente de conducción del acero inoxidable.

K_B = Coeficiente de conducción del aislante (lana de vidrio).

Ahora se reemplazan los datos en las ecuaciones (4.11) y (4.12), las cuales a su vez se reemplazan en la ecuación (4.10), entonces se tiene:

$$\frac{(313 - 293)K}{\frac{1}{2\pi L(0.15m)1000W/m^2K} + \frac{\ln(0.151m/0.15m)}{2\pi L(15.1W/mK)} + \frac{\ln(r_3/0.151m)}{2\pi L(0.046W/mK)}} = \left(25 \frac{W}{m^2K}\right) 2\pi L r_3 (293 - 291)K$$

$$\frac{20}{-0.145 + \frac{\ln(r_3/0.151)}{0.046}} = 50r_3$$

$$20 + 7.26r_3 - 1,086.95r_3 \ln\left(\frac{r_3}{0.155}\right) = 0$$

Usando el método iterativo se obtuvo los resultados de la **Tabla 4.4**:

Tabla 4.4 Resultados aplicando método iterativo.

Valor r_3	Resultado de la ecuación
0.17	4.165
0.171	2.982
0.172	1.792
0.173	-0.596
0.174	-0.605
0.175	-1.814

Como se puede observar el valor de r_3 es 0.173 m lo que quiere decir que el espesor " e " del aislante es:

$$e = r_3 - r_2 \tag{4.13}$$

$$e = (0.173 - 0.15)m = 0.023(m)$$

El espesor que se elige es de 2.5 cm de lana de vidrio.

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Para la construcción del prototipo se escogió:

- Acero inoxidable para el tanque y la cabeza del mismo.
- Una niquelina de cobre para el calentamiento.
- Un termómetro de bulbo para la medición constante de la temperatura del sustrato.
- Un manómetro de precisión.

- Lana de vidrio para el aislante.
- Un recubrimiento de tol negro para evitar que el aislante se deteriore.

El proceso de construcción y la carga del sustrato se pueden ver en las fotografías del anexo 2. En el anexo 3 se presentan: los diagramas eléctricos y el controlador de temperatura del equipo. En el anexo 4 se encuentran todos los planos de construcción del biodigestor calculado.

4.5 CÁLCULO DE LA CARGA DEL BIODIGESTOR.⁽¹⁰⁾

Para calcular la carga del biodigestor es necesario conocer los siguientes conceptos y valores:

4.5.1 LA MASA SECA (MS, ST).

El porcentaje de agua varia en cada material de fermentación natural, por esa razón, se opera con la parte sólida o materia seca del material de fermentación.

4.5.2 LA MASA ORGÁNICA SECA (MOS, SVT).

Para el proceso de fermentación son importantes solo los componentes orgánicos o volátiles del material de fermentación. Por eso se trabaja solamente con la parte orgánica de la masa seca.

4.5.3 LA CARGA DEL BIODIGESTOR.

Esta indica con cuánto material orgánico es alimentado diariamente o cuanto material debe ser fermentado al día. Largos tiempos de retención producen una menor carga del biodigestor.

4.5.4 TIEMPO DE RETENCION (TR).

El tiempo de retención o fermentación, es el lapso durante el cual el material de fermentación permanece en el biodigestor y es el tiempo necesario para la completa fermentación del material.

La producción específica de gas, es indicada en relación con la cantidad de cieno de fermentación, con la masa seca o con la masa orgánica seca. En la práctica ella indica la producción de gas que se obtiene de un determinado material de fermentación durante un determinado tiempo de retención con determinada temperatura en el biodigestor.

El volumen del biodigestor (V_D), es determinado por el tiempo de retención (TR) y por la cantidad de cieno de fermentación (C_f) o carga de biomasa. La cantidad de carga de fermentación se compone del material de fermentación y del agua de mezcla.

El volumen del biodigestor se obtiene con la siguiente formula:

$$V_D = C_f \left(\frac{1}{\text{día}} \right) \times TR(\text{días}) \quad (4.14)$$

Si se conoce el volumen del biodigestor y se desea un determinado tiempo de retención, se puede calcular la cantidad diaria de relleno con la siguiente formula:

$$C_f = \frac{V_D}{TR} \quad (4.15)$$

Cabe señalar que el C_f de la ecuación 4.15 corresponde a una carga diaria que se hace al biodigestor, pero como nuestro prototipo es de tipo lote, es decir, que se cargará totalmente y se descargará una vez cumplido el tiempo de retención seleccionado, el C_f es igual al 75% del volumen del biodigestor, ya que el 25%

restante del volumen es necesario para el almacenamiento del metano, por lo tanto se tiene lo siguiente:

$$C_f = 0.75 \times V_D \quad (4.16)$$

$$C_f = 0.75 \times \pi \times r^2 \times h$$

$$C_f = 0.75 \times \pi \times (0.15 \text{ m})^2 \times (0.35 \text{ m})$$

$$C_f = 0.025 \text{ m}^3$$

Ahora una vez que se sabe la cantidad de C_f se debe elegir los porcentajes que se deben cargar tanto de agua como de estiércol y kikuyo.

Según los resultados de algunas pruebas hechas con biodigestores por parte de la Corporación para la Investigación Energética, la proporción más adecuada de la mezcla es: una parte de estiércol y kikuyo por tres partes de agua.

Por lo tanto se carga el 25% del C_f con una mezcla de estiércol de bovinos y kikuyo, ya que como se puede ver en la **Tabla 4.5** y **Tabla 4.6**, tienen valores altos de relación C/N, lo cual quiere decir que tendrán una alta producción de biogás, en el tiempo de retención seleccionado.

Tabla 4.5 Valores y características de algunos materiales orgánicos.⁽¹⁰⁾

Clase de animal	Cantidad diaria de:		% del material de fermentación		Relación C/N
	Estiércol en % del peso vivo	Orina en % del peso vivo	% MST	% MSO	
Vacunos	5	4	15-16	13	20
Cerdos	2	3	16	12	13
Caprinos ovejas	3	1.5	30	20	30
Caballos	5	4	15	15	20
Avícolas gallinas	4.5	4.5	17	17	5-8
Humanos	1	2	15	15	8

Tabla 4.6 Material sólido (MST) y material orgánico sólido (MSO) de algunos desechos vegetales y posible producción de biogás.⁽¹⁰⁾

Material fresco	% MST	% MSO	Lts gas x 1 kg MSO
Paja de arroz	89	93	220
Paja de trigo	82	94	250
Paja de maíz	80	91	410
Hierba fresca	24	89	410
Jacinto de agua	7	75	325
Bagazo	65	78	160
Desc. De verdure	12	86	350
Desc. Org. cocina	15	10	250

4.6 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.

Para una mayor eficiencia del control de temperatura se instaló un sistema electrónico, el cuál sirve para mantener la temperatura en un rango de 30 a 35°C, con una variación no mayor a seis grados. Además este sistema de control cuenta con un pulsador de inicio, y un reset el cuál sirve para descargar los capacitores si es que ocurre una interrupción en el flujo eléctrico.

Cuenta con dos leds, uno azul que indica que el sistema de calentamiento está apagado, y uno rojo que indica que el sistema esta encendido, aumentando la temperatura.

4.7 ANÁLISIS ECONÓMICO.

4.7.1 MATERIALES DIRECTOS.

Comprende materia prima, equipos y accesorios que intervienen directamente en el proyecto:

En la **Tabla 4.7** se detallan los costos de todos los materiales:

Tabla 4.7 Costo de los materiales directos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	¼ Plancha de tol 1.5 mm	1	\$ 50	\$ 50
2	½ Plancha de tol 0.75 mm	1	\$ 10.38	\$ 10.38
3	Niquelina	1	\$ 11.88	\$ 11.88
4	Termostato.	1	\$ 8.71	\$ 8.71
5	Termómetro bimetalico rango 0/100 °C	1	\$ 64.91	\$ 64.91
6	Neplo acero inox. 1 1/2" x 6"	1	\$ 9.09	\$ 9.09
7	Tapón hembra acero inox. 2"	2	\$ 7.90	\$ 15.80
8	Manómetro. rango 60 PSI	1	\$ 14.79	\$ 14.79
9	Lana de vidrio.	1	\$ 10	\$ 11.20
10	Pasta selladora de rosca	1	\$ 3.85	\$ 3.85
11	Electrodos.	10	\$ 0.91	\$ 9.10
12	Sistema electrónico.	1	\$ 26.78	\$ 26.78
			TOTAL (SIN IVA)	\$ 236.49
			TOTAL (CON IVA)	\$ 264.87

4.7.2 MANO DE OBRA DIRECTA.

Comprende el salario de los trabajadores y pagos por trabajos realizados en el desarrollo del proyecto. En la **Tabla 4.8** se detallan los costos de la mano de obra directa.

Tabla 4.8 Costos de mano de obra directa.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Suelda del tanque.	1	\$ 26.40	\$ 26.40
2	Instalación accesorios y armado biodigestor.	1	\$ 30.80	\$ 30.80
3	Pintura.	1	\$ 8.80	\$ 8.80
			TOTAL (SIN IVA)	\$ 66
			TOTAL (CON IVA)	\$ 73.92

4.7.3 COSTOS INDIRECTOS.

Comprende materias primas, materiales, equipos o accesorios y mano de obra utilizados dentro de la investigación pero que no se consideran directos en el sistema de biodegradación acelerada. En la **Tabla 4.9**. Se detalla los costos de materiales indirectos, que fueron utilizados en la adecuación del tanque de prueba.

Tabla 4.9 Costos indirectos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Tanque de plástico.	1	\$ 3.52	\$ 3.52
2	Silicón.	1	\$ 1.32	\$ 1.32
3	Acoples de caucho.	4	\$ 0.18	\$ 0.72
4	Neplo.	1	\$ 0.70	\$ 0.70
5	Preparación del tanque.	1	\$ 1.00	\$ 1.00
			TOTAL (SIN IVA)	\$ 7.26
			TOTAL (CON IVA)	\$ 8.13

4.7.4 COSTOS VARIOS.

Comprende gastos de combustible y transporte para la adquisición de materiales y accesorios.

Tabla 4.10 Gastos de movilización y transporte.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Combustible, movilización.	4	\$ 0.70	\$ 2.80
2	Transporte materiales.	1	\$ 1.00	\$ 1.00
			TOTAL (SIN IVA)	\$ 3.80
			TOTAL (CON IVA)	\$ 4.26

4.7.5 COSTO TOTAL DE PROYECTO.

En la **Tabla 4.11** se indica el costo total del proyecto.

Tabla 4.11 Costo total del proyecto.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
1	MATERIALES DIRETOS.	\$ 264.87
2	MANO DE OBRA DIRECTA.	\$ 73.92
3	COSTOS INDIRECTOS.	\$ 8.13
4	COSTOS VARIOS.	\$ 4.26
COSTO TOTAL :		\$ 351.18

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES:

- Aunque puede parecer que el costo de construcción de este prototipo es relativamente alto: 319.60 USD, es inferior al empleado en otros proyectos desarrollados en la EPN. Se debe tomar en cuenta que los biodigestores construidos e instalados en fincas y haciendas, son de materiales más simples y de bajo costo; la razón por la que este prototipo tiene ese valor económico es que se pretende tener la mayor producción de biogás en el menor tiempo posible sin poner en riesgo la población de bacterias productoras de gas, para que de esta manera los estudiantes puedan observar la utilidad de este tipo de modelos de una manera eficiente, en laboratorio.
- Los biodigestores instalados fuera de los laboratorios tienen una desventaja, debido a que no se podrían controlar con precisión propiedades importantes en la producción de biogás, como por ejemplo: la temperatura y el pH, entre otros, es necesario tomar en cuenta que esos prototipos al final producirán también, grandes cantidades de biogás ya que las bacterias solo demorarían en su crecimiento y su producción se va a dar de igual manera en un tiempo de retención mas largo.
- La obtención de biogás es alta como se puede apreciar en la **Tabla 4.6**, pero puede variar al hacer varias pruebas, ya que la producción de este, depende del tipo de mezcla que se haga en el sustrato, de la procedencia del estiércol y de la humedad del mismo, de la edad y alimentación del animal, del método de carga, entre otros. Por lo que para la obtención de la mezcla más eficiente y estable del sustrato, dependerá de donde sea construido e instalado el biodigestor y de quien lo maneja.

- Aunque la niquelina ofrece un rango aceptable de temperatura, de 10 grados, se vio la necesidad de instalar un control de tiempo tipo electrónico con el fin de reducir aun más la variación de temperatura, a cinco grados, y con esto lograr una mayor eficiencia en el funcionamiento del biodigestor.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Es importante controlar de una manera eficiente la temperatura del sustrato una vez cargado el biodigestor, ya que si hay demasiadas fluctuaciones bruscas de temperatura, las bacterias productoras de metano pueden dejar de crecer e incluso morir, lo que podría derivar en pérdidas económicas si se desea producir gas a gran escala.
- El biodigestor debe ser colocado en lugar con sombra y cerrado para evitar cambios bruscos de temperatura debido a la acción del sol y del viento, además de prevenir corrosión en el tol de recubrimiento y daños en los instrumentos expuestos.
- Para biodigestores que utilicen niquelina, es importante que al momento de encenderla, el biodigestor ya esté cargado o por lo menos que contenga una cierta cantidad de agua que la cubra, ya que si no se hace esto la niquelina puede averiarse.
- Así mismo para un mejor control del funcionamiento del biodigestor, es importante un control permanente del pH para evitar que éste tenga fluctuaciones.
- Se debe tomar en cuenta que para el funcionamiento de un biodigestor, es importante tener la materia orgánica con la que se va a trabajar, cerca y en una cantidad suficiente para la carga.
- Se recomienda que un biodigestor instalado tenga un mantenimiento general 1 o 2 veces al año, a fin de revisar el estado de los instrumentos y el tanque.
- Es necesario que las instituciones y autoridades den mayor énfasis a la investigación y desarrollo de nuevas fuentes de energía renovable y segura.

- Aunque los programas de investigación y desarrollo de las energías alternativas ya tienen un buen tiempo en ejecución alrededor del mundo, es necesario que el país desarrolle sus propias investigaciones ya que se cuenta con muy pocos datos reales en cuanto a la producción de biogás, así como las relaciones de estiércol – kikuyo óptimas para una producción de gas más eficiente y estable.

BIBLIOGRAFÍA

1. SIMPOSIO CENTROAMERICANO SOBRE APLICACIONES DE ENERGÍA BIOMÁSICA, Diseño y Construcción de biodigestores, Editorial Tecnológica, Costa Rica, 1985.
2. HILBERT JORGE, Manual para la Producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural, Argentina, 2003.
3. SAENZ JORGE, Biodigestores: aportes a las condiciones ambientales y calidad de vida de la población campesina, Costa Rica , Octubre 2001.
4. BERNAL JAIRO, División de capacitación y asesoría agropecuaria, CENTA. ICA, Santafé Colombia.
5. BLANK LELAND, TARQUIN ANTHONY, Ingeniería Económica, McGraw Hill, quinta edición, México, 2004.
6. FIZGERALD ROBERT, Resistencia de Materiales, Fondo educativo interamericano S.A, México, 1967.
7. GUAITA JAIME – ZAMBONINO HERNAN, Estandarización del diseño de recipientes a presión estacionarios para la industria petrolera; EPN, Quito, 2006.
8. INCROPERA FRANK, Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice Hall, México, 1999.
9. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, Código de dibujo Técnico-Mecánico, Quito – Ecuador, 1989.

10. INSTITUTO NACIONAL DE ENERGÍA, Difusión de la tecnología de biogás en Colombia, Documentación del proyecto, Santiago de Cali-Colombia, Octubre, 1987.

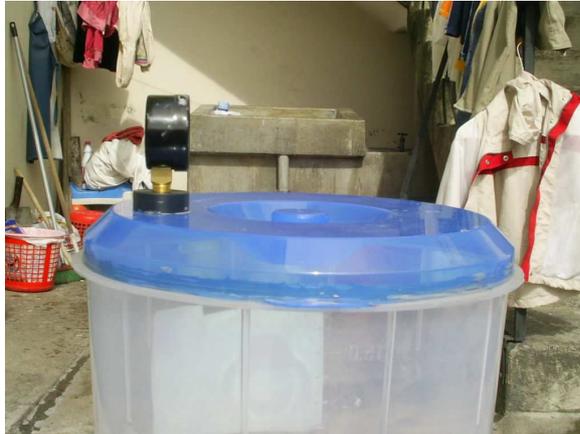
11. <http://tecnologia.mendoza.edu.ar/biogas/conceptos.htm>

ANEXOS

ANEXO 1
FOTOGRAFÍAS DE PRUEBAS DE PRESIÓN
ALTERNATIVA A.



1.- Tanque de plástico.



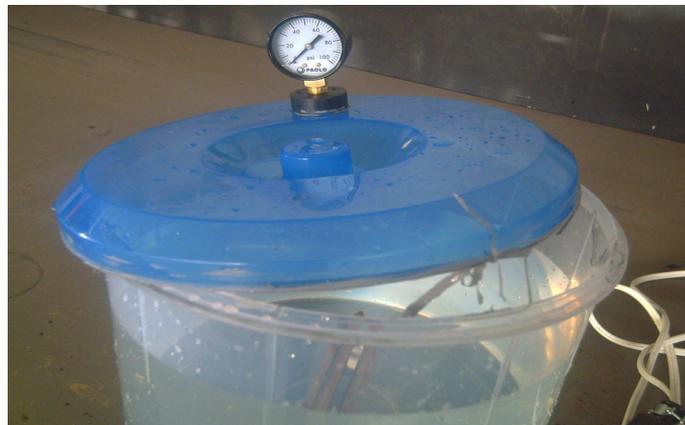
2.- Tanque sellado.



3.- Instalación de la niquelina de cobre.



4.- recipiente luego de la prueba de presión.



5.- Tapa destruida al someterla a baja presión.

ANEXO 2

FOTOGRAFÍAS DE CONSTRUCCIÓN Y CARGA DEL BIODIGESTOR.



1.- Construcción de la cámara.



2.- Cilindro soldado.



3.- Tanque soldado con la tapa superior y los accesorios.



4.- Vista de los orificios de entrada y salida del sustrato.



5.- Instalación de la lana de vidrio (Vista lateral).



6.- Instalación del lana de vidrio.



7.- Vista del biodigestor con el forro de tol negro.



8.- Entrada y salida del sustrato.



9.- Instalación de la niquelina y el termómetro de bulbo.



10.- Biodigester con todos los instrumentos instalados.



11.- Imagen de la calibración de la temperatura de la niquelina.



12.- Imagen del proceso de carga del biodigestor.



13.- Carga del sustrato.



14.- Biodigestor funcionando.

ANEXO 3
DIAGRAMAS ELÉCTRICOS.

FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA

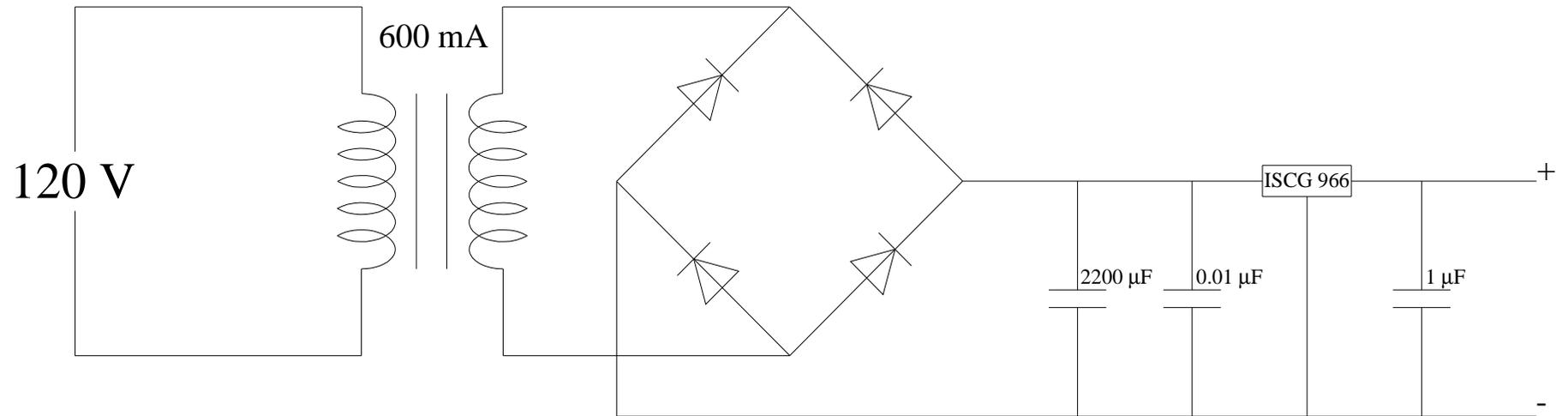
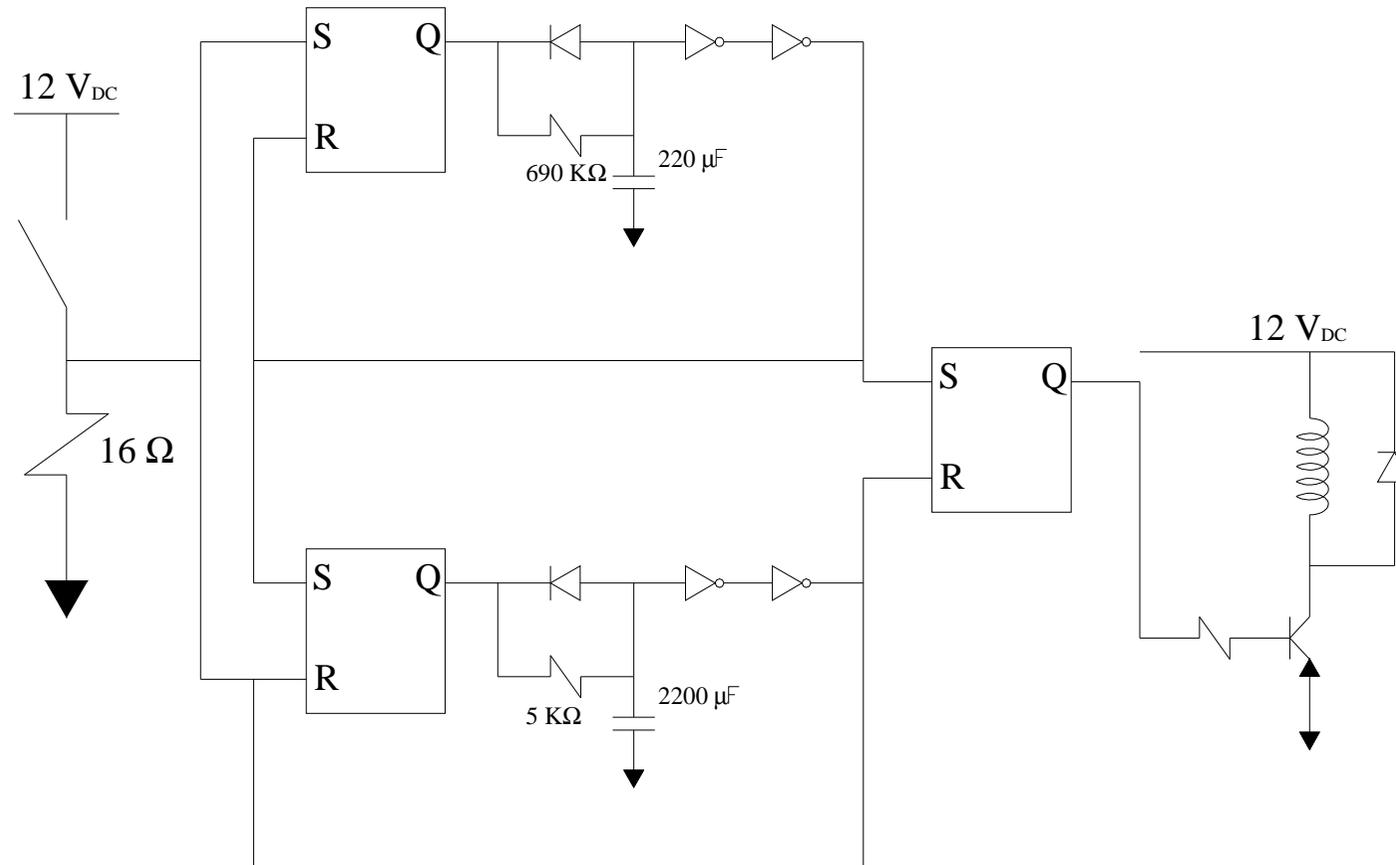


DIAGRAMA DE CONTROL DE TIEMPO



ANEXO 4
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.