



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

***Caracterización de un sistema de biodigestión a partir de chayote
a nivel laboratorio***

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Químico

PRESENTA

Omar Jasso Segovia

Director de la tesis: I.Q. Aldo Fernando Varela Martínez



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES "ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN
ESCOLAR
PRESENTE.**

Comunico a usted que al alumno(a) **Jasso Segovia Omar**, con número de cuenta **30812389-4** de la carrera **Ingeniería Química**, se le ha fijado el día **09** del mes de **Marzo** de **2018** a las **11:00 horas** para presentar su examen profesional, que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE	I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA	
VOCAL	I.Q. ALDO FERNANDO VARELA MARTÍNEZ	
SECRETARIO	M. EN C. CESAR SAÚL VELASCO HERNÁNDEZ	
SUPLENTE	M. EN C. YENNIFER PAOLA ARAUZ TORRES	
SUPLENTE	DR. FRANCISCO VIDAL CABALLERO DOMÍNGUEZ	

El título de la tesis que se presenta es: "Caracterización de un sistema de biodigestión a partir de chayote a nivel laboratorio".

Opción de Titulación: Convencional

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
CDMX., a 06 de Febrero de 2018.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NUÑEZ
DIRECTOR

RECIBI:

OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES
Y DE GRADO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
DIRECCION

Vo.Bo.

I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA
JEFA DE LA CARRERA DE I.Q.

AGRADECIMIENTOS

Al I.Q. Aldo Fernando Varela Martínez por su confianza, apoyo y paciencia que deposito en mí, así como de su disposición constante para la realización de este trabajo de tesis, así como de su asesoría y consejos proporcionados en las dificultades que se presentaron en la parte teórica y experimental de este proyecto, y finalmente por el material proporcionado para la finalización de la parte experimental.

A la FES Zaragoza y a sus maestros por el conocimiento compartido.

A mis padres Sergio y Rosalinda por la confianza y gran paciencia que me tuvieron en todo este tiempo, así como de su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida, y finalmente por los recursos monetarios proporcionados para el término de la licenciatura.

A mis hermanos y sobrinos por el apoyo y los grandiosos momentos compartidos que me ayudaron a salir adelante.

A mis amigos por su amistad, y los buenos y no tan buenos momentos compartidos.

DEDICATORIA

A mis padres Sergio y Rosalinda.

Por que gracias a su apoyo y consejo he
Llegado a realizar la mas grande de mis metas.
Lo cual constituye la herencia mas valiosa que
Pudiera recibir.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO I ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA BIOMASA.....	4
1.1 ¿Que es la biomasa?	4
1.2 Combustión y descomposición.....	5
1.2.1 Combustión.....	5
1.2.2 Descomposición.....	5
1.3 Origen energético de la biomasa	6
1.4 Historia de los usos de la biomasa.....	7
1.5 Ventajas y desventajas de la biomasa como fuente de energía.	8
1.6 Tipos de biomasa.....	9
1.6.1 Biomasa natural	11
1.6.2 Biomasa residual	12
1.6.3 Cultivos energéticos.....	15
1.7 Transformación de la biomasa en energía.....	17
1.7.1 Procesos de combustión directa	18
1.7.2 Procesos termoquímicos	20
1.7.3 Procesos bioquímicos.....	22
1.7.4 Procesos fisicoquímicos	24
CAPITULO II DIGESTIÓN ANAEROBIA Y DIGESTORES ANAEROBIOS.....	25
2.1 Metano, definición y fuentes en la naturaleza	25
2.2 Procesos de digestión y el tratamiento de residuos orgánicos	26
2.2.1 Reacciones de oxidación y de reducción.....	27
2.2.2 Digestión aeróbica	27
2.2.3 Digestión anaeróbica	28
2.2.4 Ventajas y desventajas de los procesos de digestión.....	30
2.3 Historia de la digestión anaerobia	31
2.4 Biodigestores anaerobios.....	32
2.4.1 ¿Qué es un biodigestor?.....	32

2.4.2 Componentes de un biodigestor anaeróbico	33
2.5 Tipos de biodigestores	34
2.5.1 Clasificación de los digestores por su modo de operación	35
2.5.2 Biodigestores de baja tecnología	36
2.5.3 Reactores y sistemas anaerobios industriales	38
2.6 Etapas de la digestión anaerobia	45
2.6.1 Hidrólisis	45
2.6.2 Acidogénesis o fermentación	46
2.6.3 Acetogénesis	46
2.6.4 Metanogénesis.....	47
2.6.5 Digestión en dos etapas	48
2.7 Factores que afectan la producción de biogás.....	48
2.7.1 Tipos de materia orgánica	48
2.7.2 Características de los residuos.....	49
2.7.3 Variables de operación del biodigestor	52
2.7.4 Indicador del comportamiento de la digestión anaerobia.....	56
2.7.5 Rendimiento de biogás	56
CAPITULO III TÉCNICAS Y DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO.....	59
3.1 Definición de calorimetría.....	59
3.2 Breve historia del calorímetro y de la bomba calorimétrica	60
3.3 Definición y funcionamiento de un calorímetro	61
3.4 Definición y funcionamiento de la bomba calorimétrica	63
3.5 Tipos de calorímetros.....	64
3.5.1 Calorímetro adiabático.....	65
3.5.2 Calorímetro isoperibólico	66
3.5.3 Calorímetro isotérmico.....	67
3.6 Importancia del poder calorífico	67
3.7 Aparatos, materiales y determinación experimental del poder calorífico	68
3.7.1 Aparatos y equipos	68
3.7.2 Reactivos y materiales.....	68
3.7.3 Procedimiento	70

3.8 Cálculos	73
3.8.1 Aumento de la temperatura (Método adiabático).....	73
3.8.2 Correcciones termoquímicas	74
3.8.3 Cálculo para la determinación del poder calorífico superior másico de la muestra.....	74
3.8.4 Metodología para la conversión de distintitos tipos de poder calorífico .	78
CAPITULO IV METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	84
4.1 Planteamiento del problema	84
4.2 Objetivos	85
4.3 Hipótesis	86
4.4 Características del chayote	86
4.5 Determinación de los solidos totales y secado del chayote	87
4.6 Primera parte de la experimentación (humedad y presentación de la materia prima).....	88
4.6.1 Diseño experimental	88
4.6.2 Cálculos	90
4.6.3 Resultados.....	91
4.6.4 Formación del hongo y medición del pH.....	96
4.7 Segunda parte de la experimentación (Temperatura).....	99
4.7.1 Diseño experimental	99
4.7.2 Cálculos	103
4.7.3 Resultados.....	103
4.7.4 Formación del hongo	109
4.8 Análisis de resultados	110
CAPITULO V PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN	112
5.1 Determinación del consumo promedio de electricidad y gas LP de una vivienda de la ciudad de México	112
5.2 Estimación preliminar de la cantidad de materia orgánica para el proceso de biodigestión.....	117
5.3 Propuesta de biodigestión de RSU orgánicos.....	122
CONCLUSIONES.....	125
BIBLIOGRAFÍA	126

RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad comprobar si es posible obtener biogás a partir de residuos de chayote, determinar las condiciones más adecuadas para la generación de biogás a partir de restos de chayote, y finalmente analizar una propuesta de un sistema de biodigestión para promover su uso en los hogares.

Para el desarrollo de los capítulos de este proyecto se realizó primeramente una investigación de los antecedentes históricos de la biomasa, es decir de su origen energético, su clasificación y de los diferentes procesos para la extracción de su energía, para tener un panorama general de lo que abarca el término biomasa. Después se investigaron los diversos tipos de biodigestores, las etapas y factores que afectan la digestión anaerobia, para comprender como se efectúa el proceso de digestión. Posteriormente se investigaron las técnicas para la determinación del poder calorífico, y de esta forma visualizar la importancia de esta propiedad. Después se investigaron las características del chayote para conocer su composición, y finalmente se buscaron datos experimentales de la producción de biogás y diversos indicadores sociodemográficos de una determinada zona, para establecer una aproximación de la energía consumida y de los residuos generados en cada vivienda, y de esta manera analizar una propuesta de un sistema de biodigestión en los hogares.

La experimentación se dividió en dos partes, la primera consistió en determinar las cantidades de agua mas adecuadas para la producción de biogás a partir de chayote, agregando diferentes relaciones de agua y solidos de chayote en diferentes recipientes de plástico, posteriormente cada uno fue sellado con un globo, y de esta manera poder medir de manera cualitativa la generación de biogás dependiendo del tamaño alcanzado por cada sistema. La segunda parte consistió en utilizar las relaciones de agua y solidos de chayote que tuvieron mejores resultados en la primera parte, pero empleando diferentes temperaturas, para tener un buen control de la temperatura se construyo un sistema adiabático que agrego calor a los sistemas y mantuvo la temperatura de los sistemas lo mas constante posible. Finalmente con la experimentación se comprobó que es posible generar biogás a partir de residuos de chayote, se observo que las concentraciones de 22.5, 28.125 y 56.25 % de solidos de chayote fueron las mas adecuadas para la producción de biogás, y por ultimo se observó que las muestras de chayote fresco tuvieron mayor generación de biogás cuando se opero en el intervalo de 52 a 58 °C, mientras que las muestras de chayote seco tuvieron mayor volumen de producción cuando se opero en el intervalo de 22 a 43 °C.

INTRODUCCIÓN

La biomasa ha sido la fuente de energía mas importante durante la historia de la humanidad y el primer combustible empleado por el hombre, era utilizada en forma de leña para cocinar, para la calefacción de los hogares y para proveer de energía a la industria. Hasta que fue sustituido por el uso masivo del carbón a mediados del siglo XVIII para alimentar a la maquinaria que hizo posible la Revolución Industrial, y desde ese momento se empezaron a utilizar otras fuentes de energía con mayor poder calorífico.

Posteriormente en el siglo XIX se introduciría el petróleo al mercado tras el descubrimiento de importantes yacimientos de este energético, haciéndose popular entre la sociedad industrializada, principalmente debido a la industria automotriz. Posteriormente a principios del siglo XX surgiría la industria del gas LP al separarse el propano y butano de la gasolina.

Debido al agotamiento de las reservas de petróleo y al efecto negativo que causa la quema de combustibles fósiles en el medio ambiente, se exploran nuevas fuentes de energía.

El primer uso que se le dio a la biomasa como combustible fue quemándolo directamente para producir calor, actualmente el avance tecnológico ha permitido el desarrollo de procesos más eficientes para la conversión de la biomasa en biocombustibles, como es el biogás, que es una mezcla de gases compuesto principalmente por metano, que puede ser capturado y usado como combustible.

El biogás es producido mediante una serie de reacciones bioquímicas durante la digestión anaeróbica de la biomasa, y que permite tratar materiales residuales que es necesario eliminar, transformándolos en productos con valor agregado, produciéndose además de biogás, un biofertilizante rico en nutrientes que puede emplearse en los cultivos.

La biomasa presenta diversas ventajas frente a los combustibles convencionales, pero las más importantes que podemos mencionar, es que se trata de una fuente de energía renovable y que tiene un menor impacto ambiental.

Actualmente la sociedad se enfrenta a la problemática que constituyen el manejo y tratamiento de diversos residuos orgánicos, como ejemplo podemos poner la mala disposición de los residuos generados de los alimentos y otras fuentes orgánicas, tal es el caso en el que diversos frutos como el chayote, que son desperdiciados y tirados en el campo debido a problemas de comercialización. Por lo que en este

trabajo se pretende evaluar si es posible obtener biogás a partir de restos de chayote, realizando pruebas y analizando diversos sistemas de biodigestión a escala, determinado así, las relaciones de sólidos de chayote y agua, y las temperaturas que favorecerían la obtención de biogás.

CAPITULO I

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA BIOMASA

1.1 ¿Que es la biomasa?

Principalmente cuando se habla de biomasa se distinguen dos definiciones, una biológica y una energética.

Para la biología, “la biomasa es el conjunto organismos vivos, animales y vegetales de una determinada región, considerados colectivamente” (Domínguez, 1995, p. 31). Dicho de una forma mas general el término biomasa agrupa toda la materia viva existente en un instante de tiempo en la biosfera del planeta tierra (Carta, Calero, Colmenar y Castro, 2009, p. 478). La biomasa también es definida como la suma total de la materia de los organismos vivos de un determinado lugar expresada normalmente en cantidad de materia viva estimada por unidad de superficie o de volumen.

En términos de energía la biomasa puede definirse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, natural o artificial del que se puede obtener energía, ya sea de forma directa (combustión) o indirecta (transformándola en biocombustibles). Carta et al (2009) definen la biomasa como la energía solar almacenada en los organismos vivos por medio de los procesos de fotosíntesis en los vegetales, y por medio de la digestión en los animales, dicho de otro modo la biomasa se trata de un pequeño porcentaje de la energía solar que llega a la Tierra (p. 50). Además se debe mencionar que el término biomasa es de interés en ecología como una medida del índice de la actividad o de la producción de energía de los organismos vivos (Carta et al, 2009, p. 478).

El término biomasa es muy extenso, en el se incluyen el grupo de materias primas y productos energéticos de tipo renovable originados a partir de la materia orgánica (Cabrera et al., 2011, p. 7). Además agrupa diferentes tipos de residuos generados en diversas áreas como son los forestales, agrícolas, ganaderos etc., de los que se hablaran mas adelante. Por ultimo, es importante mencionar que en el término biomasa no se incluye aquella materia que tuvo vida y que ha sufrido cambios profundos en su composición, tales como los que ocurren en los procesos de mineralización, por lo tanto quedan excluidos de este término el petróleo y el carbón (Fernández, 2009, p. 304). Además de que estos últimos

mencionados no son renovables ya que para su formación se necesitaron millones de años.

1.2 Combustión y descomposición

Tanto la combustión y la descomposición de la materia orgánica son procesos de oxidación en los que se libera energía (calor) al ambiente, aunque la forma en la que estos se llevan a cabo es muy diferente y se explica a continuación.

1.2.1 Combustión

La combustión es un fenómeno químico de oxidación que ocurre de manera rápida en el que ciertos materiales llamados combustibles interaccionan con el oxígeno (comburente), liberando grandes cantidades de calor de manera inmediata y generando los llamados productos de combustión (principalmente agua y dióxido de carbono). Se dice que la combustión es completa cuando todos los componentes del combustible se han oxidado completamente.

Tanto la materia orgánica que conforma la biomasa, así como los combustibles están compuestos principalmente por carbono e hidrógeno, lo que determina que pueden ser quemados, pero esta consideración no es suficiente para que la combustión se lleve a cabo, ya que este proceso depende de varias condiciones físicas. Principalmente debemos mencionar que la combustión se lleva a cabo en la fase gaseosa, por lo que los combustibles gaseosos como el metano se queman de inmediato, mientras que un combustible líquido debe pasar por una etapa previa de “pulverización” para que la combustión se realice, por último para un combustible sólido la etapa de “pulverización” es mucho más compleja de realizarse y por lo tanto es más difícil de efectuarse su combustión (Fernández, 2009 p. 332).

1.2.2 Descomposición

La descomposición es un proceso complejo, clave en el reciclado de nutrientes dentro de los ecosistemas y que se puede definir de manera sencilla como la ruptura de los enlaces químicos formados durante la construcción de los tejidos animales y vegetales, se trata de un conjunto de procesos que incluyen la lixiviación, fragmentación, ingestión y cambios en la estructura física y química de la materia orgánica y la excreción de productos de desecho (Smith y Smith, 2007, p. 472).

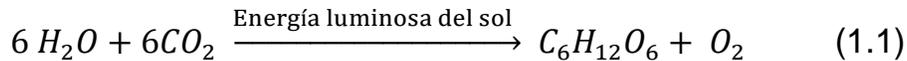
La descomposición es efectuada en la naturaleza por una gran variedad de organismos descomponedores, de manera general todos los heterótrofos son considerados descomponedores, sin embargo, los que típicamente denominamos descomponedores, son organismos que se alimentan de materia orgánica muerta o de residuos, frecuentemente los organismos relacionados con el proceso de descomposición son los que forman parte de la microflora, compuesta por bacterias y hongos, aunque las bacterias son los organismos descomponedores dominantes de la materia animal muerta y los hongos los descomponedores más importantes de la materia vegetal (Smith y Smith, 2007, p. 472).

Los microorganismos presentes en la biosfera se alimentan de los residuos orgánicos, la digieren, la descomponen (segregando enzimas sobre la compleja materia orgánica), la alteran estructural y químicamente en otros materiales más simples y los liberan parcialmente en forma de productos residuales (Smith y Smith, 2007, p. 472). Durante la descomposición de la materia orgánica se producen agua y dióxido de carbono junto con desprendimiento de calor, además de que en el proceso de descomposición se producen compuestos más simples a los originales como son el metano y el etanol.

Con lo explicado anteriormente podemos decir que la combustión y la descomposición presentan una gran similitud, que en ambos procesos se producen agua y dióxido de carbono, productos que son las materias primas de un proceso que da origen a la vida y que es llamado fotosíntesis.

1.3 Origen energético de la biomasa

Así como la mayoría de las fuentes de energía renovables, la energía que almacena la biomasa proviene originalmente de la energía solar directa (Carta et al, 2009, p. 476). Es decir que la energía contenida en la radiación solar es captada y transformada en materia orgánica (energía química almacenada) mediante la fotosíntesis que realizan las plantas verdes y diversos microorganismos con pigmentos fotosintéticos (Fernández, 2009, p. 304). En la reacción química de la fotosíntesis las plantas absorben la energía lumínica del sol en unas células llamadas cloroplastos, que contienen una sustancia llamada clorofila, y toman el dióxido de carbono de la atmósfera, agua y sales minerales del suelo, para transformarlos en azúcares, raíces, celulosa y diverso material vegetal, además de liberar oxígeno a la atmósfera, representado el proceso en la siguiente ecuación química 1.1.



Fuente: *Energías renovables: fundamentos, tecnologías y aplicaciones: solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidráulica, pilas de combustible, cogeneración y fusión nuclear*, p. 167, por Madrid, A. 2009, Madrid: Mundi Prensa. Copyright 2009 por Mundi Prensa.

En la reacción anterior se puede observar que la materia orgánica producida es la glucosa, pero esta no es necesariamente el material vegetal final, esta es utilizada para representar de una forma sencilla el proceso de la fotosíntesis. Ya que a partir de estos productos iniciales se llevarán a cabo tanto en las hojas como en otras partes del vegetal, la síntesis de otros compuestos a base de carbono, como son: las proteínas, ácidos grasos y enzimas (Smith y Smith, 2007, p. 109). Además como se observa la fotosíntesis es un proceso inverso al de la combustión y la descomposición que se explicó anteriormente.

La energía contenida en los enlaces químicos de la materia vegetal es transferida a los animales a través de las cadenas tróficas y se libera al medio ambiente en procesos de oxidación (combustión y descomposición) (Fernández, 2009, p. 305). Posteriormente el ciclo es cerrado con la fotosíntesis con la creación de nueva materia vegetal y oxígeno.

Es por esto que la biomasa es considerada como una fuente de energía renovable, ya que mientras exista el sol la fotosíntesis se seguirá llevando a cabo. Es importante mencionar que la biomasa, así como otras fuentes de energía, son consideradas como renovables siempre y cuando el consumo de estas no exceda su nivel natural de producción.

1.4 Historia de los usos de la biomasa

La biomasa ha sido la fuente de energía más importante durante la historia de la humanidad y el primer combustible empleado por el hombre. Desde el descubrimiento del fuego la biomasa ha acompañado al hombre suministrándole energía, se podría decir que fueron los troncos, ramas, hojas, raíces y arbustos los primeros combustibles que utilizaron los hombres para calentarse, para cocinar sus alimentos y para iluminarse (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2007, p. 117).

Además de emplearse la biomasa en los hogares satisfaciendo las necesidades de cocina y calefacción, se utilizó para abastecer de energía a la industria, para la producción de metales y para alimentar las máquinas de vapor hasta la llegada de la revolución industrial (Argentina. Secretaría de Energía, 2008, p. 5). Los

procesos industriales progresivamente fueron requiriendo mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, por lo que se impulso el uso masivo del carbón como combustible sustituto a mediados del siglo XVIII para alimentar a la maquinaria que hizo posible la revolución industrial, y desde ese momento se empezaron a utilizar otras fuentes energéticas con un mayor poder calorífico (Argentina. Secretaría de Energía, 2008, p. 5).

Mas tarde en el siglo XIX se introduciría el petróleo al mercado tras el descubrimiento de importantes yacimientos de este energético, haciéndose popular rápidamente entre la sociedad industrializada y del que se empezó a usar intensivamente debido a la industria automotriz, que permitió el desplazamiento de las personas y las mercancías en menores tiempos (Flores, 2006, p. 4). Posteriormente a principios del siglo XX surgiría la industria del gas LP al separar el propano y butano de la gasolina.

Es asi que esta dependencia de la biomasa que había durado miles de años fue disminuyendo al ser sustituida por el uso masivo de los combustibles fósiles, manteniéndose su uso en los países más pobres, mientras que en los países desarrollados se ha empleado solamente en algunos sectores como en el forestal y el agroalimentario, donde los residuos forestales han sido tradicionalmente utilizados con fines energéticos.

Actualmente debido a los altos precios de los combustibles y a los problemas ambientales, asi como las necesidades de autosuficiencia energética hacen necesario volver a utilizar los productos energéticos naturales (IDEA, 2007, p. 118). También ha cambiado el estado tecnológico de la biomasa y los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía, como son los procesos termoquímicos, bioquímicos y fisicoquímicos, que transforman la biomasa en combustibles solidos, líquidos o gaseosos, los cuales son más convenientes y eficientes que la combustión directa de la biomasa (Fernández, 2009, p. 305).

1.5 Ventajas y desventajas de la biomasa como fuente de energía.

A continuación en la tabla 1.1 se resumen las principales ventajas y desventajas que presenta la biomasa como fuente de energía.

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de la biomasa como fuente de energía

Ventajas	Desventajas
1) Se trata de una fuente de energía renovable, siempre y cuando no se sobre exploten los recursos naturales.	1) Necesita un proceso de acondicionamiento o transformación para su utilización como fuente de energía.
2) No contribuye al efecto invernadero, siempre y cuando la vegetación se renueve a la misma velocidad que se consume (Fernández, 2009, p. 306).	2) La materia prima es de baja densidad energética, es decir que ocupa mucho volumen y por lo tanto puede tener problemas de transporte y almacenamiento.
3) Emiten menos cantidad de contaminantes sulfurados, nitrogenados y partículas solidas en comparación con los combustibles fósiles.	3) Tiene un mayor costo de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
4) Una parte de la biomasa para fines energéticos procede de materiales residuales que es necesario eliminar, convirtiendo los residuos en recursos (Fernández, 2009, p. 306).	4) Existe un menor rendimiento energético para los combustibles derivados de la biomasa en comparación con los combustibles fósiles.
5) A comparación de otras fuentes de energías renovables, los combustibles derivados de la biomasa pueden almacenarse durante largos periodos de tiempo (Madrid, 2009, p. 171).	5) La producción de muchas materias primas es estacional.
6) Puede jugar un importante papel para generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales (Argentina. Secretaria de Energía, 2008 p. 5)	
7) Disminuye la dependencia externa de combustibles fósiles.	

1.6 Tipos de biomasa

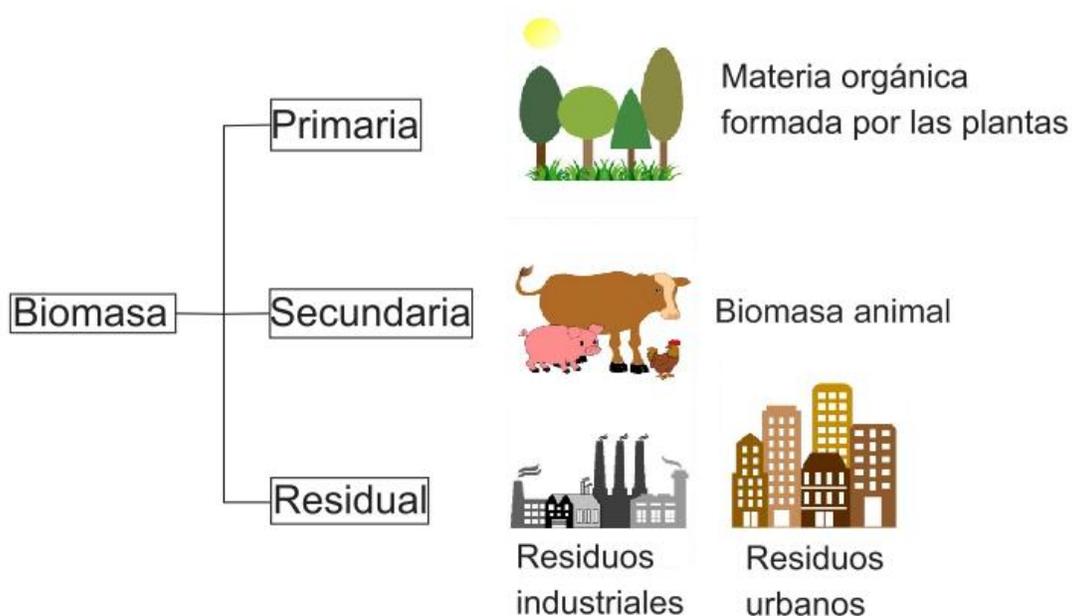
Dependiendo de su origen la biomasa se puede clasificar en primaria, secundaria y residual (figura 1.1), la biomasa primaria es producto directo de la fotosíntesis y es representada por la materia orgánica formada por las plantas (Saura, s. f., p. 13). La biomasa secundaria son los residuos que producen los organismos

heterótrofos que ingieren la biomasa primaria para su nutrición y la transforman en biomasa secundaria o también conocida como biomasa animal. La biomasa residual es la producida por diversas actividades humanas como las industriales que generan diversos subproductos, y por las actividades cotidianas de los núcleos de población que generan residuos sólidos y líquidos.

Otra forma de clasificar la biomasa es dependiendo de la cantidad de agua que tiene presente, esta puede ser seca o húmeda, la seca es la que contiene una humedad menor al 60%, como la leña, paja, residuos forestales, residuos agrícolas etc., y la húmeda es aquella que contiene una humedad superior al 60 %, como son los residuos animales, residuos de diversas industrias etc. (Argentina. Secretaría de Energía, 2008, p. 7).

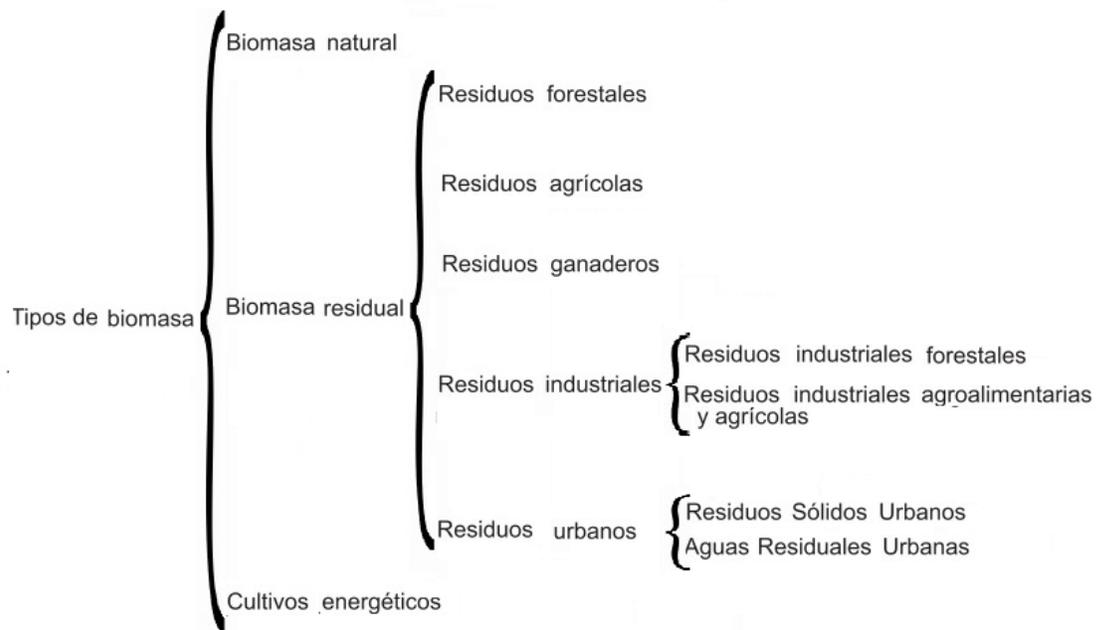
Por lo que queda claro que la biomasa es producida por diversas fuentes y diferentes actividades humanas, y puede clasificarse de acuerdo a la figura 1.2, explicándose los distintos tipos de biomasa en las siguientes páginas.

Figura 1.1 Clasificación general de la biomasa



Fuente: *todo lo que debes de saber sobre la bioenergía o energía de la biomasa*, por Portillo G., 2017, renovablesverdes.com. Copyright 2017 por renovablesverdes.com.

Figura 1.2 Clasificación de la biomasa



Fuente: *Tecnología de las energías renovables*, p. 307, por Fernández, J. M. 2009, Madrid: Mundi Prensa. Copyright 2009 por Mundi Prensa.

1.6.1 Biomasa natural

La biomasa natural es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana, esta es producida principalmente en las zonas con alta densidad de vegetación, de toda la biomasa que se produce en el planeta aproximadamente el 40 % se encuentra en los océanos (Fernández, 2009, p. 307). Como ejemplos de este tipo de biomasa podemos mencionar los recursos generados en las podas naturales de los bosques, la obtenida de la limpieza de bosques, etc. Los productos leñosos han sido la primera fuente de energía renovable utilizada por el hombre, incluso hoy en día para unos 2,500 millones de personas es su principal fuente de energía (Fernández, 2009, p. 308).

La biomasa natural es un recurso energético que se explota intensivamente en determinadas zonas del mundo, como ocurre en los países en vías de desarrollo en donde la biomasa constituye su base del consumo energético, pudiendo llegar a la sobreexplotación de sus recursos naturales y afectar de forma irreversible los ecosistemas naturales ocasionando situaciones de desertización. Es importante mencionar que la biomasa natural no debe ser explotada por encima de su tasa de renovación, ya que de lo contrario se puede provocar su agotamiento.

1.6.2 Biomasa residual

En la biomasa residual se incluyen los subproductos derivados de determinadas actividades como son las forestales, agrícolas, ganaderas, industriales, domésticas, etc. (Carta et al, 2009, p. 481). Los cuales se explican a continuación:

a) Residuos forestales

Los residuos forestales proceden de los procesos de mantenimiento de montes y bosques como pueden ser las podas, limpieza de matorrales, clareos, entresacas, desbroces, etc., así como de los residuos que se generan en las industrias de primera y segunda transformación de la madera (Fernández, 2009, p. 308).

Los residuos extraídos de los bosques y montes son utilizados como fuente de energía por comunidades cercanas, su principal desventaja son sus altos costos de transporte, mientras que los residuos de aserrío son utilizados por algunas industrias para la generación de calor o de vapor.

A pesar de que los residuos forestales y sus derivados han sido durante siglos la más importante fuente de energía, su uso actualmente ha disminuido notablemente (Fernández, 2009, p. 309).

La extracción de los residuos de montes y bosques presenta beneficios y perjuicios que son mostrados de manera resumida en la tabla 1.2 (Fernández, 2009, p. 308).

Tabla 1.2 Beneficios y perjuicios de la extracción de residuos de montes y bosques

Beneficios	Perjuicios
1) Se favorece la regeneración natural de las masas.	1) Aumento del peligro de erosión por la reducción de la cubierta vegetal.
2) Se incrementa el crecimiento volumétrico de la madera.	2) Pérdida de fertilidad por extracción de nutrientes.
3) Se obtienen productos maderables de mayor calidad.	
4) Se reduce considerablemente el peligro de incendios y la propagación de los mismos.	
5) Se mejora el estado fitosanitario de los montes y se reduce el riesgo de plagas.	

<p>6) Se facilita el acceso y los trabajos silvícolas y de extracción, con la consiguiente reducción de los costos de producción.</p>	
--	--

Los perjuicios antes mostrados pueden minimizarse realizando las extracciones de forma moderada, planificando los trabajos de manera racional, o dejando en los lugares de extracción una importante fracción de ramillas finas y hojas, ya que en estas se concentra el 80% de los nutrientes minerales de las plantas (Fernández, 2009, p. 309).

b) Residuos agrícolas

Los residuos agrícolas se caracterizan por su estacionalidad y son clasificados en residuos herbáceos (plantas verdes, pajas, cascarillas de cereales, tallos, etc.) y residuos leñosos (restos de podas, ramas, etc.), estos son obtenidos de los restos de cultivos de cereales o de las limpiezas que se realizan en el campo para evitar las plagas o los incendios (Carta et al, 2009, p. 482).

Los residuos herbáceos que no se destinan a la alimentación de animales pueden emplearse como combustible, mientras que una parte de los residuos leñosos suele usarse como combustible, y otra es simplemente incinerada para deshacerse de los mismos (Carta et al, 2009, p. 483). Los residuos herbáceos representan un importante potencial energético de difícil utilización, debido a su gran dispersión, baja densidad y ha que presentan problemas para su combustión (Fernández, 2009, p. 309).

c) Residuos ganaderos

Los residuos ganaderos constituyen una parte de la denominada biomasa animal, y que esta formada por subproductos generados por animales vivos, como el estiércol, las deyecciones sólidas y líquidas, purines y diversos restos de animales muertos como huesos, pellejos, etc. (Carta et al, 2009, p. 481).

Principalmente en las granjas se producen elevadas cantidades de estiércol, comúnmente una forma de tratarlo ha sido esparcirlo en los campos de cultivo para obtener beneficio de su valor nutritivo, sin embargo esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas (Fernández, 2009, p. 312). Es por esto que ha crecido el interés por encontrar métodos alternativos, eficaces y rentables, para la gestión y tratamiento de este tipo de residuos.

Principalmente podemos mencionar el tratamiento anaerobio para la producción de biogás a partir de los residuos generados en las granjas, aprovechado el biogás para la generación de calor o electricidad.

d) Residuos industriales

Los residuos industriales son generados por diversos y muy variados sectores industriales de los cuales podemos mencionar las industrias forestales, las industrias agroalimentarias y agrícolas.

Residuos industriales forestales

Los residuos industriales forestales son los subproductos que originan principalmente la industria maderera y papelera, ocupando una fracción importante dentro de los desechos reutilizables como biomasa, si la cantidad generada de estos residuos es alta, suele usarse como materia prima en otras industrias del sector, en cambio si es pequeña es utilizada como combustible en la propia industria o en el sector domestico (Fernández, 2009, p. 311). De todos los tipos de industria de este sector destacan las industrias de primera y segunda transformación de madera, la fabricación de productos de corcho y la fabricación de pasta de papel.

Residuos industriales agroalimentarias y agrícolas

Los residuos generados en estos sectores industriales son muy variados, dentro de las industrias que podemos mencionar que producen residuos capaces de utilizarse con fines energéticos son diversas industrias alimentarias, como las Industrias de conservación y envase de vegetales (huesos de fruta), las productoras de aceite de oliva (orujillos), las que elaboran frutos secos (cascaras), la productoras de vinos (despalillado), las que fabrican cerveza (bagazo), etc. (Carta et al, 2009, p. 485). De manera general estos residuos generados son solidos y líquidos con un alto contenido de carbohidratos, que pueden ser convertidos en combustibles gaseosos.

e) Residuos urbanos

Los residuos urbanos son aquellos que se originan en los núcleos de población como consecuencia de la actividad habitual y diaria del ser humano, estos son clasificados en dos grandes grupos: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y Aguas Residuales Urbanas (ARU) (Fernández, 2009, p. 310).

Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son una parte de los desechos (basura) que la humanidad genera en su domicilio, como son los restos de alimentos, papel, etc. (Carta et al, 2009, p. 486).

Los RSU están constituidos por una gran variedad de materiales, para que estos puedan ser utilizados con fines energéticos deben someterse a un proceso de separación en el que son apartados los materiales que no sirven como fuente de energía, como son el vidrio, el plástico o los metales (Fernández, 2009, p. 310).

Es importante mencionar que solo la parte orgánica de los RSU puede ser considerada como biomasa, la composición de los RSU es muy variable, soliendo ser del orden del 50 % en materia orgánica, dependiendo principalmente del tamaño de la población y de su nivel de vida, por lo que un aumento de ambas magnitudes produce una disminución de la proporción orgánica (Fernández, 2009, p. 310).

Aguas Residuales Urbanas (ARU)

Las aguas residuales urbanas (ARU) son residuos con un contenido muy elevado de agua y están formadas por los afluentes líquidos que producen los seres humanos en su actividad diaria, por lo que son clasificadas dentro de la biomasa animal (Fernández, 2009, p. 310).

Las principales aplicaciones de los RSU y las ARU son como fuente de energía, ya sea de forma directa o transformándolos en otros materiales combustibles, ya que aproximadamente el 80% de todos los residuos orgánicos generados en las ciudades pueden ser convertidos en energía (Fernández, 2009, p. 310). Además estos residuos pueden someterse a procesos de reciclaje para generar otros productos.

1.6.3 Cultivos energéticos

Se define como cultivo energético a cualquier tipo de planta que se hace crecer con la finalidad específica de producir biomasa para ser aprovechada energéticamente, ya sea de manera directa o para la producción de biocombustibles, son generalmente cultivados en tierras de bajo valor productivo.

Este tipo de cultivos presentan diversas aplicaciones y ventajas, entre las que podemos mencionar son las siguientes: Para controlar la erosión y la degradación de los suelos, pueden proveer una nueva vía de ingreso a los agricultores, son una opción para ser menos dependientes de los combustibles fósiles, y además

son una alternativa para reducir los costos de operación de las plantas de generación de energía (Fernández, 2009, p. 313).

Los cultivos energéticos se caracterizan por ser especies de arboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, empleándose también arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento para extender la capacidad de cosecha de la plantación, su periodo de cosecha es entre tres y diez años (Fernández, 2009, p. 314).

Como ejemplos de cultivos energéticos podemos mencionar el cardo, el girasol, etc., aunque también existen cultivos agrícolas que pueden ser usados con fines energéticos, entre ellos podemos mencionar la caña de azúcar, el maíz, el sorgo o el trigo, además se pueden emplear plantas oleaginosas como la palma de aceite, o la soja y algunas plantas acuáticas como el jacinto de agua o las algas, para producir biocombustibles líquidos como el etanol y el biodiesel (Fernández, 2009, p. 314).

La principal desventaja que presentan los cultivos energéticos es que requieren grandes extensiones de tierra para lograr una producción de energía rentable.

Los cultivos energéticos son normalmente clasificados en cuatro tipos: cultivos tradicionales, cultivos raros, cultivos acuáticos y cultivos óptimos, que son explicados a continuación.

a) Cultivos tradicionales

Se trata de cultivos que se han utilizado tradicionalmente para la alimentación humana, como son: la caña de azúcar, los cereales, la remolacha, etc.

b) Cultivos raros

Se trata de especies vegetales de características específicas, que pueden cultivarse en terrenos difíciles de explotar, ya sea con pendiente, con escasez de agua o malas condiciones climatológicas, por lo que estos cultivos no compiten con la producción de alimentos, ejemplos de estos son: las plantaciones de pitas (agave americana), los cardos, etc.

c) Cultivos acuáticos

Se tratan de especies vegetales acuáticas de agua salada (algas *Macrocystis* y *Nereocystis*) y de agua dulce (jacinto de agua).

d) Cultivos óptimos

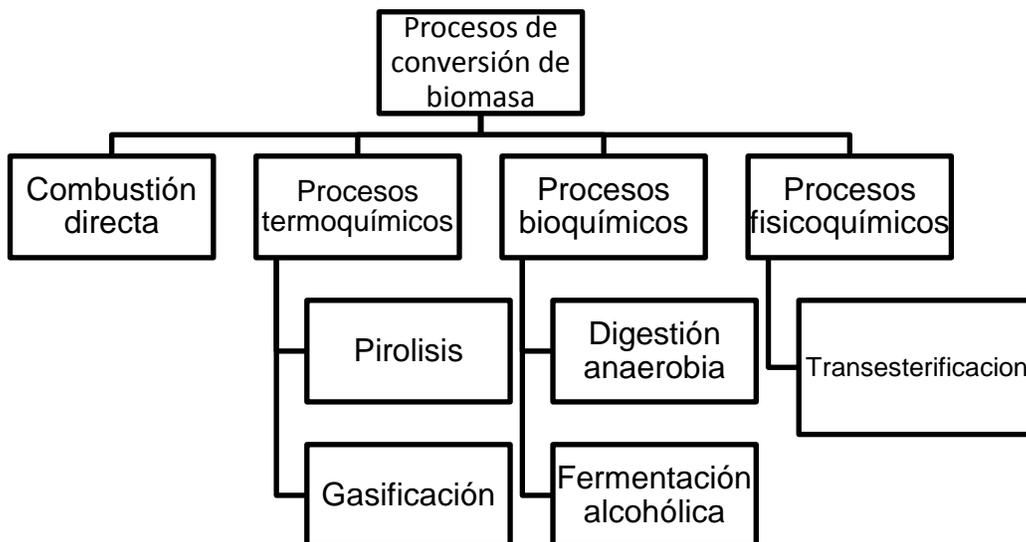
Se tratan de plantas que son capaces de producir sustancias que pueden ser usadas como combustibles, como ejemplos podemos mencionar: palmeras, jojobas, etc.

1.7 Transformación de la biomasa en energía

Como se había mencionado anteriormente la biomasa es un recurso que se presenta en una gran variedad de materiales, como pueden ser: la madera, aserrín, estiércol, residuos industriales, residuos urbanos, etc., las propiedades de algunos materiales permiten que puedan ser quemados directamente y así transformar su energía almacenada en calor, sin embargo, otros materiales tienen que ser transformados en una forma más adecuada para su transporte y utilización, dicho de otra forma estos requieren de una serie de procesos previos y diferentes tecnologías antes de su aprovechamiento (Carta et al, 2009, p. 486).

Principalmente los procesos de extracción de energía de la biomasa se pueden clasificar en procesos (figura 1.3) de combustión directa, procesos termoquímicos, procesos bioquímicos y procesos fisicoquímicos, estos se encuentran ordenados de acuerdo a su complejidad.

Figura 1.3 Procesos de conversión de biomasa



Fuente: *Centrales de energías renovables*, p. 493, por Carta et al. 2009, Madrid: Pearson. Copyright 2009 por Pearson.

En los procesos de combustión directa de la biomasa el calor generado es aprovechado inmediatamente y empleado in situ o a distancias cortas, ya sea en el hogar o en la industria, pero en los demás procesos de transformación de la biomasa se obtiene un producto combustible que puede ser sólido, líquido o gaseoso, es decir que la biomasa es convertida en productos derivados como pueden ser: carbón vegetal, bioetanol o biogás. A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los cuales se pueden clasificar principalmente en cuatro categorías.

1.7.1 Procesos de combustión directa

La combustión directa es el modo más antiguo y común para extraer la energía de la biomasa. En la combustión la materia orgánica reacciona químicamente con el oxígeno de manera exotérmica, transformándose su energía química almacenada en energía calorífica, obteniéndose dióxido de carbono, agua, y si los elementos azufre y nitrógeno forman parte de la materia orgánica, entonces también son producidos óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (N_yO_z).

Las principales variables que afectan este proceso son: las propiedades físicas, químicas y energéticas de la biomasa, así como las condiciones a las que la combustión es realizada (porcentaje de oxígeno y temperatura), principalmente debemos mencionar que si el oxígeno escasea la reacción no se completa y se obtiene carbón y monóxido de carbono, es por esto que se recomienda que la combustión se realice con un exceso de oxígeno (Carta et al, 2009, p. 496).

Una de las propiedades físicas más importantes de la biomasa es su grado de humedad, es importante mencionar que la biomasa utilizada como combustible debe contener una humedad inferior a 15%, ya que la evaporación del agua contenida en la biomasa consume parte de la energía liberada en la combustión, como ejemplo podemos mencionar que si se utiliza biomasa seca pueden obtenerse rendimientos cercanos al 80%, mientras que si se utiliza biomasa húmeda se consiguen rendimientos del 60% (Carta et al, 2009, p. 496).

Además otras características físicas de los materiales orgánicos como el tamaño y la densidad influyen en la duración del proceso de combustión.

En cuanto a las propiedades químicas de la biomasa es importante señalar que el contenido de azufre en la biomasa vegetal es mínimo, por lo que prácticamente no se producen emisiones de óxidos de azufre hacia la atmósfera (Carta et al, 2009, p. 496).

Las propiedades energéticas de la biomasa vienen dadas por el denominado poder calorífico, que representa la cantidad de energía liberada al realizarse una combustión completa de una determinada cantidad de combustible expresada en unidades de masa o volumen. Si el agua obtenida en la combustión es líquida se denomina poder calorífico superior (PCS), mientras que si el agua se presenta en forma de vapor se denomina poder calorífico inferior (PCI), este último es el utilizado realmente en la práctica, ya que el agua emitida de los equipos de combustión se encuentra en forma de vapor.

El poder calorífico superior de una muestra de biomasa puede ser estimado a partir de su composición elemental mediante la ecuación 1.2, obteniéndose el valor en kcal/kg.

$$PCS_m = 8.1 \cdot C + 34 \cdot \left(H - \frac{1}{8} \cdot O \right) + 2.5 \cdot S \quad (1.2)$$

Fuente: *Centrales de energías renovables*, p. 496, por Carta et al. 2009, Madrid: Pearson. Copyright 2009 por Pearson.

Donde:

$$PCS_m = \text{Poder calorífico superior másico} \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right]$$

C, H, O y S son las proporciones en peso respectivamente del carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre presentes en la materia orgánica.

Mientras que el poder calorífico inferior es determinado mediante la ecuación 1.3.

$$PCI_m = PCS_m - 220 \cdot \%W_H \quad (1.3)$$

Donde:

$$PCS_m = \text{Poder calorífico superior másico} \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$PCI_m = \text{Poder calorífico inferior másico} \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

W_H = Porcentaje másico de hidrógeno en la materia orgánica.

En la tabla 1.3 se muestran los poderes caloríficos de diferentes materiales orgánicos. Es importante mencionar que la composición de la mayoría de los biocombustibles es variable, por lo que el contenido energético por unidad de masa de un determinado material orgánico puede diferir significativamente de los

valores medios, mientras que el contenido energético por unidad de volumen depende de la densidad y puede variar aun más ampliamente (Gil, 2008, p. 357).

Tabla 1.3 Poderes caloríficos de diferentes materiales orgánicos

Material orgánico	Poder calorífico		Material orgánico	Poder calorífico	
	GJ/Tm	GJ/m ³		GJ/Tm	GJ/m ³
Carbón	28	50	Madera (60 % humedad)	6	7
Carbón vegetal	30	-	Paja	15	1.5
Estiércol	16	4	Papel	17	9
Gas Natural	55	0.04	Petróleo	42	34
Hierba	4	3	Residuos comerciales	16	-
Madera (0 % humedad)	18	9	Residuos de caña azúcar	17	10
Madera (20 % humedad)	15	9	Residuos domésticos	9	1.5

Fuente: *Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas*, p. 357, por Gil G. 2008, Madrid: Mundi Prensa. Copyright 2008 por Mundi Prensa.

El calor generado por los proceso de combustión es utilizado directamente en el hogar, para la cocción de alimentos y la calefacción mediante el empleo de estufas, hornos, chimeneas y calderas, además esta energía es aprovechada en plantas industriales para la generación de vapor, que puede ser empleado para la generación de electricidad.

Es importante mencionar que este tipo procesos son muy ineficientes, y que cuando no se realizan bajo condiciones controladas emiten contaminantes hacia la atmosfera, aunque estos inconvenientes se podrían minimizar con la implementación de mejores técnicas de operación y con el adecuado diseño de equipos.

1.7.2 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos son aquellos que transforman la biomasa en productos de mayor valor, al someterla a diferentes procesos de oxidación de manera incompleta, bajo condiciones controladas de presión y temperatura, rompiendo así su estructura en compuestos gaseosos, líquidos o sólidos, con una densidad y un poder calorífico más adecuado para su transporte y utilización en diversas aplicaciones, ya sea para generar calor o electricidad. Los productos combustibles a obtener están en función de la tecnología utilizada, a continuación

se describen detalladamente los principales procesos termoquímicos, la pirolisis y la gasificación.

a) Pirolisis

La pirolisis es la técnica más simple y antigua para procesar un combustible con el propósito de obtener otro mejor, consiste en calentar la biomasa en ausencia total de oxígeno para descomponerla en productos gaseosos, líquidos y sólidos de bajo peso molecular. Es importante mencionar que este proceso es realizado en ausencia total de oxígeno para evitar que la materia orgánica sea transformada en dióxido de carbono.

El proceso es iniciado aproximadamente a los 260 °C y finaliza alrededor de los 450 o 550 °C cuando son tratados residuos vegetales, mientras que cuando se utilizan RSU la temperatura suele ser más alta, llegando a alcanzar los 1000 °C (Carta et al, 2009, p. 502). Los productos obtenidos en este proceso son fracciones gaseosas (gas combustible), fracciones líquidas (hidrocarburos) y fracciones sólidas (carbón vegetal) (Clark & Deswarte, 2015, p. 72). Tanto la composición y el tipo de producto obtenido se ven afectados por las propiedades de la biomasa empleada (tipo), así como de las condiciones de operación del proceso (temperatura, presión, tiempos, etc.)

Existe una variante de este proceso denominada pirolisis súbita, esta opera en tiempos cortos y a temperaturas de entre los 800 y 1000 °C, obteniéndose un 10 % de material sólido y convirtiendo un 60 % en un gas rico en hidrógeno y monóxido de carbono, lo que es su principal ventaja frente a los métodos de gasificación convencionales (Carta et al, 2009, p. 504).

b) Gasificación

La gasificación consiste en oxidar parcialmente la biomasa mediante la presencia de un agente oxidante para producir un combustible gaseoso denominado gas de síntesis compuesto principalmente de H₂ y CO. La gasificación es llevada a cabo a temperaturas que oscilan entre 700 y 1000 °C, obteniéndose rendimientos de gas de hasta un 85%, en comparación con la pirolisis donde se obtiene un rendimiento de hasta el 35 % (Clark & Deswarte, 2015, p. 72). Además de utilizarse el gas de síntesis para la generación de calor y energía, este puede ser transformado en diversos productos químicos como son el metanol, éter dimetílico, alcohol, ácidos orgánicos, poliésteres y en otros combustibles gaseosos.

Este proceso es capaz de tratar diversos tipos de biomasa, como residuos forestales, agrícolas, alimentarios y residuos urbanos.

La biomasa molida y con un contenido de humedad inferior al 10% es recomendada para facilitar el proceso de gasificación, esta es calentada a 350 °C en ausencia de oxígeno por lo que se descompone térmicamente y se reduce a biomasa carbonizada sólida por desvolatilización, posteriormente entre los 700 y 1000 °C es añadido el agente oxidante (aire, vapor, CO₂, O₂ o una mezcla de éstos) para oxidarla, obteniéndose una mezcla gaseosa compuesta por CO, CO₂, CH₄, H₂ y H₂O acompañada por impurezas como alquitranes, carbonatos, compuestos alcalinos, compuestos de azufre y compuestos de nitrógeno, por lo que debe someterse a diversas etapas de procesamiento como filtración de barrera, limpieza de gas caliente y lavado húmedo para eliminar las impurezas y ser utilizado como gas de síntesis (Clark & Deswarte, 2015, p. 72).

1.7.3 Procesos bioquímicos

En los procesos bioquímicos la biomasa es ingerida y descompuesta en moléculas más simples por la acción metabólica de microorganismos que se encuentran en la biomasa, o que son agregados para realizar el proceso, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos de alta densidad energética. Es importante mencionar que en este tipo de procesos se obtienen buenos resultados cuando la biomasa tiene grandes cantidades de agua, por lo que estos son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termoquímicos. A continuación se explican detalladamente la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica, los dos procesos bioquímicos más conocidos.

a) Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso que se realiza en ausencia de aire en unos sistemas cerrados llamados biodigestores, en donde la biomasa es descompuesta por la acción metabólica de microorganismos anaerobios para producir un combustible gaseoso llamado biogás (compuesto principalmente de metano) y un fango rico en nutrientes que puede emplearse en la alimentación de animales y que es un buen fertilizante orgánico.

La materia que alimenta el proceso suele ser todo tipo de residuos orgánicos, como los ganaderos, de diversas industrias (azucareras, papeleras, etc.), ARU, etc.

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo en el que intervienen diferentes grupos de bacterias y que se desarrolla en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la hidrólisis los compuestos orgánicos insolubles son descompuestos en monómeros solubles en agua, en la acidogénesis los monómeros solubles son convertidos en ácidos orgánicos de

cadena corta, alcoholes, aldehídos y dióxido de carbono, posteriormente en la acetogénesis son transformados los productos de la acidogénesis en acetatos, dióxido de carbono e hidrógeno, y finalmente en la metanogénesis es producido el metano junto con dióxido de carbono a partir de los productos obtenidos en las etapas anteriores (Clark & Deswarte, 2015, p. 79).

Las principales variables que afectan al proceso son el tipo de biomasa y su composición, así como el contenido de sólidos de la materia prima, la acidez, la temperatura del proceso y el tiempo de retención.

Las aplicaciones más frecuentes del biogás son: para el calentamiento, generación de vapor y de electricidad, la tecnología de biodigestión ha sido fuertemente promovida en China e India para usos domésticos en sustitución de la leña.

b) Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso en el que ciertos microorganismos (bacterias y hongos) transforman los carbohidratos presentes en las plantas en bioetanol. Esta técnica se ha utilizado durante siglos para la producción de licores, por lo que es importante mencionar que la mayoría del bioetanol producido es obtenido siguiendo un proceso similar al de la cerveza.

Tradicionalmente la caña de azúcar y el maíz se han utilizado para la producción de bioetanol, recientemente los subproductos agrícolas y los residuos municipales se han empleado como materia prima para reducir aún más los costos de producción.

La biomasa es sometida a un pretratamiento en el que el almidón, la celulosa y la sacarosa son transformados en azúcares mediante hidrólisis de microorganismos (hidrólisis enzimática) o mediante reactivos químicos (hidrólisis química), posteriormente los azúcares son transformados en bioetanol hidratado mediante la fermentación alcohólica, y finalmente este es destilado y deshidratado.

El bioetanol presenta unas propiedades fisicoquímicas muy parecidas a la gasolina, por lo que puede emplearse en motores de combustión interna como sustituto de los combustibles fósiles, ya sea utilizándolo en forma pura o mezclado con otros combustibles para aplicaciones de transporte. Es importante mencionar que en ocasiones es necesario realizar modificaciones en los motores de combustión interna para el uso de bioetanol como combustible puro.

1.7.4 Procesos fisicoquímicos

Dentro de esta categoría se encuentran los procesos orientados a la producción de biodiesel mediante la transesterificación.

El biodiesel es un biocarburante líquido compuesto de ácidos grasos y esteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales de semillas oleaginosas, grasa animal, grasas recicladas, etc. (Fernández, 2009, p. 346). Es importante mencionar que aunque cualquier material que contenga triglicéridos puede aplicarse a la producción de biodiesel, la biomasa más utilizada para la síntesis de este biocarburante está compuesta por aceites vegetales convencionales: girasol y colza (Europa), soja (Estados Unidos), coco (Filipinas), etc. (Carta et al, 2009, p. 509).

A continuación se explica la transesterificación, que es el proceso de producción de biodiesel que más ventajas presenta. Inicialmente las semillas oleaginosas son sometidas a un proceso químico llamado arrastre del aceite con disolventes, donde se obtiene aceite y una torta (rica en proteínas), posteriormente, este aceite es filtrado, refinado o desgomado y es sometido al proceso de transesterificación, que consiste en mezclar el aceite vegetal o grasas con un alcohol (generalmente metanol) y un álcali (sosa cáustica), alterándose químicamente para formar una mezcla de esteres grasos (biodiesel) y glicerina (Carta et al, 2009, p. 509). De esta forma las moléculas de glicerina unidas a las moléculas de los triglicéridos que constituyen los aceites vegetales son sustituidas por moléculas de metanol produciéndose moléculas lineales parecidas a las de los hidrocarburos presentes en el diésel.

El biodiesel puede ser usado directamente como combustible en motores de ignición de compresión (diesel), pero el uso típico del biodiesel es como aditivo del diesel en proporción del 20%, aunque puede mezclarse en otras proporciones, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados, su gran ventaja es disminuir ampliamente las emisiones, el humo negro y el olor (Fernández, 2009, p. 346).

CAPITULO II

DIGESTIÓN ANAEROBIA Y DIGESTORES ANAEROBIOS

2.1 Metano, definición y fuentes en la naturaleza

El metano, principal componente del biogás fue identificado por primera vez por el físico italiano Alessandro Volta a finales del siglo XVIII como el gas inflamable que emergía de los pantanos, gas que tendría gran importancia para la sociedad en los siguientes siglos (Varnero, 2011, p. 9).

El metano es el hidrocarburo más sencillo que existe, su molécula (CH_4) está constituida por un átomo de carbono que se encuentra unido a cuatro átomos de hidrógeno a través de enlaces covalentes, tratándose de una sustancia incolora, inodora, no polar, muy inflamable y que se presenta en fase gaseosa (más ligero que el aire) en condiciones de temperatura y presión ordinarias.

En la naturaleza el metano es producido por la descomposición de materia orgánica y emitida a la atmosfera por diversas fuentes como son:

- La descomposición de los residuos orgánicos que se realiza en las aguas superficiales y los terrenos donde hay oxígeno mediante la digestión aeróbica, dando lugar al desprendimiento de metano.
- La descomposición de los residuos orgánicos que se realiza en los pantanos y vertederos mediante la fermentación anaeróbica, dando lugar al desprendimiento de metano.
- El biogás de origen fósil llamado gas natural, que es producto de la descomposición de residuos orgánicos que quedaron enterrados, por lo que el metano siempre es encontrado donde hay yacimientos de petróleo, además este es emitido durante las operaciones de extracción de petróleo, gas natural o carbón y durante la manipulación, procesamiento y transporte de combustibles de origen fósil (tuimpacto.org, 2014).
- El gas producido en la digestión de algunos animales de granja, principalmente los rumiantes como las vacas, ovejas y cabras son los que producen grandes cantidades de metano por un fenómeno llamado

fermentación entérica que ocurre en el estómago de estos animales y es la causa de las emisiones (tuimpacto.org, 2014).

- El metano emitido en los incendios forestales.

Lo anterior demuestra que el metano es producido mediante diversos procesos, y que pueden ser llevados a cabo de manera artificial y hacerlos mas eficientes.

Actualmente debido a los altos precios y escasez del petróleo, así como los problemas de contaminación por la quema de combustibles fósiles y por la mala disposición y tratamiento de los residuos orgánicos, se plantea que mediante los procesos de digestión se pueden resolver la problemática ambiental y energética que afectan a la sociedad, al poder estabilizar residuos orgánicos y al producir biogás combustible mediante estos procesos.

En los siguientes temas nos enfocaremos a hablar de los procesos de digestión, principalmente de la digestión anaerobia que es el tema central del presente trabajo.

2.2 Procesos de digestión y el tratamiento de residuos orgánicos

El tratamiento de los residuos orgánicos es logrado a través de diferentes procesos que permiten reciclarlos, transformándolos en productos con valor agregado. El reciclaje de los residuos orgánicos ha recibido un fuerte impulso, ya que ofrece alternativas no tradicionales de energía, así como biofertilizante y formas de descontaminar zonas y eliminar residuos (Varnero, 2011, p. 13).

En este tipo de procesos la población microbiana tienen una importante función en la transformación de los residuos orgánicos, teniendo un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células, lo que permite establecer bioprocesos en función de la presencia de oxígeno (digestión aerobia) o la ausencia de oxígeno (digestión anaeróbica), con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos (Varnero, 2011, p. 13). Ambos procesos implican reacciones de oxidación y de reducción que se explican a continuación.

2.2.1 Reacciones de oxidación y de reducción

Las reacciones de oxidación-reducción también conocidas como reacciones redox, son reacciones en las que se transfieren electrones de una especie química a otra (Chang, 2010, p. 135).

La oxidación implica la pérdida de electrones de una especie química, mientras que la reducción implica la ganancia de electrones de una especie química (Chang, 2010, p. 136). La oxidación de una especie química puede cambiar su estructura y sus propiedades químicas, en el caso de los contaminantes químicos, su oxidación puede hacer que se vuelvan inofensivos al cambiarse sus propiedades químicas (Thieman y Palladino, 2010, p. 212).

La oxidación de una especie química se identifica por un aumento de su número de oxidación debido a la pérdida de electrones, mientras que la reducción de una especie química implica la disminución de su número de oxidación debido a la ganancia de electrones.

Las reacciones redox forman parte importante de los fenómenos de la naturaleza, así como de muchas funciones celulares, como procesos en los que se llevan a cabo transferencia de electrones podemos mencionar las reacciones de combustión, y los procesos que realizan las células para degradar los azúcares y obtener energía.

Frecuentemente las reacciones de oxidación y de reducción se realizan simultáneamente. Durante estas reacciones, las moléculas de los agentes oxidantes (aceptadores de electrones), aceptan los electrones durante los procedimientos de transferencia. Frecuentemente el oxígeno (O_2), hierro (Fe^{+3}), sulfato (SO_4^{-2}) y nitrato (NO_3^-) están implicados en las reacciones redox de los procesos de digestión (biodegradación) (Thieman y Palladino, 2010, p. 212).

2.2.2 Digestión aeróbica

La digestión aeróbica es un proceso realizado por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular (Varnero, 2011, p. 13).

En la naturaleza este proceso es realizado en algunos ambientes, como son las aguas superficiales y lugares donde hay oxígeno, donde las bacterias aeróbicas degradan los contaminantes orgánicos. En las reacciones de digestión aeróbica, el O_2 oxida diversos materiales compuestos de moléculas orgánicas que van desde

residuos animales y vegetales, hasta productos petrolíferos, e incluso puede oxidar diversas sustancias químicas. En este proceso, el O_2 se reduce hasta producir agua. Los microbios pueden seguir degradando el componente orgánico del oxido para hacer mas sencillas y relativamente inofensivos los contaminantes orgánicos a moléculas como el dióxido de carbono (CO_2) y gas metano (CH_4) y de esta manera las bacterias obtienen energía que utilizan para crear más células (Thieman y Palladino, 2010, p. 212). Como dato adicional podemos mencionar que algunas bacterias aerobias también oxidan componentes inorgánicos como son los metales y el amoniaco.

La digestión aerobia es empleada por el hombre para tratar los lodos, estos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto lo que involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular (Varnero, 2011, p. 13).

2.2.3 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo que se efectúa en varias etapas en ausencia de oxígeno, este es realizado por un grupo de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores, y que al actuar sobre los desechos orgánicos de origen animal y vegetal los descomponen y transforman en biogás y en un lodo rico en nutrientes.

En el ambiente existen zonas en donde las concentraciones de oxígeno pueden ser muy bajas, como son los lugares muy contaminados, o muy profundos como los acuíferos, donde el oxígeno se difunde con dificultad, y el escaso oxígeno existente podría ser consumido rápidamente por las bacterias aerobias. Aunque es posible inyectar oxígeno en las zonas de tratamiento en donde las concentraciones de oxígeno son bajas, la biodegradación puede ocurrir de forma natural a través del metabolismo anaeróbico.

En el metabolismo anaeróbico también se llevan a cabo reacciones redox, sin embargo, en este proceso las bacterias anaerobias dependen de otros agentes oxidantes como son, el hierro (Fe^{+3}), el sulfato (SO_4^{-2}), y el nitrato (NO_3^-). Es importante mencionar que muchos microbios pueden desarrollar tanto metabolismos aerobios como anaeróbicos, es decir que cuando la cantidad de oxígeno de un medio disminuye, pueden cambiar a un metabolismo anaeróbico para continuar con la biodegradación (Thieman y Palladino, 2010, p. 213).

Empleando la digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, tanto de origen animal y vegetal, así como los efluentes de diversas industrias que

generan subproductos orgánicos como la alimentaria, fermentativa, papelera y de industrias químicas en subproductos útiles.

La digestión anaeróbica es clasificada en dos tipos, dependiendo del tipo de aceptores de electrones, existiendo la fermentación anaeróbica o la respiración anaeróbica que se explican a continuación.

a) Fermentación anaeróbica

En la fermentación anaeróbica la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad (Varnero, 2011, p. 14). En este tipo de proceso la propia materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones, dicho de otra manera el producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante su descomposición.

Es importante mencionar que de la producción total de metano dos tercios son producidos mediante fermentación anaeróbica, en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones, conociéndose esta vía comúnmente como metanogénesis acetotrófica (Varnero, 2011, p. 14). Además la fermentación anaeróbica puede emplearse para la recuperación de otros biocombustibles como el hidrógeno y el butanol y productos bioquímicos como nisina y ácido láctico.

b) Respiración anaeróbica

La respiración anaeróbica es definida como “un proceso biológico de oxidoreducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica” (Varnero, 2011, p. 15).

Este tipo de proceso requiere de agentes oxidantes externos para la aceptación de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica, como ejemplos de aceptores de electrones para la respiración anaeróbica tenemos el CO_2 , SO_4^{-2} o NO_3 , donde la energía liberada en este proceso es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica (Varnero, 2011, p. 15).

En la tabla 2.1 se muestra de manera resumida las sustancias a las que son reducidas los agentes oxidantes cuando aceptan los electrones liberados por la materia orgánica.

Tabla 2.1 Reducción de los agentes oxidantes

Agente oxidante	Reducido a
CO ₂	CH ₄
SO ₄ ⁻²	H ₂ S (por bacterias reductoras de sulfato)
NO ₃ ⁻	N ₂ (por bacterias reductoras de nitrato o desnitrificadoras)

De esta manera cuando el CO₂ acepta los electrones liberados por la materia orgánica, se reduce a gas metano (CH₄), la producción de CH₄ mediante esta vía se conoce como metanogénesis hidrogenotrófica y es responsable de un tercio de la producción total de metano, además ciertos microorganismos anaeróbicos también utilizan el CO₂ como aceptor de electrones y reducen el hidrógeno a ácido acético (Varnero, 2011, p. 15). Mientras que el sulfato y nitrato presente en la materia orgánica es reducido a H₂S y N₂ respectivamente.

2.2.4 Ventajas y desventajas de los procesos de digestión

Las principales ventajas que presenta la digestión aerobia frente a la digestión anaerobia, es que en la primera destacan su bajo capital de inversión y la fácil operación del sistema.

Dentro de las desventajas de la digestión aeróbica podemos mencionar sus altos costos de operación originados por los altos consumos de energía, la dificultad que presentan los lodos digeridos aeróbicamente para ser separados mediante centrifugación y filtración al vacío, pero principalmente nos encontramos con el inconveniente de que en este tipo procesos no se aprovecha el metano generado (Varnero, 2011, p. 15).

La digestión anaeróbica presenta diversas ventajas frente a la digestión aerobia, entre ellas podemos mencionar que la digestión anaeróbica tiene una tasa de degradación más rápida, se obtienen residuos más estables, un mayor porcentaje de compuestos orgánicos son convertidos en gases, se captura el biogás, se reducen las emisiones de olores y se tiene una menor producción de lodos.

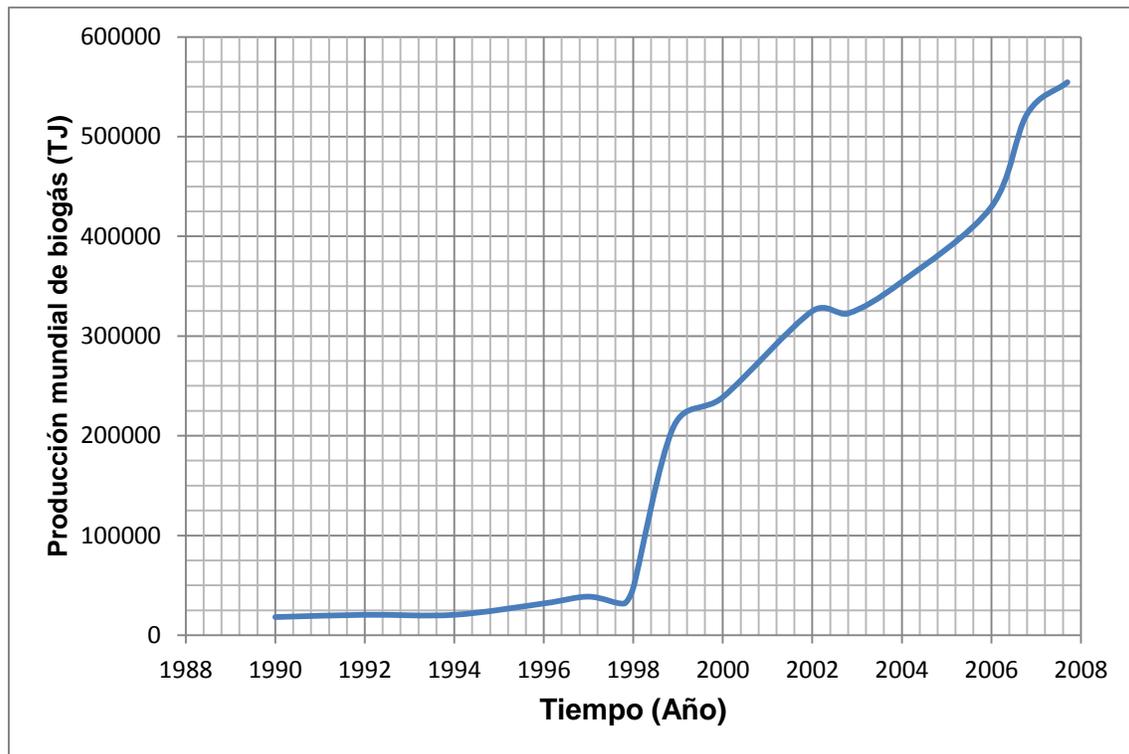
Por el contrario, podemos mencionar que una de las principales desventajas de la digestión anaeróbica es que durante el proceso se forman componentes minoritarios como el ácido sulfhídrico que contaminan el biogás y que puede complicar el manejo y aprovechamiento del mismo, por lo que es necesario eliminar.

2.3 Historia de la digestión anaerobia

Inicialmente el metano adquirió gran importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles, al finalizar la guerra y con la fácil disponibilidad de combustibles fósiles, la mayoría de las instalaciones de metano fueron cesando su funcionamiento (Varnero, 2011, p. 9). Posteriormente a mediados de la década de los 70 debido a los altos precios del petróleo, se investigaron otras formas de producir energía, es entonces cuando se experimento con los llamados reactores de alta carga, capaces de retener los microorganismos anaerobios y de tratar las aguas residuales y los vertidos de las industrias (Fernández, 2009 p. 330). Aunque ya desde comienzos de la década de los 60 se había impulsado notablemente en la India la tecnología (biodigestor) para la producción de biogás y la obtención de un biofertilizante a partir del estiércol bovino, y mas tarde a principios de la década de los 70 se fomento la construcción de biodigestores en China, mediante programas de ámbito nacional (Varnero, 2011, p. 9). Inicialmente la producción del biogás tuvo gran impulso en las zonas rurales, ya que ahí se cuenta con gran cantidad de desechos orgánicos de manera directa, por lo que el aprovechamiento de los residuos agrícolas y ganaderos se practica desde hace años en instalaciones individuales que utilizan el biogás para cocinar o como fuente de iluminación. Por lo que los biodigestores se han estado implementando en comunidades rurales aisladas y en países subdesarrollados para obtener el doble beneficio de conseguir solventar la problemática energética, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales. En cambio en los países desarrollados, la aplicación de la digestión anaerobia ha sido diferente, realizándose más bien por motivos medioambientales que únicamente energéticos, empleándose para la estabilización de lodos activos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Actualmente las políticas en materia de energías renovables y el impulso hacia la reducción de los desechos y las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado considerablemente la incorporación de las tecnologías anaeróbicas en el mundo desarrollado y occidental, donde la digestión anaeróbica ya no es sólo una opción de tratamiento de residuos, y el biogás es visto como una fuente energética renovable, alternativa al carbón y al petróleo, utilizado como combustible tanto a nivel industrial como doméstico. Actualmente también se han implementado el uso de cultivos energéticos para ser procesados mediante digestión anaerobia. En consecuencia, la producción de biogás ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, como es mostrado en la grafica 2.1.

Grafica 2.1 Producción bruta mundial de biogás



Fuente: *Biomass processing technologies*, p. 179, por Strezov, V. & Evans, T. 2015, Boca Raton: CRC Press. Copyright 2015 por CRC Press.

2.4 Biodigestores anaerobios

Las reacciones anaerobias que se llevan a cabo en la naturaleza se producen de forma industrial y artificial en unos sistemas llamados biodigestores anaerobios o reactores anaerobios, diseñados para producir energía y eliminar la contaminación de origen orgánico.

2.4.1 ¿Qué es un biodigestor?

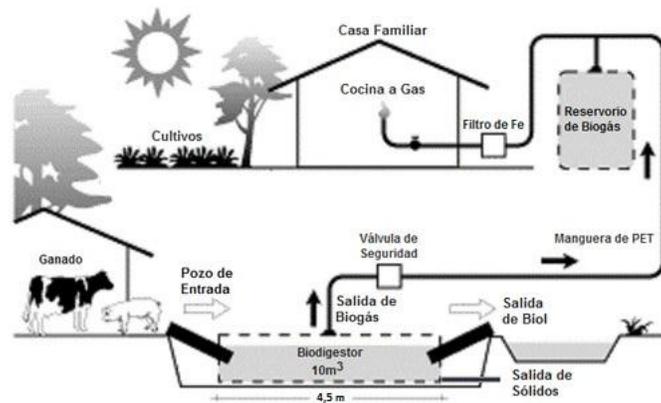
Un biodigestor o un digestor de desechos orgánicos es un recipiente cerrado herméticamente e impermeable (libre de oxígeno), diseñado para producir biogás y biofertilizante, mediante la descomposición y fermentación de una mezcla de materia orgánica y agua que se deposita dentro del biodigestor a unas determinadas condiciones (Fernández, 2009, p. 334).

En un principio los biodigestores anaeróbicos fueron diseñados para el tratamiento de lodos de depuradora y estiércol animal, actualmente el biogás es producido a partir de diversos materiales residuales como: las aguas residuales, bio-residuos, vertederos y residuos industriales y municipales, así como de cultivos energéticos.

2.4.2 Componentes de un biodigestor anaeróbico

Un biodigestor anaeróbico se encuentra principalmente constituido por un reactor cerrado, accesorios para la entrada de materia orgánica y agua, accesorios para la salida de biogás y para la descarga de materiales orgánicos estabilizados (biofertilizante), un contenedor para captar y almacenar el biogás, dispositivos para el mezclado y calentamiento del sistema, además también puede incluir cámaras de hidropresión y dispositivos post-tratamiento como filtros a la salida del reactor. Estos dispositivos se describen a continuación de manera resumida, y en la figura 2.1 se muestra un esquema general de un sistema de digestión anaeróbica.

Figura 2.1 Esquema general de un sistema de biodigestión anaeróbica.



Fuente: *Biodigestor tubular*, por Fundación Energizar, 2017, Argentina. Copyright 2017 por Fundación Energizar.

a) Reactor de digestión

Este es el componente principal del sistema y es donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica, estos pueden ser diseñados de forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular y son construidos con diversos materiales como: polietileno de alta densidad (HDPE), ladrillo, concreto y acero inoxidable. En la actualidad la mayoría de los biodigestores son diseñados de forma cilíndrica, y generalmente los biodigestores familiares están construidos de polietileno.

b) Sistema de alimentación

Este permite la alimentación de la mezcla de materia orgánica y agua, que generalmente es introducida por la parte superior del biodigestor.

c) Sistemas de salida

Principalmente un biodigestor cuenta con dos conductos de salida, uno que traslada el biogás producido a otro recipiente llamado gasómetro, y el otro conducto permite recolectar y descargar los materiales orgánicos estabilizados (biofertilizante).

d) Gasómetro

También conocido como reservorio es un recipiente donde se almacena el biogás producido en el reactor de digestión, y que mediante mangueras es conectado al aparato con el que se utilizara el biogás.

e) Manómetros

Estos son instalados en varios puntos del sistema para indicar la presión del biogás.

f) Sistema de calentamiento del biodigestor

En algunas instalaciones los biodigestores son calentados por medio de la recirculación de lodos del digestor a través de un intercambiador exterior de agua caliente, utilizándose el biogás del biodigestor como combustible de caldera, donde el agua caliente es bombeada desde la caldera al intercambiador de calor, donde cede su calor al lodo recirculante, en algunos equipos la caldera y el intercambiador de calor están combinados y el lodo pasa también a través del equipo (Varnero, 2011, p. 83).

2.5 Tipos de biodigestores

Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización. Principalmente podemos clasificar los digestores en dos categorías dependiendo de la tecnología utilizada para su diseño, existiendo digestores de baja tecnología, aquellos que son diseñados para su manejo en situaciones rurales y aquellos diseñados para aplicaciones industriales sofisticadas y que cuentan con dispositivos para su calefacción y agitación. Otra forma de clasificarlos es por su modo de operación, pueden ser digestores continuos, semicontinuos o discontinuos. Empezaremos describiendo sus modos de operación para después

hablar de las diferentes variantes de digestores que se encuentran en el medio rural y posteriormente abordar los más sofisticados.

2.5.1 Clasificación de los digestores por su modo de operación

Antes de empezar a hablar de los biodigestores de baja tecnología y de los industriales resulta importante clasificarlos según su modo de operación con relación a su alimentación o carga, encontrándose biodigestores que operan de forma continua, semicontinua o discontinua y que se explicaran a continuación, antes de esto es importante mencionar una variable llamada tiempo de residencia hidráulico (TRH), definido como el tiempo que la biomasa permanece dentro del biodigestor.

a) Biodigestores continuos

Los biodigestores continuos se caracterizan por no cesar su actividad en ningún momento, en estos el material que se descarga (efluente) es igual al material que se carga (afluente) en el biodigestor, con producciones de biogás uniformes en el tiempo, principalmente estos son aprovechados en aplicaciones industriales en plantas de gran capacidad o para el tratamiento de aguas negras, contando con equipos para su alimentación, calefacción y agitación (Varnero, 2011, p. 97). Una de las variables a tener en cuenta en este tipo de biodigestores es el ya mencionado tiempo de residencia hidráulico (TRH), son diversas las variantes de este tipo de biodigestores pero el valor del TRH de este tipo va desde 1 día hasta los 25 días (Carta et al, 2009, p. 506).

b) Biodigestores Semicontinuos

Este modo de operación resulta cuando la primera carga que se introduce al biodigestor consta de una gran cantidad de materias primas, después se agregan nuevos volúmenes de cargas y posteriormente se descarga el efluente normalmente en la misma cantidad del afluente que se agregó, este modo de operación es usado en sistemas pequeños para uso doméstico como en el medio rural como son el biodigestor Chino e Indiano (Varnero, 2011, p. 97).

c) Biodigestores discontinuos

Los biodigestores discontinuos también son conocidos como biodigestores Batch, estos son cargados con materias primas en forma de lotes, es decir que después de que se inicia la digestión anaeróbica el proceso es detenido cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás producido desciende a un nivel bajo, es cuando el biodigestor es vaciado por completo, se

almacena el biogás producido y se descarga la materia sólida no digerida, posteriormente el biodigestor es nuevamente cargado y es iniciado un nuevo proceso de digestión anaerobia (Varnero, 2011, p. 97). Como dato adicional podemos mencionar que en este tipo de biodigestores el TRH va desde los 20 a 60 días (Carta et al, 2009, p. 506).

Por tanto queda claro que los digestores pueden operar de tres modos distintos, aunque dependiendo de diversos factores, es preferible que el proceso sea continuo, ya que de forma general los residuos son producidos continuamente y existe una demanda continua de biogás.

2.5.2 Biodigestores de baja tecnología

Se trata de biodigestores que operan de manera continua o semicontinua y que son construidos en comunidades rurales con materiales locales, y que presentan las ventajas de no necesitar generalmente calentamiento y que son mezclados manualmente. Este tipo de biodigestores tienen un éxito parcial cuando están respaldados de alguna manera, como ejemplo podemos mencionar los miles de digestores rurales sencillos en Asia, respaldados por los gobiernos en Nepal, Corea, China y la India (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 342). Dentro de esta categoría podemos mencionar el biodigestor tipo chino e indiano que se explican a continuación.

a) Biodigestor tipo chino

El biodigestor tipo chino es un tanque diseñado en forma cilíndrica con el techo y el piso en forma de domo, es este tipo de biodigestor construido para mantenerse totalmente enterrado (Varnero, 2011, p. 98). En la figura 2.2 se muestra un esquema general de un biodigestor tipo chino.

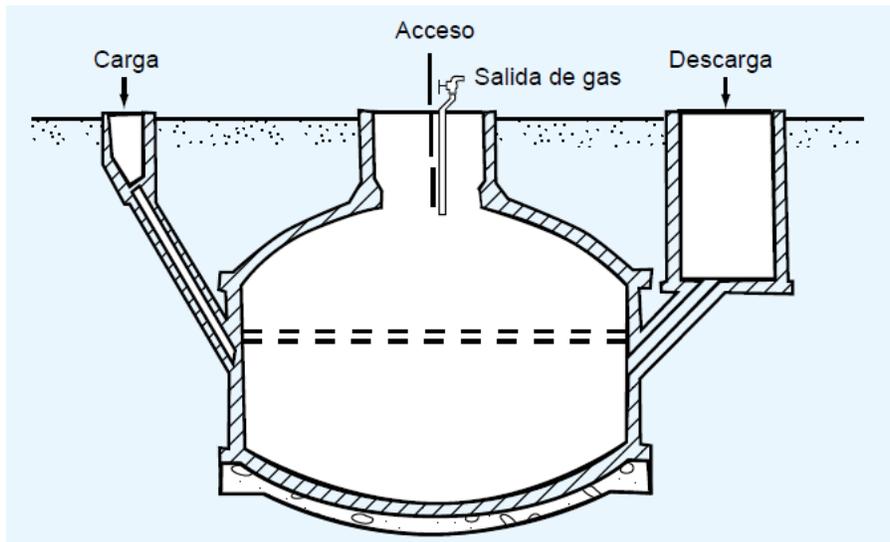
A continuación se describe brevemente el funcionamiento de un biodigestor chino, primeramente el biodigestor es llenado con residuos agrícolas compostados, mezclados con lodos activos de otro biodigestor, una vez cargado este es alimentado diariamente con todo tipo de residuos orgánicos disponibles a través del tubo de carga, como ejemplos de residuos orgánicos podemos mencionar los de la letrina y los generados por los animales domésticos (Varnero, 2011, p. 98).

Este tipo de biodigestor no cuenta con gasómetro por lo que el biogás producido se almacena dentro del sistema, por lo que se generan variaciones de presión en el biodigestor, aumentando la presión al generarse el biogás y disminuyendo al consumirse éste, por lo que se ve afectada de manera negativa la eficiencia en los equipos consumidores de biogás.

La principal desventaja de este tipo de biodigestor es que es poco eficiente para generar biogás, de 0.15 a 0.20 volúmenes de gas por volumen de biodigestor/día (Varnero, 2011, p. 98).

Los tiempos de retención para el modelo chino son generalmente largos, de 30 a 60 días, lográndose excelentes producciones de biofertilizante que puede ser mezclado con el suelo antes de la siembra, es importante mencionar que una o dos veces al año el digestor se vacía completamente aplicando el residuo sólido a los campos de cultivo (Varnero, 2011, p. 98).

Figura 2.2 Esquema general de un biodigestor tipo chino



Fuente: *Manual del biogás*, (p. 98), por Varnero, M. T, 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

b) Biodigestor tipo Indiano

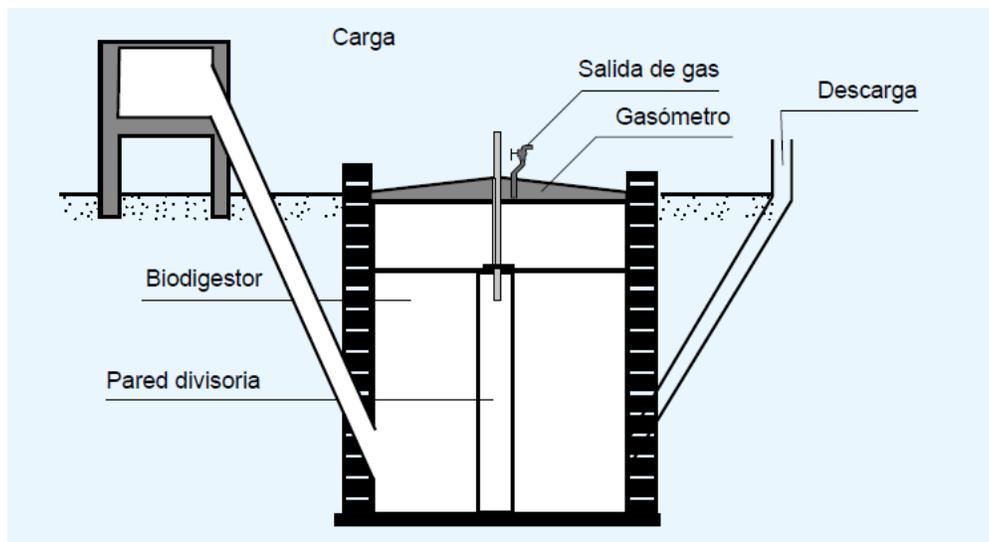
El biodigestor tipo Indiano generalmente tiene forma vertical y se encuentra enterrado, son similares a un pozo, este es cargado por gravedad una vez al día, produciéndose una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación (Varnero, 2011, p. 98). En la figura 2.3 se muestra un esquema general de un biodigestor tipo indiano.

Este tipo de biodigestor cuenta con un gasómetro que se encuentra en la parte superior del pozo, tratándose de una campana que flota donde se almacena el biogás, con esta campana se logra obtener una presión baja de biogás sobre la superficie de la mezcla, una presión constante que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta, y además ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores (Varnero, 2011, p. 99).

La alimentación de la materia prima en este tipo de biodigestor es realizada por gravedad, lo que produce agitación y provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. La materia orgánica empleada para alimentar el biodigestor son preferentemente excretas que deben estar bien diluidas y mezcladas de forma homogénea (Varnero, 2011, p. 100).

El biodigestor tipo Indiano tiene un gran rendimiento de producción de biogás en comparación con el biodigestor tipo chino, de 0.5 a 1.0 volúmenes de biogás por volumen de biodigestor/día (Varnero, 2011, p. 100).

Figura 2.3 Esquema general de un biodigestor tipo Indiano



Fuente: *Manual del biogás*, (p. 99), por Varnero, M. T, 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

2.5.3 Reactores y sistemas anaerobios industriales

En esta parte encontramos los reactores con aplicaciones industriales que van desde el diseño mas simple llamado reactor de mezcla perfecta, hasta las innovaciones recientes como son los reactores de película que emplean organismos inmovilizados.

a) Reactores de mezcla perfecta

Los reactores de mezcla perfecta (CSTR) son los biodigestores más simples y los más utilizados para el tratamiento de residuos de bajo contenido en solidos (2-10 % de materia seca) por lo que son comúnmente aplicados para el tratamiento de sedimentos y estiércol, estos son biodigestores perfectamente mezclados y de

alimentación continua, el mezclado puede ser mecánico o neumático (recirculación de biogás a presión) teniendo las siguientes aplicaciones (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 343):

- Distribuir la alimentación de la materia prima.
- Impedir la acumulación de sólidos no digeridos.
- Distribuir el calor aplicado.
- Impedir la acumulación de películas o natas.

Es conveniente utilizar un gasómetro para almacenar parte del biogás producido ya que la utilización del biogás no es generalmente constante en el transcurso del día, como regla general este puede tener la mitad del volumen del biodigestor, algunos biodigestores en vez de usar contenedores separados emplean techos inflables o bolsas colectoras para almacenar el biogás.

Además los reactores de mezcla perfecta pueden tener un área de reposo que permita la recolección de los microorganismos sedimentados para su reposición al biodigestor.

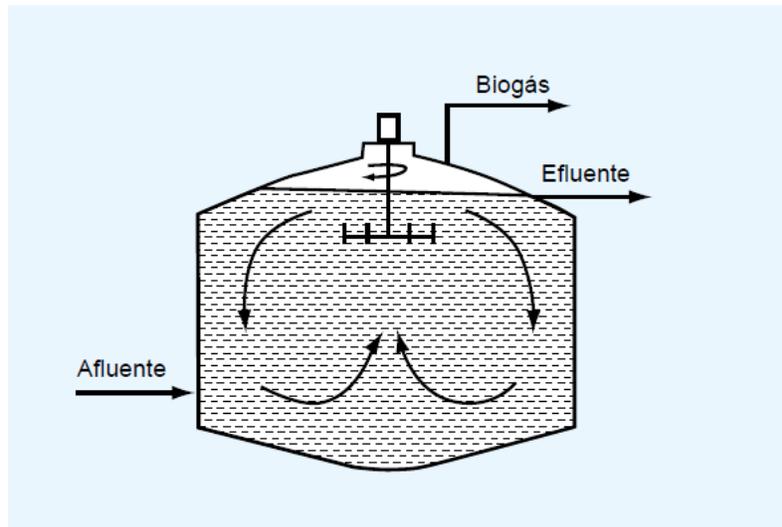
Los reactores de mezcla perfecta los podemos clasificar en dos variantes que son el reactor de mezcla perfecta sin recirculación y el reactor de mezcla perfecta con recirculación y que son explicados a continuación.

Reactor de mezcla perfecta sin recirculación

En la figura 2.4 se muestra un esquema general de un reactor de mezcla perfecta sin recirculación. Se trata de “un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos” (Fernández, 2009, p. 336). Estos pueden operar de manera continua o semicontinua, teniendo un TRH de alrededor de 15 a 20 días, por lo que son adecuados para tratar residuos de animales (Strezov, & Evans, 2015, p. 197).

Como principal ventaja de este tipo de reactores podemos mencionar la amplia gama de sólidos totales que pueden tratar con éxito y como desventajas podemos mencionar que su TRH es alto en comparación con otros reactores, además de que en estos no son repuestos los microorganismos en el sistema ya que estos se lavan con el efluente.

Figura 2.4 Esquema general de un reactor de mezcla perfecta sin recirculación



Fuente: *Manual del biogás*, (p. 92), por Varnero, M. T, 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

Reactor de mezcla perfecta con recirculación

En la figura 2.5 se muestra un esquema general de un reactor de mezcla perfecta con recirculación. Este sistema también es conocido con el nombre de reactor anaerobio de contacto, y es el equivalente al sistema de fangos activos aerobios que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales (Fernández, 2009, p. 337).

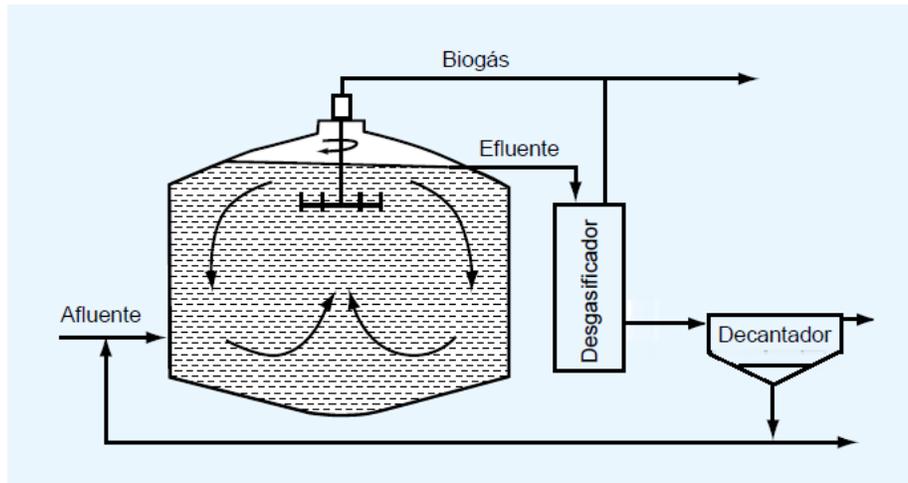
El reactor de mezcla perfecta con recirculación se desarrolló para mejorar el reactor de mezcla perfecta sin recirculación, ya que el primero opera reteniendo microorganismos con lo que se consigue un menor TRH mediante la recirculación de microorganismos que son separados de la corriente del efluente mediante un decantador y que son reciclados de nuevo en el reactor.

Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema solo es utilizado para tratar aguas residuales de alta carga orgánica en las que es posible una separación de fases líquido-sólido, como son las aguas residuales provenientes de industrias azucareras y cerveceras, así como residuos de productos lácteos, obteniéndose del decantador una fracción sólida consistente básicamente en flocos biológicos que se recirculan en el reactor (Fernández, 2009, p. 337).

Uno de los inconvenientes de este sistema es que el efluente descargado contendrá en su composición una fracción de la materia orgánica no digerida así

como de la población microbiana todavía activa. En los siguientes sistemas que se describirán se evitarán estos inconvenientes.

Figura 2.5 Esquema general de un Reactor de mezcla perfecta con recirculación



Fuente: *Manual del biogás*, (p. 93), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

b) Reactores de película

Estos reactores corresponden a los que emplean microorganismos inmovilizados sobre un soporte, estos se dividen en dos variantes, los llamados filtros anaerobios que tienen un medio de soporte estacionario para la unión de los microorganismos y los de lecho fluidizado en el que el propio soporte esta en movimiento en la corriente del liquido, pero empezaremos hablando de una variante que es considerado el diseño mas simple de los sistemas con retención de biomasa, los denominados reactores anaerobios de capa de flujo ascendente.

Reactor anaerobio de flujo ascendente

El reactor anaerobio de flujo ascendente también es conocido como UASB por sus siglas en ingles, se trata de un reactor de biopelícula fija sin medio de soporte desarrollado por G. Lettinga en Holanda y que se muestra en la figura 2.6. Este sistema es empleado para el tratamiento de residuos solubles de baja concentración, por lo que ha sido extensamente utilizado para el tratamiento aguas residuales generadas por la industria agroalimentaria. Su principal ventaja es que retiene una gran población activa de microorganismos evitando que sean arrastrados al descargar el efluente.

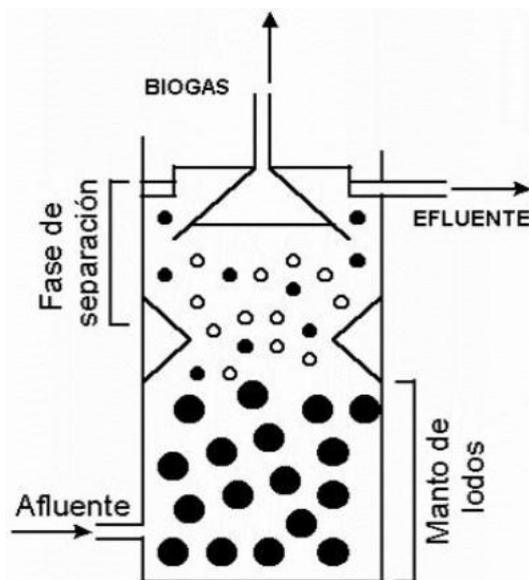
En un UASB la población activa de microorganismos forma gránulos densos que son altamente sedimentables, con lo que se logra una concentración muy alta de

biomasa activa por unidad de volumen de trabajo (Strezov, & Evans, 2015, p. 199).

Los UASB operan en modo de flujo ascendente, es decir que las aguas residuales entran por la parte inferior del reactor, pasan a través de un lodo granular activo y finalmente mediante un dispositivo de separación gas-líquido-sólido el biogás es recogido en un colector de gas, el efluente líquido sale del reactor y el lodo sólido es depositado de nuevo.

Como ejemplos de residuos que forman fácilmente lodos granulares podemos mencionar los residuos de azúcar y los residuos ácidos altamente volátiles. Dentro de las limitaciones del UASB es importante mencionar que algunos residuos desarrollan los lodos granulares lentamente mientras que en algunos residuos estos no se desarrollan, por lo que el UASB no trata con efectividad los residuos particulados, ya que las partículas interfieren con la floculación.

Figura 2.6 Esquema general de un Reactor anaerobio de flujo ascendente



Fuente: *Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) Antología*, p. 20, por Márquez, M. y Martínez, S. A., s. f., México: Centro Tecnológico Aragón. Copyright por Centro Tecnológico Aragón.

Filtros anaerobios

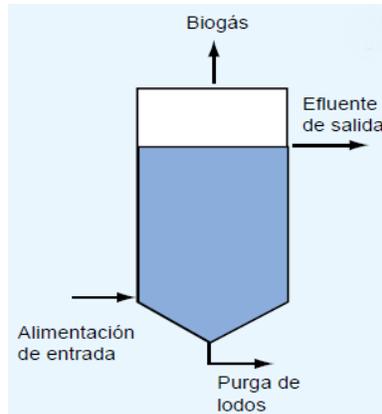
En este sistema las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte inerte que puede ser un material cerámico o plástico, como puede ser grava, bolas de cristal, barro cocido, PVC comercial o poliéster perforado con agujas, formando biopelículas o columnas de relleno, donde las aguas residuales son pasadas sobre estos soportes con un flujo vertical.

La distribución de los soportes puede ser de dos formas, encontrándose irregular o regular.

- **Distribución irregular**

Se trata de un filtro anaerobio con flujo ascendente donde las bacterias se encuentran mayoritariamente atrapadas en los intersticios.

Figura 2.7 Esquema general de un filtro anaerobio con flujo ascendente

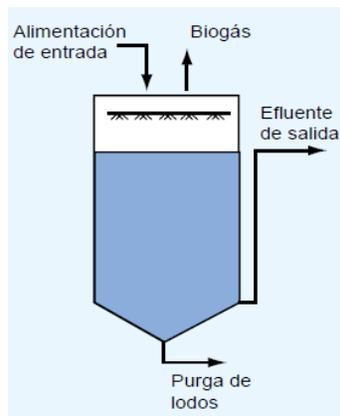


Fuente: *Manual del biogás*, (p. 87), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

- **Distribución regular**

Esta variante recibe el nombre de lecho fijo con flujo descendente, en el que los soportes están orientados verticalmente y la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas.

Figura 2.8 Esquema general de un filtro anaerobio con flujo descendente



Fuente: *Manual del biogás*, (p. 87), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

Estos sistemas han sido utilizados para el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria agroalimentaria así como para tratar los residuos animales y vegetales de entre 1 y 10 % de materia seca.

En comparación con el UASB los filtros anaerobios tienen la ventaja de poder tratar residuos particulados, como desventajas de estos sistemas podemos mencionar que estos pueden obstruirse, pero su principal inconveniente es que no se ha encontrado todavía un medio de soporte óptimo, por lo que la naturaleza y la combinación del soporte material afecta mucho al proceso (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 343).

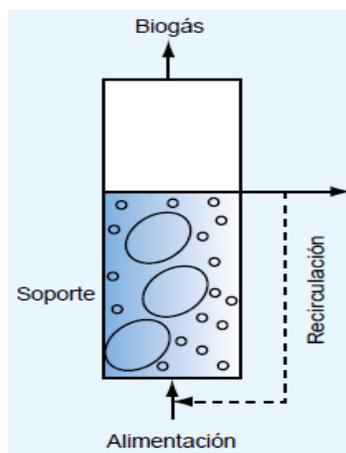
Reactor de lecho fluidizado

Un reactor de lecho fluidizado es un reactor de película fija, en el que las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente y la recirculación de las aguas residuales. Estos sistemas son empleados para tratar aguas residuales generadas por la industria agroalimentaria, así como las fracciones líquidas de los residuos ganaderos.

En un reactor de lecho fluidizado se utilizan como medio de soporte, arena, partículas de PVC y gránulos de carbono, aunque al igual que con los filtros anaerobios no ha sido encontrado un medio de soporte óptimo (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 343).

Al igual que los filtros anaerobios los reactores de lecho fluidizado pueden tratar materiales particulados, además en estos últimos la obstrucción tiende a desaparecer en comparación con los filtros anaerobios.

Figura 2.9 Esquema general de un reactor de lecho fluidizado



Fuente: *Manual del biogás*, (p. 90), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

2.6 Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo, los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora la dividen en cuatro reacciones bioquímicas (o cuatro etapas), es importante mencionar que muchas de estas reacciones ocurren de manera simultánea, pero cada una se desarrolla a diferentes velocidades e intervienen distintos tipos de microorganismos. A continuación se explican las cuatro etapas.

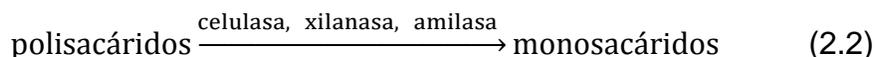
2.6.1 Hidrólisis

La hidrólisis es la primera etapa de la digestión anaerobia, en esta las moléculas complejas (almidón, carbohidratos, celulosa, lípidos y proteínas) son hidrolizados, es decir son convertidos en compuestos solubles más sencillos (azúcares simples, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos), de forma que los polímeros son convertidos en monómeros y oligómeros que posteriormente serán metabolizados en la siguiente etapa.

La hidrólisis es catalizada por las enzimas extracelulares excretadas por microorganismos hidrolíticos. La velocidad a la que se lleva a cabo la hidrólisis depende de la complejidad de la materia orgánica, como ejemplo podemos mencionar que los hidratos de carbono son hidrolizados muy rápidamente, mientras que los residuos celulósicos crudos son hidrolizados lentamente, es importante mencionar que la etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad global del proceso de digestión, en especial cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos.

Dentro de los factores que afectan a la hidrólisis podemos mencionar la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, el tamaño de partículas, la composición bioquímica del sustrato, el nivel de PH, la concentración de NH_4^+ y de los productos de la hidrólisis (Varnero, 2011, p. 19).

Las principales reacciones de la etapa de hidrolisis son mostradas a continuación (Strezov, & Evans, 2015, p. 182):

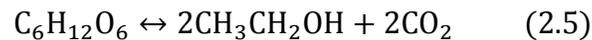


2.6.2 Acidogénesis o fermentación

La acidogénesis o también llamada fermentación es la segunda etapa de la digestión anaerobia, en esta etapa tiene lugar la fermentación de los productos de la hidrólisis por un conjunto de microorganismos denominados formadores de ácidos, compuestas de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV) principalmente ácido láctico, propiónico, butírico y valérico, además de acetatos y alcoholes (principalmente etanol) que serán oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente etapa. Durante esta etapa también se produce ácido acético, fórmico e H_2 , compuestos que son utilizados directamente en la etapa cuatro. Además se producen amoníaco, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

Además de que las bacterias denominadas formadoras de ácidos producen el alimento para los grupos de bacterias de las siguientes etapas, también eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema (Varnero, 2011, p. 19).

Las reacciones que se llevan a cabo en esta etapa se muestran a continuación (Strezov, & Evans, 2015, p. 182):



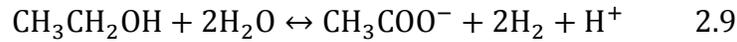
2.6.3 Acetogénesis

La Acetogénesis es la tercera etapa de la digestión anaerobia, en esta, el etanol, AGV y algunos compuestos aromáticos son transformados por las bacterias acetogénicas en productos más sencillos, como ácido acético, acetato e hidrógeno que serán utilizados como sustrato por las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

Llegando a esta etapa del proceso de digestión, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y por medio de su metabolismo eliminan sus propios productos de desecho de sus células (Varnero, 2011, p. 19).

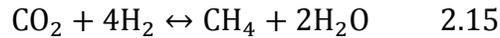
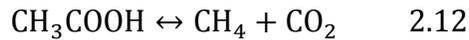
Las rutas de la producción de ácido acético, acetato e hidrógeno son mostradas en las siguientes reacciones (Strezov, & Evans, 2015, p. 182):





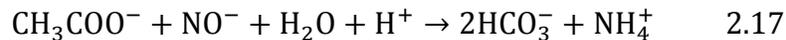
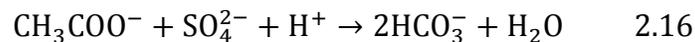
2.6.4 Metanogénesis

La metanogénesis es la última etapa de la digestión anaerobia, en esta un amplio grupo de bacterias anaeróbicas denominadas metanogénicas, actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores (acetato, formato, H_2 , CO_2 , metanol y algunas metilaminas) para dar lugar a la formación de metano, dióxido de carbono y agua. Como este grupo de bacterias son la responsables de la producción del producto principal pueden ser consideradas como las mas importantes de todas la que intervienen en el proceso de digestión. Las reacciones que ocurren en la metanogénesis son mostradas a continuación (Strezov, & Evans, 2015, p. 183):



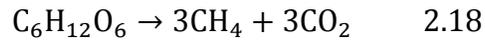
Los microorganismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y que dependiendo del sustrato principal que metabolizan se dividen en hidrogenotróficos, que consumen H_2 , CO_2 y fórmico, y en acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas (Varnero, 2011, p. 22).

Otras reacciones importantes que ocurren en el proceso de digestión anaerobia son las siguientes (Strezov, & Evans, 2015, p. 183):



Es importante mencionar que aunque el proceso de digestión anaerobia se divide en cuatro etapas separadas, de manera realista todas las etapas ocurren simultáneamente y sinérgicamente, en el sentido de que el primer grupo de microorganismos debe realizar su acción antes de que pueda producirse la segunda etapa (Strezov, & Evans, 2015, p. 181).

Por ultimo se muestra en la ecuación 2.18 una reacción general que simplifica todo el proceso de la digestión anaerobia.



2.6.5 Digestión en dos etapas

La digestión en dos etapas también es conocida como digestión en dos fases, se trata de una modificación del proceso de digestión, en el que la eficiencia podría ser mejorada separando las etapas de la digestión anaerobia, ya que los diferentes grupos de la población microbiana que intervienen en las distintas etapas, tienen condiciones de operación optima diferentes, por ejemplo podría mejorarse la eficiencia de la etapa de acidificación separándola para agregar bacterias fermentativas e hidrolíticas o en la etapa metanogénica que requiere bacterias metanógenas.

2.7 Factores que afectan la producción de biogás

En esta parte se explicaran los factores más importantes que afectan la producción de biogás. Empezaremos hablando de los tipos de materia orgánica y de sus características con las que deben de contar para que se lleve a cabo el proceso de biodigestión, para después abordar las variables de operación que afectan al proceso de biodigestión.

2.7.1 Tipos de materia orgánica

Una de las formas de clasificar la materia orgánica para la alimentación de la digestión anaerobia es en base al origen de estos, pueden ser residuos agrícolas, estiércol animal, cultivos energéticos, residuos procesados y residuos domésticos y municipales.

a) Residuos agrícolas

Los residuos agrícolas se clasifican principalmente en biomasa agrícola verde y seca. La biomasa verde es digerida con éxito, en cambio la seca (paja, restos de la mazorca, bagazo, etc.) tiene una digestibilidad pobre.

b) Estiércol animal

Los métodos intensivos de cría pueden dar lugar a gran cantidad de estiércol que en ocasiones no puede ser tratado en formas tradicionales por la ausencia de tierra, además de que genera problemas por los malos olores, por lo que el estiércol puede ser tratado mediante digestión anaerobia. Por ejemplo del estiércol de los rumiantes en comparación con los no rumiantes, se dan producciones de biogás más favorables.

Por lo que queda claro que la digestión anaeróbica tiene potencial en agricultura y ganadería, para la reducción de la contaminación y de los patógenos, el control de los olores y la producción de energía (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 343).

c) Cultivos energéticos

Es importante mencionar que en países con más tierra por habitante ha sido investigado el uso de cultivos energéticos como materia prima para la digestión anaerobia, con los que se obtienen buenos rendimientos de biogás cuando se codigestan con estiércol.

d) Residuos del procesamiento industrial

En este apartado se consideran especialmente los residuos de la industria alimentaria. Mediante digestión anaerobia es posible tratar residuos de industrias cerveceras, industria conservera, de destilerías, de mataderos, así como aguas residuales del lavado de la remolacha azucarera, el suero en la producción del queso, etc.

e) Residuos domésticos y municipales

Principalmente dentro de esta categoría tenemos a los sedimentos de las aguas residuales provenientes de los núcleos de población, que han sido digeridos anaeróbicamente en los sistemas municipales de alcantarillado desde principios de siglo en muchos países de Europa, para la reducción de la contaminación y la producción de biogás para alimentar a los generadores de las plantas de energía.

2.7.2 Características de los residuos

Es importante mencionar que prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a la digestión anaeróbica, pero la calidad y cantidad del biogás producido dependerán de las características de la materia prima, es decir de su composición química y contenido de sólidos.

a) Composición química

La materia orgánica que alimentara la digestión anaerobia deberá tener unas características bioquímicas que permitan el desarrollo y la actividad de la población microbiana dentro del biodigestor, es importante mencionar que si dichas características bioquímicas no están presentes deberán añadirse o tendrán que mezclarse materias primas para obtener las proporciones optimas.

Principalmente el carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, el carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células, como estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, se considera una relación carbono/nitrógeno (C/N) óptima dentro del intervalo de 20:1 a 30:1 (Varnero, 2011, p. 35). En la tabla 2.2 se muestran el contenido de C y N a si como la C/N de diferentes residuos orgánicos.

Tabla 2.2 Relaciones carbono/nitrógeno promedio de diversos residuos orgánicos

Residuos animales	%C	%N	C/N	Residuos vegetales	%C	%N	C/N
Bovinos	30	1.3	25:1	Aserrín	44	0.06	730:1
Caprinos	40	1	40:1	Hojas secas	41	1	41:1
Conejos	35	1.5	23:1	Hortalizas	30	1.8	17:1
Equinos	40	0.8	50:1	Leguminosas	38	1.5	28:1
Excretas humanas	2.5	0.85	03:1	Paja arroz	42	0.63	67:1
Gallinas	35	1.5	23:1	Paja avena	29	0.53	55:1
Ovinos	35	1	35:1	Paja cebada	58	0.64	90:1
Patos	38	0.8	47:1	Paja trigo	46	0.53	87:1
Pavos	35	0.7	50:1	Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Porcinos	25	1.5	16:1	Tubérculos	30	1.5	20:1

Fuente: *Manual del biogás*, (p. 36), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

Cuando la relación C/N es superior a 35:1 la digestión anaerobia ocurre más lentamente, ya que por el bajo contenido de nitrógeno la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, además de que este es consumido rápidamente por los microorganismos metanógenos, sin embargo el período de producción de biogás es más prolongado, en cambio una relación C/N menor de 8:1 hace que el nitrógeno se libere y se acumula como amonio, lo que aumenta el pH y que en grandes cantidades ejerce un efecto tóxico e inhibe el proceso.

La digestión anaerobia además de requerir fuentes de carbono y nitrógeno, deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, calcio, cobalto,

fósforo, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, potasio, selenio, tungsteno, zinc y otros menores) (Varnero, 2011, p. 29).

b) Contenido de sólidos totales

La biomasa se encuentra compuesta por agua y por una fracción sólida llamada sólidos totales (ST), que se obtiene descontando la humedad de un material orgánico. En la tabla 2.3 se muestran el % de ST de diversos materiales orgánicos.

Cuando la materia prima es sólida esta debe diluirse de manera que se forme una suspensión adecuada que se pueda agitar y permita la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, si esta es muy espesa puede verse afectada la eficiencia y la producción de biogás, pero esta suspensión no debe estar demasiado diluida para evitar que las partículas se asienten.

Tabla 2.3 % de ST promedios de diversos materiales orgánicos

Residuos animales	% de sólidos totales	Residuos vegetales	% de sólidos totales
Aves	26.0-92.0	Aserrín	74.0-80.0
Bovinos	13.4-56.2	Hojas secas	50.0
Caprinos	83.0-92.0	Hortalizas (hojas)	10.0-15.0
Conejos	34.7-90.8	Leguminosas (paja)	60.0-80.0
Equinos	19.0-42.9	Paja arroz	88.8-92.6
Excretas humanas	17.0	Paja trigo	88.0-90.0
Ovejas	32.0-45.0	Rastrojo maíz	77.0
Porcinos	15.0-49.0	Tubérculos (hojas)	10.0-20.0

Fuente: *Manual del biogás*, (p. 37), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

El contenido de ST es específico para cada reactor, experimentalmente en digestores semicontinuos se ha demostrado que el contenido de ST no debe ser mayor de un 8 a 12 %, mientras que para los digestores discontinuos el contenido de ST esta entre un 40 a 60 % (Varnero, 2011, p. 37).

Clasificar las aguas residuales en función del contenido de ST resulta muy práctico para los propósitos de la digestión anaeróbica, dividiéndose en residuos de fuerza baja, media, alta y residuos sólidos que representan aproximadamente el 0.2-1 %, 1-5 %, 5-12 % y 20-40 % el contenido en ST respectivamente (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 343).

c) Contenido de solidos volátiles

Los solidos volátiles (SV) son los compuestos orgánicos que teóricamente deben ser convertidos a biogás, ya que no toda la materia seca en un residuo es realmente biodegradable, como ejemplo podemos mencionar principalmente los compuestos inorgánicos.

Los SV de un residuo son determinados por la porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C.

2.7.3 Variables de operación del biodigestor

En esta parte se describirán como se ve afectada la producción de biogás con la temperatura de digestión, el tiempo de residencia hidráulico, la velocidad de carga orgánica, el grado de mezclado, los niveles de pH y la presencia de inhibidores.

a) Temperatura de digestión

La temperatura a la que se lleva a cabo la digestión anaerobia es una de las variables más importantes a tomar en cuenta en la operación de un biodigestor anaerobio. Teniendo esta variable relación con la estabilidad y el tamaño del biodigestor o reactor. Considerándose que la estabilidad del biodigestor es inversamente proporcional a la temperatura de digestión, es decir que con temperaturas bajas se ofrece la mayor estabilidad (Strezov, & Evans, 2015, p. 181). En cambio cuando hablamos del tamaño del sistema, los biodigestores más grandes requieren temperaturas más bajas debido a la menor velocidad de digestión (Strezov, & Evans, 2015, p. 181).

Los biodigestores anaeróbicos pueden funcionar en condiciones mesófilas, termofílicas o psicofílicas, y cada una implica diferentes intervalos de temperatura y especies de bacterias. Los intervalos de temperatura de cada condición son mostrados en la tabla 2.4 (Strezov, & Evans, 2015, p. 181).

Tabla 2.4 Intervalo de temperatura para diferentes condiciones de digestión

Condición	Temperatura (° C)	Temperatura optima (° C)
Mesófila	20 a 45	30 a 38
Termofílica	hasta 70	47 a 57
Psicofílica	< 20	15 a 20

Es importante tener un buen control de temperatura en el biodigestor, ya que un accidental aumento de temperatura del intervalo mesófilo al termófilo aun en un breve periodo de tiempo, genera una serie de efectos que necesitaría muchas semanas para ser superados.

De las tres condiciones mencionadas, la digestión mesofílica se considera la más estable y es la mas utilizada, ya que las bacterias mesófilas son las más presentes y son comúnmente encontradas en la mayoría de los materiales alimenticios, además esta condición es más tolerante a los cambios en comparación con la digestión termofílica, como inconveniente de la condición mesofílica tenemos que requiere tiempos de residencia más largos en comparación con la condición termofílica, por lo que los biodigestores mesófilos son de mayor tamaño en comparación con los termófilos (Strezov, & Evans, 2015, p. 181). En cambio en la digestión termofílica se retira más energía de la biomasa, se obtienen velocidades de reacción más rápidas y una mayor destrucción de los patógenos, una ventaja si el efluente será esparcido sobre la tierra, como inconvenientes de la condición termófila tenemos que requieren una mayor entrada de energía que la digestión mesofílica, además de que estos responden adversamente al enfriamiento accidental, y son más susceptibles a la inhibición por amonio en comparación con la condición mesófila. Por otro lado la digestión psicrófilica emite metano en rendimientos comparables a la digestión mesofílica, sin embargo, sus tasas de producción son tan lentas que los tamaños del biodigestor son generalmente demasiado grandes y no son económicos (Strezov, & Evans, 2015, p. 181). Por ultimo podemos mencionar que las bacterias termófilas y psicrófilas son bastante raras y que normalmente deben ser sembradas en el biodigestor.

b) Tiempo de residencia hidráulico (TRH)

Como ya se había mencionado, el tiempo de residencia hidráulico (TRH) es el tiempo que la materia orgánica permanece dentro del biodigestor de entrada a salida, y es expresado mediante la ecuación 2.19.

$$TRH = \frac{\text{Volumen del digestor}}{\text{Volumen diario de residuos alimentados}} \quad (2.19)$$

Fuente: *Biotecnología básica*, (p. 348), por Bullock, J. y Kristiansen, B., 1987, España: Acribia. Copyright 1987 por Acribia.

Es importante mencionar que el TRH de residuos complejos es más alto en comparación con residuos sencillos.

c) velocidad de carga orgánica

La velocidad de carga orgánica es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, esta es expresada en unidades de masa de materia orgánica (Kg de ST) por m³ de biodigestor por día, esta variable de operación es directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado y es una medida de la cantidad de SV que un sistema puede tolerar. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás, aunque también aumenta el riesgo de que ocurran sobrecargas puntuales que conducen rápidamente al fallo del sistema debido a una mezcla inadecuada, un mayor contenido de AGV y una disminución del pH (Strezov, & Evans, 2015, p. 185).

d) Mezclado

El sistema de mezclado o agitación es necesario para producir estabilidad en el proceso, este es requerido para mantener la homogeneidad de la materia orgánica, combinar el material entrante con bacterias, detener la formación de escoria y evitar pronunciados gradientes de temperatura dentro del digestor, es importante mencionar que un mezclado rápido puede interrumpir las comunidades bacterianas, mientras que un mezclado demasiado lento puede causar cortocircuitos (Strezov, & Evans, 2015, p. 185).

e) PH

De todos los microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia, los metanogénicos son los más susceptibles a las variaciones de pH que la demás población microbiana. De forma general todos los grupos bacterianos tienen niveles de actividad óptimos alrededor a la neutralidad, estableciéndose un límite de pH no menor a 6 y no mayor a 8 para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, en tabla 2.5 se muestran los intervalos de pH óptimos para distintos grupos bacterianos (Varnero, 2011, p. 29).

Tabla 2.5 Intervalo de pH óptimos para distintos grupos bacterianos

Grupos bacterianos	pH optimo
Acidogénicos	5.5 a 6.5
Metanogénicos	7.8 a 8.2
Mixtos	6.8 a 7.4, (7 el ideal)

Por último es importante mencionar que el pH en el biodigestor determina la composición de metano en el biogás generado, por lo que un pH menor a 6 es un

indicador de que el biogás es pobre en metano y por lo tanto también lo es su poder calorífico.

f) Toxicidad

En esta parte es importante mencionar que pequeñas cantidades de minerales como sodio, potasio, calcio, magnesio, amoníaco y azufre, así como muy pequeñas cantidades de metales pesados como el cobre, níquel, cobalto, cromo, zinc y plomo son esenciales para estimular el crecimiento bacteriano, pero si sus concentraciones en el sistema son altas, estos se vuelven tóxicos e inhiben el proceso de digestión anaeróbica, además de que evitarán el uso del digestato como fertilizante. En la tabla 2.6 se muestran las concentraciones inhibitorias de diversas sustancias químicas para el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 2.6 Concentraciones inhibitorias de diversas sustancias

Inhibidores	Concentración inhibitoria
SO ₄ ⁻	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO ₃ ⁻	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN ⁻	25 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
Mg	1000-1500 mg/l

Fuente: *Manual del biogás*, (p. 49), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

Además es importante mencionar que ciertos subproductos generados en la digestión anaerobia pueden inhibirla, tal es el caso del amoníaco, que en altas concentraciones pueden limitar el crecimiento bacteriano a pesar de ser un nutriente importante, en la tabla 2.7 se muestra de manera resumida como la concentración de amoníaco afecta al proceso de digestión anaerobia.

Por último es importante mencionar que los detergentes, antibióticos y disolventes orgánicos inhiben las bacterias, la recuperación después de una inhibición tóxica sólo puede lograrse deteniéndola, y enjuagando o diluyendo el contenido para llevarla por debajo del nivel tóxico (Strezov, & Evans, 2015, p. 186).

Tabla 2.7 Concentración de amoníaco y su efecto en el proceso de digestión anaeróbica

Concentración de amoníaco (mg/L)	Efectos
50-100	Benéficos
200-1000	Sin efectos adversos
1500-3000	Efectos inhibitorios a niveles de pH altos
> 3000	Toxico

Fuente: *Manual del biogás*, (p. 48), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

g) Patógenos

En este apartado podemos mencionar que algunas bacterias patógenas y virus pueden representar un riesgo de infección para los trabajadores por lo que el material de alto riesgo necesita un pretratamiento a 70 °C durante al menos 1 h (Strezov, & Evans, 2015, p. 186).

2.7.4 Indicador del comportamiento de la digestión anaerobia

En base a las observaciones empíricas de la digestión anaerobia es común emplear la concentración de AGV (principalmente acético, propiónico y butírico) como un indicador del comportamiento del biodigestor debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Las concentraciones de estos ácidos en digestores estables pueden permanecer constantes con valores normalmente de entre 100 y 2000 ppm (Bullock y Kristiansen, 1987, p. 350). Los AGV se empiezan a acumular en el biodigestor cuando la relación simbiótica entre microorganismos acidogénicos y metanogénicos se rompe, debido a la inhibición de los microorganismos metanogénicos debido al afecto toxico de inhibidores, además los cambios de temperatura y pH pueden generar una acumulación de acetato e hidrógeno. Por ultimo es importante mencionar que una presión parcial excesiva de hidrogeno inhibe severamente a las bacterias que degradan ácido propiónico, generando una acumulación de éste (Varnero, 2011, p. 47).

2.7.5 Rendimiento de biogás

El rendimiento de biogás es un importante parámetro que expresa el volumen de biogás producido en la digestión anaerobia por unidad de masa de materia orgánica añadida al biodigestor, sus unidades normalmente son de m³/kg.

El rendimiento de biogás varía con el tipo de materia orgánica, la composición de los residuos orgánicos, el tiempo de retención, entre otros factores, sin embargo para un material orgánico de composición fija el rendimiento de biogás debería ser constante.

Los rendimientos de metano teóricos de diversas sustancias en estado puro son mostrados en la tabla 2.8 (Wall, J. et al., 2008, p. 197).

Tabla 2.8 Rendimientos de metano teóricos de componentes de la biomasa

Sustancia	Rendimiento de metano (m³/Kg)
Carbohidratos	0.35
Proteínas	0.57
Grasas	0.95

Es importante mencionar que los rendimientos mostrados en la tabla 2.8 rara vez son logrados en la práctica, ya que estos suponen que se realiza una degradación completa de los sustratos a CH₄ y CO₂, cuando en realidad la conversión de materia orgánica a biogás es incompleta.

Finalmente en la tabla 2.9 se muestra un resumen de los rendimientos de biogás teóricos para diferentes materiales orgánicos.

Tabla 2.9 Rendimientos de biogás teóricos para diferentes materiales orgánicos

Tipo de biomasa	Rendimiento de biogás (m³/Kg)	% de metano
Trigo	0.5	0.6
Maíz	0.7	0.6
Papa	0.7	0.6
Remolacha	0.5	0.6
Vitivinícola	0.7	0.62
Cervecera	0.7	0.63
Láctea	0.5	0.6
Conserva	0.51	0.6
Bebidas de infusión	0.33	0.6
Mataderos	0.43	0.65
RSU	0.85	0.5
Grasas	0.43	0.7

Tipo de biomasa	Rendimiento de biogás (m³ biogás/ Kg DQO degradado)	% de metano
Estiércol vacuno	0.5	0.6
ARU	0.48	0.63
Estiércol avícola	0.52	0.58
Estiércol porcino	0.48	0.62

Fuente: *Potencial de biogás*, p. 45, por Chamy R. y Vivanco E., 2007, Santiago de Chile: Proyecto Energías Renovables. Copyright 2007 por Proyecto Energías Renovables.

CAPITULO III

TÉCNICAS Y DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

Una de las propiedades más importantes de los combustibles es el ya mencionado poder calorífico, que de forma general es la energía que estos liberan al ser quemados, este puede ser determinado fácilmente mediante el empleo de tablas de entalpías de formación, ya que el poder calorífico, también llamado entalpia de combustión, es la diferencia de la sumatoria de las entalpías de formación de los productos y de la sumatoria de las entalpías de formación de los reactivos. Sin embargo, las entalpías de formación de muchos combustibles y de diversos materiales orgánicos no se incluyen en tablas o en recopilaciones de datos termodinámicos, debido a la gran variación en la composición que pueden presentar, dependiendo de la región de donde se extraen, o si resultan ser una mezcla de diferentes sustancias o de residuos orgánicos. Cuando estos datos no están directamente disponibles, el poder calorífico es determinado experimentalmente mediante la aplicación de la calorimetría y del uso de diversos instrumentos y equipos como son el calorímetro y la bomba calorimétrica.

3.1 Definición de calorimetría

La calorimetría implica la medición de un flujo de calor en un instrumento llamado calorímetro, en donde se miden los cambios de temperatura efectuados por un proceso físico o químico, y que están relacionados con el calor liberado o absorbido de dichos procesos y de la capacidad calorífica del sistema. Es por esto que los experimentos de flujo de calor de un material a otro permiten obtener una serie de propiedades de estos materiales (Rex, y Wolfson, 2011, p. 313). Como propiedad física podemos mencionar principalmente el calor específico a presión constante (C_p), definido como “la energía requerida por unidad de masa para elevar la temperatura de un material” (Rex, y Wolfson, 2011, p. 312). El calor específico es determinado al sumergir un material de temperatura conocida en una determinada cantidad de agua a una temperatura diferente contenida en un calorímetro, midiendo la temperatura final que alcanza el agua y conociendo la masa del material y la capacidad calorífica del calorímetro. También con la calorimetría es posible analizar la energía química almacenada en las sustancias

puras o mezclas, midiéndose los cambios de entalpía cuando una reacción química es llevada a cabo.

3.2 Breve historia del calorímetro y de la bomba calorimétrica

A través de la historia el calorímetro ha sido una herramienta importante para entender y estudiar la termodinámica. El término calorímetro fue mencionado por primera vez por Josef Black en 1770, desde ese entonces este instrumento se ha ido perfeccionando cada vez más debido a los avances tecnológicos.

En 1783 Lavoisier y Laplace desarrollaron el calorímetro de hielo (figura 3.1), considerado como el primer calorímetro utilizado para medir el calor, se trata de un vaso cilíndrico de hojalata barnizada, sostenido por un trípode y terminado internamente por un embudo. En su interior se adapta otro vaso semejante terminado interiormente por un tubo con llave que atraviesa el vaso exterior (Museo Virtual de la Historia de la Educación [MUVHE], 2009). Como su nombre indica, para su funcionamiento son necesarios trozos de hielo que se colocan dentro del calorímetro alrededor de una muestra problema, determinando el calor específico por el método de la fusión del hielo.

Figura 3.1 Calorímetro de hielo de Lavoisier y Laplace



Fuente: *Calorímetro de Lavoisier-Laplace*, por Museo del IES Canarias Cabrera Pinto, 2012, España: Museo del IES Canarias Cabrera Pinto. Copyright 2012 por Museo del IES Canarias Cabrera Pinto.

El hielo es puesto en el interior de los vasos concéntricos, en una especie de rejilla metálica es colocada la muestra problema junto con hielo, posteriormente esta es situada en la cavidad central del calorímetro. El contacto entre estos provocará la transferencia de calor desde la muestra problema hacia el hielo. Se esperaba hasta que la muestra problema estuviera a la temperatura del hielo, y después se

determinaba la masa del hielo derretido del depósito interior que era una medida del calor desprendido. Finalmente conociendo la masa y la temperatura a la que se colocó la muestra, se determina el calor específico de la muestra. El depósito externo de hielo era utilizado como protección para evitar que el hielo del depósito interno fuera derretido por el calor procedente del exterior.

Posteriormente las investigaciones termoquímicas de Marcellin Berthelot lo llevaron a construir la bomba calorimétrica en 1881, también denominada en ese entonces bomba Berthelot, lo que fue una contribución fundamental para la química pura y aplicada. Berthelot introdujo los principios generales de los métodos colorimétricos modernos y fue el primero en utilizar oxígeno puro a alta presión para obtener una combustión más rápida y completa (Química Suiza Industrial [QSI], 2014). Por medio de Berthelot, sus alumnos y colaboradores establecieron un conjunto considerable de datos fiables de calores de combustión, solución, neutralización, etc.

En un principio la bomba Berthelot estaba cubierta de un revestimiento de platino para resistir la acción de los gases resultantes de la combustión, posteriormente fue modificada en 1892 por Mahler, que sustituyó el caro platino de la bomba original por una bomba con esmalte de porcelana depositada sobre el acero, posteriormente ambas bombas calorimétricas fueron modificadas por Fischer, Hempel y otros, después en 1899 el Profesor S. W. Parr de la Universidad de Illinois desarrolló la bomba calorimétrica de peróxido, que en lugar de utilizar oxígeno comprimido como medio oxidante, se empleaba peróxido de sodio, que produce una gran cantidad de oxígeno cuando es encendido junto con una muestra de combustible, posteriormente en 1911 Parr introdujo una bomba calorimétrica de oxígeno y después de quince años de investigación produjo una nueva aleación resistente al ácido llamado Ilium, para eliminar el revestimiento metálico (Parr Instrument Company, 2006, p. 1).

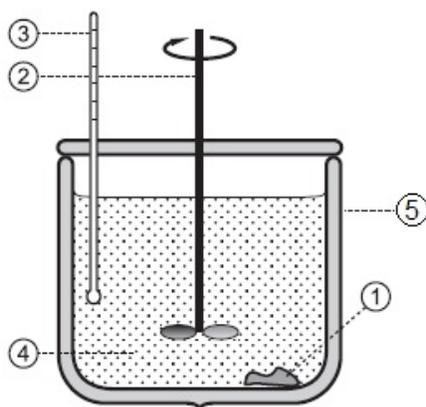
Actualmente existen compañías especializadas en la fabricación y calibración de bombas calorimétricas, que siguen investigando en instrumentación calorimétrica para la fabricación de equipos cada vez más complejos y que permitan medir cantidades de calor pequeñas o que se generan en períodos prolongados.

3.3 Definición y funcionamiento de un calorímetro

Un calorímetro es un instrumento sencillo o complejo que sirve para medir el cambio en la energía (calor liberado o absorbido) que sufre un sistema después de operar en este un proceso, que puede ser físico, químico o biológico (Moreno y Giraldo, s. f., 33). De manera sencilla un calorímetro es un recipiente cerrado y

perfectamente aislado que cuenta con un sistema de agitación para mantener la temperatura del agua uniforme y de un termómetro para medir los cambios de temperatura, como es mostrado en la figura 3.2.

Figura 3.2 Esquema de un calorímetro tradicional



Nota: 1: Muestra 2: Agitador 3: Termómetro 4: Líquido calorimétrico (agua) y 5: Resistencia térmica. Fuente: *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*, p. 14, por Sarge, S. M., Höhne, G. W., & Hemminger W., 2014, Alemania: Wiley-VCH. Copyright 2014 por Wiley-VCH.

De manera general para determinar la cantidad de energía liberada en un proceso, es colocado dentro del calorímetro una fuente de calor, que es rodeada por una determinada cantidad de agua en constante agitación a una temperatura conocida, posteriormente con el termómetro se comprueba el aumento de temperatura del agua (si se trata de un proceso que libera energía) o su disminución (si se trata de un proceso que absorbe energía), hasta que se alcanza el equilibrio térmico del sistema. Habiendo determinado la temperatura inicial y final del proceso y conociendo la capacidad calorífica del calorímetro, la cantidad de energía liberada por el proceso puede calcularse fácilmente mediante la ecuación 3.1.

$$Q = C_{\text{cal}}(T_f - T_i) \quad (3.1)$$

Donde:

Q = Calor [Energía]

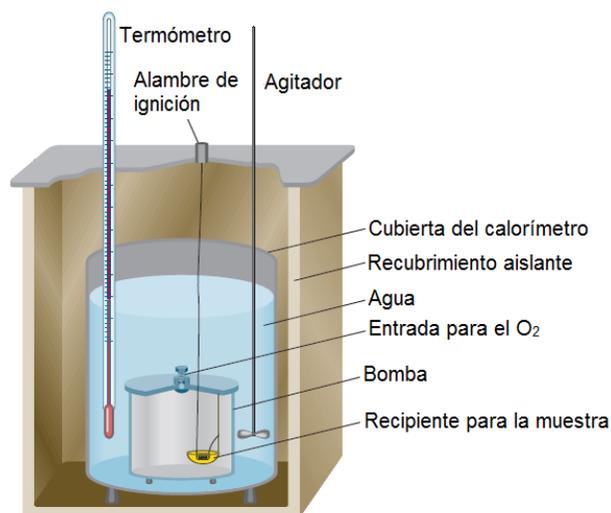
C_{cal} = Capacidad calorífica del calorímetro $\left[\frac{\text{Energía}}{\text{Temperatura}} \right]$

T_f y T_i = Temperatura final e inicial respectivamente [Temperatura]

3.4 Definición y funcionamiento de la bomba calorimétrica

Una bomba calorimétrica (figura 3.3) es un recipiente cerrado, diseñado para resistir altas presiones, en el que se realizan reacciones químicas a volumen constante, generalmente esta es utilizada para estudiar las reacciones de combustión.

Figura 3.3 Bomba calorimétrica



Fuente: *Química*, p. 247, por Chang, R., 2010, México: McGraw-Hill. Copyright 2010 por McGraw-Hill. |

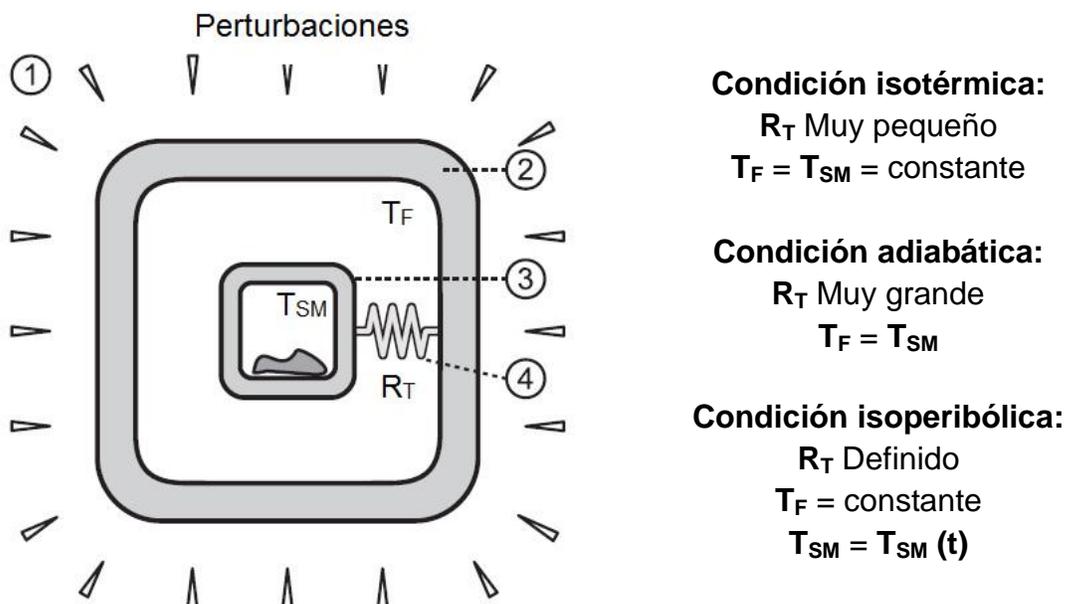
En esta prueba una muestra combustible es quemada bajo un ambiente rico en oxígeno en condiciones controladas. La muestra combustible a analizar es colocada en un crisol para combustible (si el combustible es sólido, deberá colocarse en forma de pastilla) dentro de la bomba, esta es sellada y llenada a presión con oxígeno y es colocada dentro del calorímetro cubriéndosele con una determinada cantidad de agua (de temperatura conocida) que absorberá el calor liberado por el combustible, posteriormente la combustión es provocada por el encendido de un alambre de ignición mediante el paso de corriente eléctrica a través de este, en ese momento la bomba conducirá el calor de la combustión hasta el agua sin dejar que estos se mezclen, y enseguida es medida la elevación de la temperatura del agua para la determinación del poder calorífico.

No obstante, el calor que absorbe el agua no es exactamente el poder calorífico del combustible, debido a diversos factores, entre los cuales pueden nombrarse: la absorción de calor por la propia bomba, la liberación de calor del alambre de ignición, la liberación de calor por la formación de ácido nítrico y sulfúrico, entre otros factores que deben ser corregidos (Equipos y Laboratorio de Colombia, 2015).

3.5 Tipos de calorímetros

Los calorímetros se pueden clasificar de acuerdo a sus condiciones de operación, dependiendo del comportamiento de la temperatura del propio calorímetro (sistema de medida, T_{SM}) y de la temperatura de los límites del calorímetro con los alrededores (frontera, T_F), si estas son iguales, varían o permanecen constantes, teniéndose calorímetros de tipo adiabático, isoperibólico e isotérmico, como se muestran en la figura 3.4 y que son explicados a continuación.

Figura 3.4 Esquema de un calorímetro con sus respectivas condiciones de operación



Nota: 1: Medio ambiente, 2: Frontera (termostato), 3: Sistema de medición, 4: Resistencia térmica.
 T_{SM} : Temperatura del sistema de medición, T_F : Temperatura de la frontera (termostato)
 R_T : Resistencia térmica. Fuente: *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*, p. 74, por Sarge, S. M., Höhne, G. W., & Hemminger W., 2014, Alemania: Wiley-VCH. Copyright 2014 por Wiley-VCH.

Es importante mencionar que las condiciones de funcionamiento de los calorímetros son definidas con respecto a un estado ideal, por lo que los términos adiabático e isotérmico usados en este apartado no son estrictamente los conceptos empleados en termodinámica, ya que hay una tendencia común en el uso de estos conceptos termodinámicos aun cuando las condiciones ideales requeridas por ellos no se respeten, por lo que en la práctica calorimétrica es más adecuado utilizar los términos cuasi-adiabáticas y cuasi-isotérmicas (Sarge, Höhne & Hemminger 2014, p. 73).

3.5.1 Calorímetro adiabático

El calorímetro adiabático es un sistema que en condiciones ideales no produce intercambio de calor alguno entre el sistema de medida y sus alrededores, nuevamente es importante mencionar que el término adiabático es utilizado de forma general, pero en la práctica no es verdaderamente un calorímetro adiabático. Estos son construidos con materiales aislantes para mantener aislado el sistema y poder relacionar el calor generado o absorbido con la diferencia de temperatura que se produce. Es decir que cuando ocurre cualquier proceso que implica transferencia de calor dentro del calorímetro, se da una variación de su temperatura. Estos operan de tal forma que la temperatura interior del calorímetro es igual a la temperatura de los límites del calorímetro con los alrededores ($T_F = T_{SM}$) durante todo el experimento, lo que es lo más cercano a un "aislamiento perfecto", además es empleado aire acondicionado para mantener la temperatura ambiente lo más constante posible.

La manera de lograr obtener un calorímetro adiabático "perfecto", es reduciendo lo más posible la transferencia de calor entre el calorímetro y sus alrededores, a continuación se mencionan las tres maneras más adecuadas para lograr esta condición (Sarge, Höhne & Hemminger 2014, p. 76):

- Cuando la reacción química de la muestra se lleva a cabo tan rápidamente que ninguna cantidad apreciable de calor puede salir o entrar durante el intervalo de medición.
- En el caso de separar el calorímetro de los alrededores con una resistencia térmica "infinitamente grande", de manera que el sistema de medición este aislado térmicamente de la mejor manera posible.
- Mediante el control de la temperatura de los límites del calorímetro para estar en cada momento igual a la del sistema de medición.

Es importante decir que las condiciones anteriormente mencionadas contribuyen a que la transferencia de calor entre el calorímetro adiabático y los alrededores tiendan a cero, pero no lo son estrictamente (Ribeiro, p. 65).

Los calorímetros adiabáticos requieren de un control estricto de la temperatura de sus límites para asegurar que la transferencia de calor inevitable al exterior sea prácticamente insignificante, esto es logrado mediante una camisa que rodea el calorímetro y se encarga de ajustar la temperatura de los límites del calorímetro a la misma temperatura del sistema de medición a lo largo del experimento y con un retraso de tiempo insignificante.

El método adiabático es empleado en investigaciones calorimétricas en donde el calor es liberado a una velocidad lenta o moderada, en cambio este método presenta dificultades en procesos con cambios bruscos en la temperatura del sistema de medición y en entornos de una gran superficie.

Por último es importante mencionar que el control electrónico de la temperatura de los límites del calorímetro es el único método utilizado en la actualidad para establecer condiciones adiabáticas, otros métodos son sólo de interés histórico. (Sarge, Höhne & Hemminger 2014, p. 76)

3.5.2 Calorímetro isoperibólico

Un calorímetro isoperibólico es un sistema en el que se mantiene constante la temperatura de sus límites durante todo el experimento ($T_F = \text{constante}$), independientemente de los cambios de temperatura del sistema de medición (Ribeiro, p. 65). La temperatura de los límites de este tipo de calorímetro es mantenida constante mediante el uso de un termostato, y se trata de que la diferencia de temperatura de los alrededores y la interna no sea grande, al igual que en el método adiabático es usado aire acondicionado para mantener la temperatura ambiente lo más constante posible.

Este tipo de calorímetro se caracteriza por tener una resistencia térmica de magnitud bien establecida (R_T) entre el sistema de medición y la frontera, por lo que su intercambio de calor depende únicamente de la diferencia de estas temperaturas y de la resistencia térmica efectiva, es importante mencionar que el flujo de calor en una operación isoperibólica es función únicamente de la temperatura del sistema de medición.

Es decir que al agregar una fuente de calor en el calorímetro isoperibólico, la temperatura del sistema de medición cambiara por el intercambio de calor con los límites del calorímetro hasta que se establezca una temperatura constante en el sistema de medición después de un cierto tiempo de funcionamiento, finalmente la cantidad de calor intercambiado será proporcional a la diferencia de ambas temperaturas, pero si termina la generación de calor dentro del calorímetro, la T_{SM} se aproximara a la T_F .

3.5.3 Calorímetro isotérmico

Como su nombre indica, los calorímetros isotérmicos son aquellos en los que idealmente no hay ninguna variación de la temperatura durante el experimento, es decir que la temperatura del sistema de medición y de los límites del calorímetro se mantienen constantes ($T_F = T_{SM} = \text{constante}$). En la práctica tal operación es inalcanzable, pero se puede aproximar al comportamiento ideal mediante el intercambio de calor a través de un sistema de infinitesimalmente baja resistencia térmica (R_T) con un entorno de capacidad de calor infinito y con la compensación del flujo de calor liberado de la muestra. Esta compensación para mantener la temperatura constante puede ser lograda por una transición de fase (sistema de medición pasiva), como ocurre en el calorímetro de hielo, donde la variación de volumen de la mezcla hielo / agua, es utilizada como medida de la cantidad de calor transferido desde o hacia el sistema termodinámico en estudio o mediante efecto termoeléctrico (sistema de medición activa) mediante el uso de calefacción eléctrica (efecto de Joule), para compensar la remoción de calor durante procesos endotérmicos, o enfriamiento eléctrico (efecto de Peltier), para compensar la liberación de calor inherente a procesos exotérmicos (Ribeiro, p. 64).

Como se ha señalado anteriormente el término isotérmico no debe interpretarse estrictamente, ya que no existen realmente condiciones isotérmicas (temperatura constante en el tiempo y el espacio) en el sistema de medición de un calorímetro de compensación y mucho menos en la muestra, ya que los intercambios de calor serían imposibles debido a la ausencia de diferencias de temperaturas.

3.6 Importancia del poder calorífico

El poder calorífico no solo es una medida de la energía disponible de un combustible, este es un indicativo de la calidad de los combustibles en términos energéticos, físicos y químicos, además es un valor del que se obtienen conclusiones económicas y es de mucha importancia cuando se considera la eficiencia térmica de los equipos para la producción de electricidad o calor.

Dependiendo de las unidades en las que se represente el poder calorífico (masa o volumen de combustible), tenemos poder calorífico másico (calor de combustión por unidad de masa de combustible), este es particularmente importante en vehículos de peso limitado, como son los aviones, hidroplanos y vehículos con efecto de superficie, ya que la distancia que tales vehículos pueden recorrer con una determinada masa combustible es una función directa del poder calorífico másico y de la densidad del combustible, mientras que el poder calorífico

volumétrico (calor de combustión por unidad de volumen de combustible), que se calcula multiplicando el poder calorífico másico por la densidad del combustible, es importante para los vehículos de volumen limitado, tales como automóviles y barcos, ya que está directamente relacionada con la distancia recorrida entre recargas de combustible (American Society for Testing and Materials [ASTM], 1987).

3.7 Aparatos, materiales y determinación experimental del poder calorífico

En este apartado se describe un procedimiento general para la determinación experimental del poder calorífico másico por el método adiabático, primero se mencionaran los aparatos, equipos, reactivos y materiales requeridos, para posteriormente describir la instalación y operación de la bomba calorimétrica, y finalmente se mostraran las formulas y las correcciones termoquímicas necesarias para calcular el poder calorífico.

3.7.1 Aparatos y equipos

- Cuarto de ensayo
- Bomba
- Calorímetro
- Camisa adiabática
- Termómetros
- Termistores
- Balanza analítica

3.7.2 Reactivos y materiales

Reactivos

- Agua
- Acido benzoico (granulado)
- Indicador rojo de metilo
- Oxígeno (comercial)
- Disolución de hidróxido de sodio al 0.0866 N estandarizada con hidrogenoftalato de potasio y ajustada a 0.0866 N.

Donde la pureza de los reactivos será de grado reactivo para cada una de las pruebas.

Materiales

- Alambre de ignición (alambre de platino de 0,127 mm (calibre N° 36), alambre de hierro de calibre N ° 34 B & S o alambre de resistencia Chromel C, cortado en longitudes de 100 mm).

3.7.3 Estandarización

Energía equivalente del calorímetro

El ácido benzoico será utilizado como patrón primario para la determinación de la energía equivalente del calorímetro.

- Se escogerá una masa de ácido benzoico de manera que al quemarse, el aumento de la temperatura del sistema sea aproximadamente equivalente a un cambio de energía de 30,000 J.
- La determinación de la energía equivalente del calorímetro será realizada con la ecuación 3.2, mediante las pruebas de combustión que se explican posteriormente en el procedimiento.

$$W = \frac{Q_b \times m + e_1}{\Delta T} \quad (3.2)$$

Fuente: *Annual book of ASTM standards*, por ASTM, 1987, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM. Copyright 1987 por ASTM.

Donde:

W= energía equivalente del calorímetro [J/°C]

Q_b = calor de combustión del ácido benzoico [J/g]

m= masa del ácido benzoico [g]

e_1 = corrección para el calor de formación del ácido nítrico, como es calculada en la secciones siguientes [J]

ΔT = corrección del aumento de temperatura (de acuerdo a la escala de error del termómetro, indicada por el fabricante) [°C]

Inicialmente se determinara la energía equivalente del calorímetro promediando seis determinaciones en un período de al menos 3 días, debiendo lograrse una desviación estándar relativa del 0.1 % o menor para las seis determinaciones, de lo contrario se deberán de repetir hasta que se las seis determinaciones establezcan una desviación estándar relativa aceptable. Si no se puede lograr este

grado de precisión, revise el procedimiento, mediciones críticas, operaciones mecánicas y todo lo que puede contribuir a la dispersión en los resultados. Es importante mencionar que si cualquier parte del equipo se cambia o se altera se tendrá que volver a determinar la energía equivalente del calorímetro (ASTM, 1987).

3.7.3 Procedimiento

Es importante mencionar que todas las operaciones en el procedimiento experimental se tienen que realizar de una manera idéntica a lo largo de la estandarización y de las mediciones de combustión.

Acomodo del equipo

Instalar los termómetros y elementos de detección de temperatura según lo recomendado por el fabricante del calorímetro, es importante mencionar que estos elementos deben instalarse de manera que se sumerjan exactamente la misma longitud cada vez que se realicen pruebas en el calorímetro, además de que estos no deben tocar el calorímetro, bomba o camisa de agua.

- Instalar un termómetro en la cubeta calorimétrica, de manera que el bulbo este hasta la mitad de la parte inferior del calorímetro y localizar el termistor con su elemento sensible a aproximadamente el punto medio del bulbo del termómetro.
- Instalar un termistor en la camisa de agua, sumergido a la misma profundidad que en el calorímetro.
- Ajustar los controladores de válvulas, calentadores, etc. de la camisa, según lo recomendado por el fabricante del calorímetro.
- Realice todas las conexiones eléctricas y abra las líneas del agua. Verificar que la bomba y sus accesorios estén completamente secos por dentro y por fuera.
- Medir 100 mm de alambre de ignición y conectarlo a los electrodos de la bomba formando un circuito en forma de U.
- Pipetear 1.0 cm^3 de agua dentro de la bomba y cubrir con un vidrio de reloj.

Masa de la muestra

- Pese dentro del recipiente para muestras una cantidad del combustible equivalente a 30,000 J, estimándolo mediante la ecuación 3.3.

$$m = \frac{W \times 0.0032}{Q} \quad (3.3)$$

Fuente: *Annual book of ASTM standards*, por ASTM, 1987, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM. Copyright 1987 por ASTM.

Dónde:

m = masa de la muestra a utilizar [g]

W = energía equivalente del calorímetro [J/°C]

Q = calor de combustión aproximado de la muestra [MJ/kg]

- Utilice unas pinzas para manipular el recipiente en la operación de pesaje y llenado, es importante mencionar que debe evitar el contacto del recipiente con los dedos.
- Coloque el recipiente en el electrodo curvado y arregle el alambre del fusible de manera que la porción central del circuito presione hacia abajo en el centro de la muestra.

Montaje de la bomba

- Ensamble la bomba y apriete bien la tapa.
- Conecte la bomba calorimétrica al cilindro de oxígeno y deje entrar oxígeno lentamente hasta alcanzar una presión de 3.0 MPa (30 atm). No purgar la bomba para retirar el aire atrapado.
- Desconecte la bomba del cilindro de oxígeno y coloque nuevamente la tapa de las válvulas.
- **Advertencia una violenta explosión puede ocurrir.** Tenga cuidado de no sobrecargar la bomba. Si por accidente, el oxígeno introducido dentro de la bomba supera 4.0 MPa (40 atm) **NO proceda con la combustión.** Una explosión violenta, capaz de romper la bomba calorimétrica, podría ocurrir. Desmonte la conexión de llenado y de agotamiento (escape de gases) de la bomba de la manera habitual y deseche la muestra.

Las presiones dentro del intervalo de 2.5 a 3.55 MPa (25 a 35 atm) pueden ser utilizadas, es importante mencionar que debe utilizarse la misma presión para todas las pruebas, incluyendo la estandarización.

Calorímetro de agua

- Ajustar la temperatura del agua del calorímetro antes del pesaje. El ajuste de esta temperatura depende de la temperatura ambiente, la temperatura inicial deseada del experimento, y las capacidades caloríficas de la cubeta

calorimétrica, agua y bomba calorimétrica, pero se puede usar como guía ajustarla de 1.5 a 1.8 °C por debajo de la temperatura ambiente para el método adiabático.

Método adiabático

- Ajustar la temperatura de modo que la temperatura inicial de la determinación sea lo más aproximado posible a un valor establecido.
- Pesar 2000 g de agua destilada debiendo estar de 1 a 2 °C abajo de la temperatura ambiente y se vacían en la cubeta calorimétrica, esta debe cubrir la bomba y sus accesorios.
- Colocar la cubeta calorimétrica en posición en la camisa calorimétrica.
- Colocar la bomba en la cubeta calorimétrica mediante el uso de unas pinzas o un gancho.
- Terminar el circuito de encendido.
- Cerrar la tapa del calorímetro y bajar termómetros y termistores.

Procedimiento para el Método adiabático

- Arranque el motor del agitador y encienda el controlador del calorímetro.
- Utilice el interruptor de control manual de temperatura para llevar la temperatura de la camisa adiabática lo mas cercano a la temperatura de la cubeta calorimétrica
- Deje que el controlador controle automáticamente la temperatura y espere 15 minutos para alcanzar el equilibrio térmico.
- A partir de este momento y hasta el final de la determinación, se debe controlar la temperatura de la camisa adiabática a la misma temperatura que la cubeta calorimétrica o lo mas próximo posible (0.005 ° C como máximo).
- Hacer lecturas de temperatura en intervalos de 1 min hasta tres lecturas consecutivas que no muestran ningún cambio.
- Encender la muestra al presionar el botón de la unidad de encendido, leer y registrar la temperatura inicial tras la combustión, la temperatura deberá empezar a aumentar en unos 15 s, de lo contrario el experimento habrá fallado y deberá ser interrumpido.
- Después de 6 minutos de la combustión de la muestra se comenzará a leer la temperatura cada minuto. Continúe hasta tres lecturas consecutivas que no muestren cambios o disminución de la temperatura y registrar la temperatura final.

Análisis de Contenido de la bomba

- Apague el controlador, el agitador y retire la bomba del calorímetro.
- Abra la válvula de aguja y permita que los gases escapen a una velocidad uniforme tal como para reducir la presión a la atmosférica en no menos de 1 min.
- Abra la bomba para verificar que la combustión haya sido completa, en caso contrario se repetirá la prueba.
- Lave el interior de la bomba, la tapa, los electrodos y el crisol empleando una cantidad menor a 300 cm³ de agua destilada, posteriormente filtre el lavado.
- Valorar el lavado con solución alcalina estándar (Disolución de hidróxido de sodio al 0.0866 N) utilizando como indicador el rojo de metilo.
- Medir los restos de alambre no quemado y restar de la longitud original.
- Determinar el contenido de azufre de la muestra.

3.8 Cálculos

3.8.1 Aumento de la temperatura (Método adiabático).

Con los datos de temperatura obtenidos en la determinación calcule el aumento de temperatura corregido como se muestra en la ecuación 3.4.

$$\Delta T = T_f - T_i \quad 3.4$$

Fuente: *Annual book of ASTM standards*, por ASTM, 1987, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM. Copyright 1987 por ASTM.

Dónde:

ΔT = aumento de la temperatura corregida [°C]

T_f = temperatura de equilibrio final corregida de acuerdo a la escala de error del termómetro (indicada por el fabricante) [°C]

T_i = temperatura en el momento del encendido de la muestra corregida de acuerdo a la escala de error del termómetro [°C]

3.8.2 Correcciones termoquímicas

A continuación se muestran las ecuaciones para determinar el calor desprendido por la formación de ácido nítrico y sulfúrico, así como de la propia combustión del alambre de ignición y que es necesario descontar para cada prueba.

C_{HNO_3} = Corrección para el calor de formación de ácido nítrico [J = cm^3 de solución estándar de NaOH (0,0866 N) gastado en la titulación x 5]

$C_{H_2SO_4}$ = Corrección para el calor de formación del ácido sulfúrico [J = 58.6 x porcentaje de azufre en la muestra x masa de la muestra]

C_{ci} = Corrección por calor de combustión del alambre de ignición [J= Equivalente térmico del alambre de encendido x longitud de alambre consumido]

3.8.3 Cálculo para la determinación del poder calorífico superior másico de la muestra

Calcular el poder calorífico superior de la muestra mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6.

$$PCS_m(T \text{ } ^\circ\text{C}) = \frac{\Delta T \cdot C_{BC} - C_{HNO_3} - C_{H_2SO_4}}{1000 \cdot m_m} \quad (3.5)$$

$$PCS_m(25 \text{ } ^\circ\text{C}) = PCS_m(T \text{ } ^\circ\text{C}) + A(T_f - 25 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (3.6)$$

Fuente: *Annual book of ASTM standards*, por ASTM, 1987, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM. Copyright 1987 por ASTM.

Donde:

$PCS_m(T \text{ } ^\circ\text{C})$ = Poder calorífico superior de la muestra a volumen constante a la temperatura final del experimento [MJ/kg]

$PCS_m(25 \text{ } ^\circ\text{C})$ = Poder calorífico superior de la muestra a volumen constante a 25 °C [MJ/kg]

ΔT = Aumento de la temperatura corregida [°C]

C_{BC} = Capacidad calorífica de la bomba calorimétrica [J/°C]

m_m = Masa de la muestra [g]

T_f = Temperatura final de la combustión [°C]

C_{HNO_3} , $C_{H_2SO_4}$, C_{ci} = Correcciones que se describieron anteriormente [J]

A= factor de corrección [MJ/kg °C], este es empleado para corregir la temperatura final de la combustión a 25 °C, y sus valores son mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores de factor de corrección A

$PCS_m(T\text{ }^\circ\text{C})$ MJ/kg	A MJ/kg °C	$PCS_m(T\text{ }^\circ\text{C})$ MJ/kg	A MJ/kg °C	$PCS_m(T\text{ }^\circ\text{C})$ MJ/kg	A MJ/kg °C
43.00	0.00157	44.75	0.00230	46.50	0.00302
43.25	0.00167	45.00	0.00240	46.75	0.00313
43.50	0.00178	45.25	0.00250	47.00	0.00323
43.75	0.00188	45.50	0.00261	47.25	0.00333
44.00	0.00199	45.75	0.00271	47.50	0.00344
44.25	0.00209	46.00	0.00282	47.75	0.00354
44.50	0.00219	46.25	0.00292	48.00	0.00365

Fuente: *Annual book of ASTM standards*, por ASTM, 1987, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM. Copyright 1987 por ASTM.

A continuación se muestra un diagrama de flujo para el cálculo del poder calorífico superior (PCS) a partir de datos experimentales. Es importante mencionar que cuando se realicen las operaciones correspondientes se verifique que las unidades de las magnitudes sean homogéneas.

Nomenclatura

m_m = Masa de la muestra [m]

m_{H_2O} = Masa de agua en el calorímetro [m]

$C_{p_{H_2O}}$ = Calor específico a presión constante del agua $\left[\frac{E}{m \cdot T}\right]$

C_{BC} = Capacidad calorífica de la bomba calorimétrica $\left[\frac{E}{T}\right]$

m_{ci} = Masa del cable de ignición [m]

PC_{ci} = Poder calorífico del cable de ignición $\left[\frac{E}{m}\right]$

T_i = Temperatura inicial del agua y el calorímetro [T]

T_f = Temperatura final del agua y el calorímetro [T]

ΔT = Aumento de temperatura [T]

T_c = Corrección de temperatura por enfriamiento [T]

ΔT_c = Aumento corregido de temperatura [T]

Q_{H_2O} = Calor absorbido por el agua del calorímetro [E]

Q_{BC} = Calor absorbido por la bomba calorimétrica [E]

Q_{ci} = Calor desprendido por el cable de ignición [E]

V_{NaOH} = Volumen (ml) de solución estándar de $NaOH$ utilizados en la titulación [L^3]

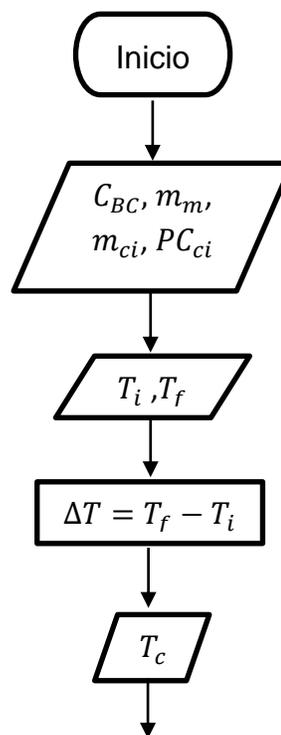
C_{HNO_3} = Corrección para el calor de formación del HNO_3 [E]

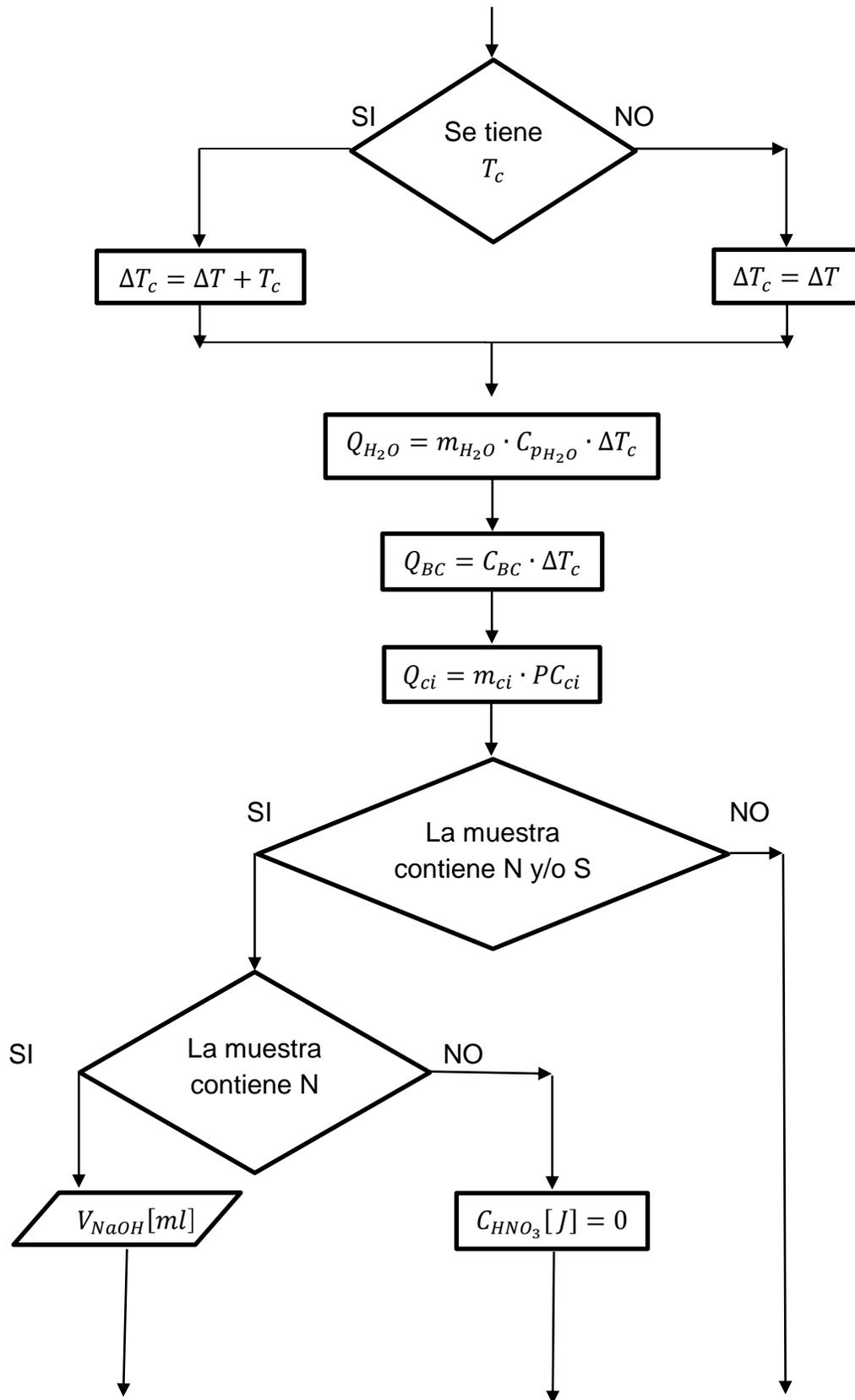
$\% m_S/m_T$ = Porcentaje masa/masa de azufre en la muestra [$\frac{m}{m}$]

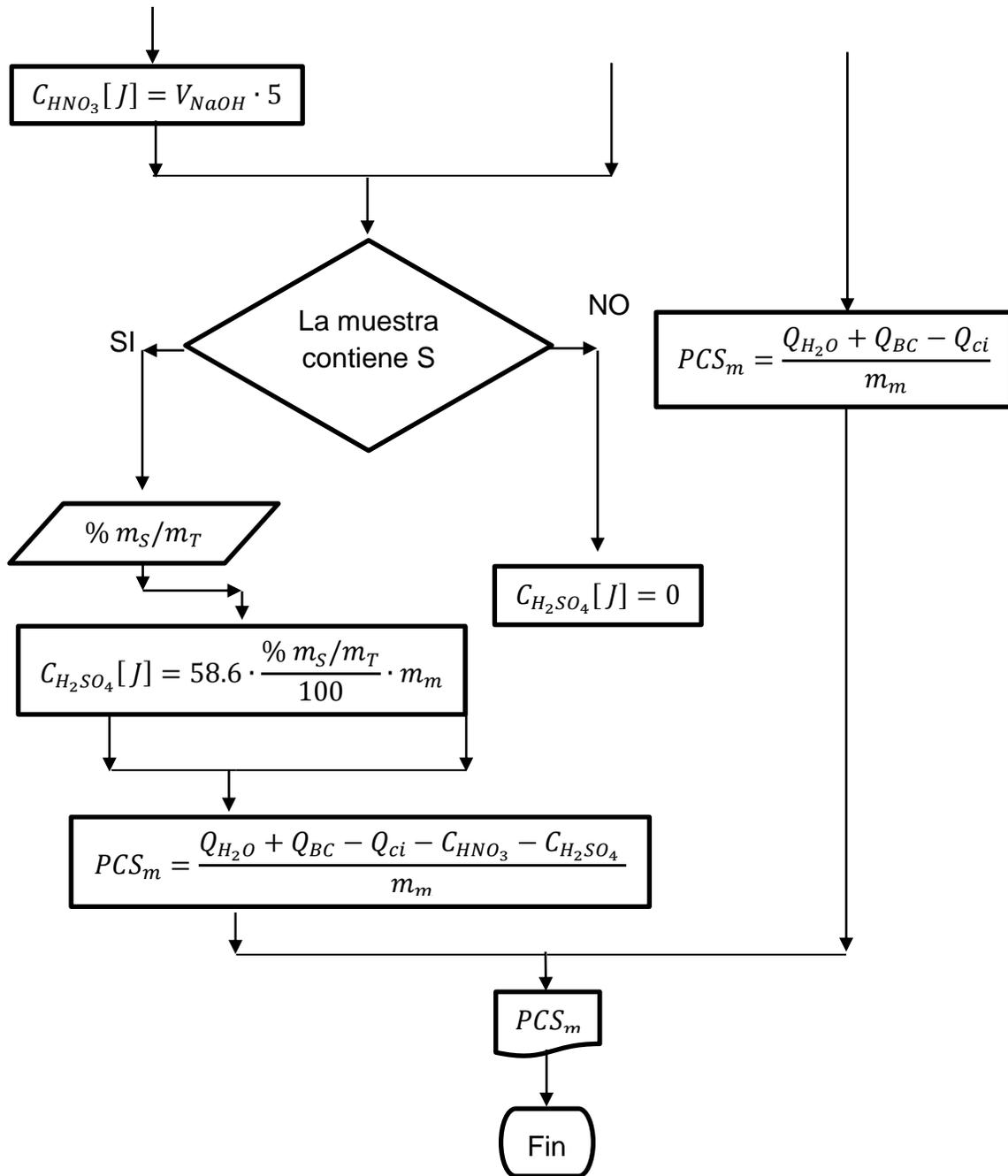
$C_{H_2SO_4}$ = Corrección para el calor de formación del H_2SO_4 [E]

PCS_m = Poder calorífico superior de la muestra [$\frac{E}{m}$]

Diagrama de flujo para el cálculo del poder calorífico superior (PCS) a partir de datos experimentales







3.8.4 Metodología para la conversión de distintitos tipos de poder calorífico

a) Conversión de PCS a Poder Calorífico Inferior (PCI)

Nomenclatura

PCS_m = Poder calorífico superior de la muestra $\left[\frac{E}{m} \right]$

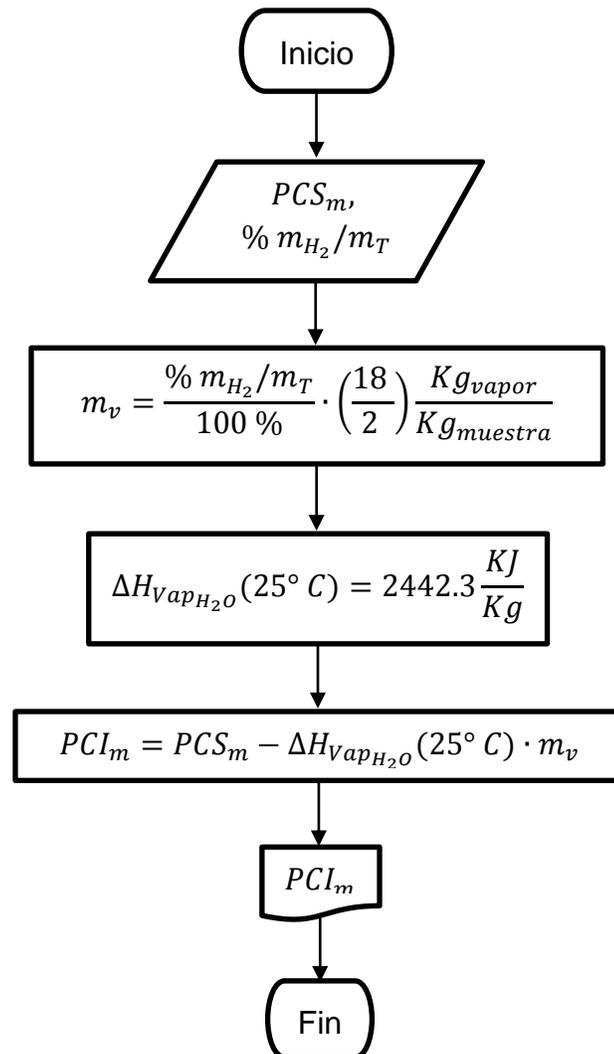
$\% m_{H_2}/m_T$ = Porcentaje masa/masa de hidrogeno en la muestra $\left[\frac{m}{m}\right]$

m_v = Masa de vapor producido por masa de muestra $[m]$

$\Delta H_{Vap_{H_2O}}(25^\circ C)$ = Entalpia másica de vaporización del agua a $25^\circ C = 2442.3 \frac{KJ}{Kg}$

PCI_m = Poder calorífico inferior de la muestra $\left[\frac{E}{m}\right]$

Diagrama de flujo para convertir el PCS a Poder Calorífico Inferior (PCI)



b) Conversión de (PCI)_P a (PCS)_P

Nomenclatura

C_xH_y = Formula química del combustible

PM_C = Masa molecular del combustible $\left[\frac{m}{mol}\right]$

$(PCI)_P$ = Poder calorífico inferior a presión constante $\left[\frac{E}{m}\right]$

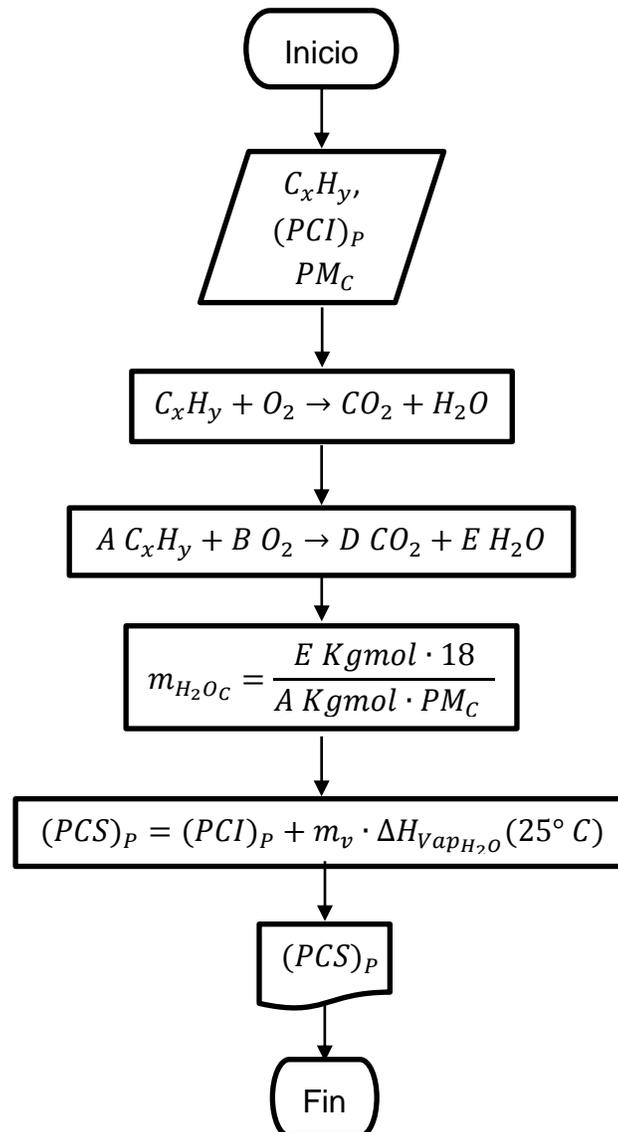
$(PCS)_P$ = Poder calorífico superior a presión constante $\left[\frac{E}{m}\right]$

A, B, D y E = Coeficientes estequiometricos C_xH_y, O_2, CO_2 y H_2O respectivamente

m_v = Masa de vapor producido por masa de combustible $[m]$

$\Delta H_{VapH_2O}(25^\circ C)$ = Entalpia másica de vaporización del agua a $25^\circ C = 2442.3 \frac{KJ}{Kg}$

Diagrama de flujo para la conversión del $(PCI)_P$ a $(PCS)_P$



c) Conversión de $(PCS)_P$ a $(PCS)_V$

Nomenclatura

C_xH_y = Fórmula química del combustible

$(PCS)_P$ = Poder calorífico superior a presión constante $\left[\frac{E}{m}\right]$

$(PCS)_V$ = Poder calorífico superior a volumen constante $\left[\frac{E}{m}\right]$

A, B, D y E = Coeficientes estequiométricos C_xH_y, O_2, CO_2 y H_2O respectivamente

n_P = Número de moles de productos gaseosos [mol]

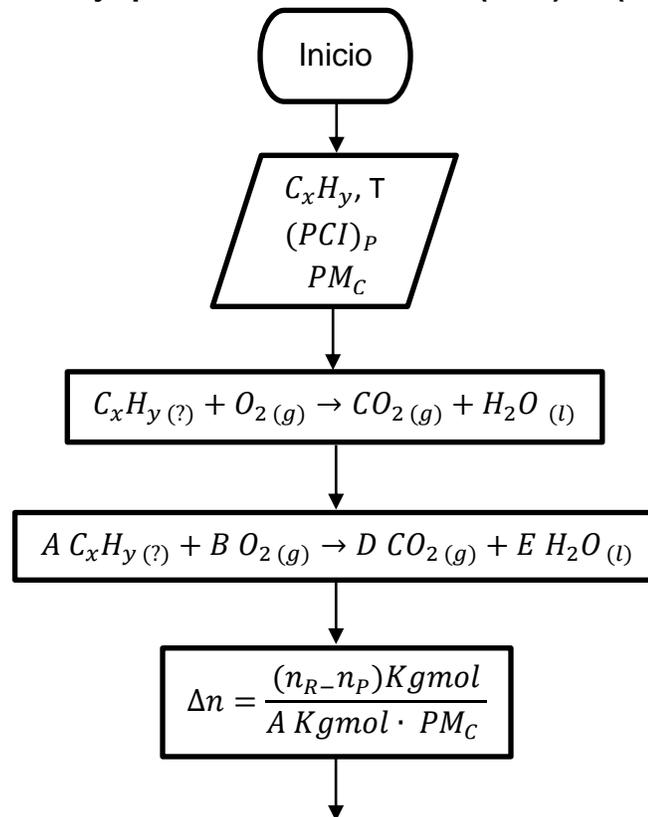
n_R = Número de moles de reactivos gaseosos [mol]

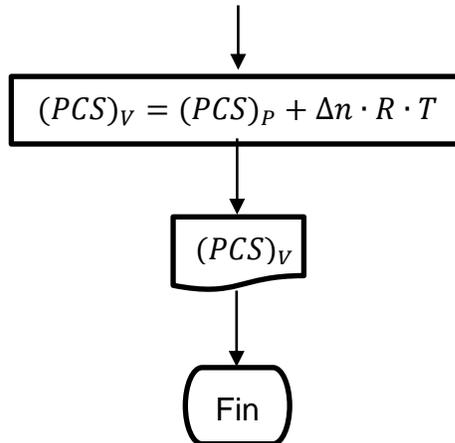
Δn = Cambio de número de moles gaseosos por Kg de combustible

R = Constante universal de los gases = $8.3143 \frac{KJ}{Kgmol \cdot K}$

T = Temperatura [T]

Diagrama de flujo para la conversión del $(PCS)_P$ a $(PCS)_V$





d) Conversión de $(PCS)_v$ a $(PCI)_v$

Nomenclatura

C_xH_y = Fórmula química del combustible

$(PCS)_v$ = Poder calorífico superior a volumen constante $\left[\frac{E}{m}\right]$

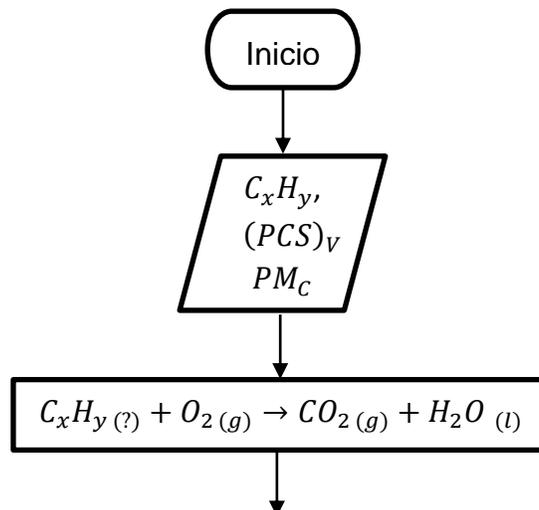
$(PCI)_v$ = Poder calorífico inferior a volumen constante $\left[\frac{E}{m}\right]$

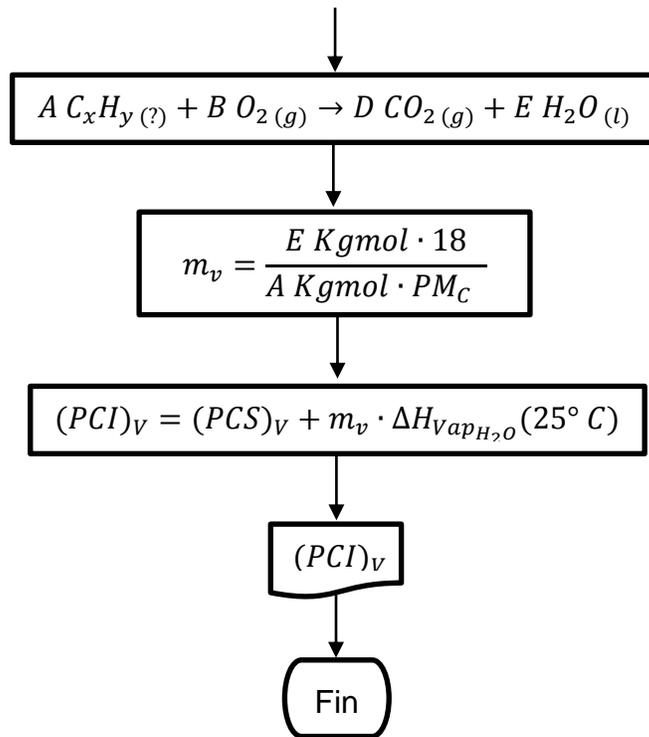
A, B, D y E = Coeficientes estequiométricos C_xH_y, O_2, CO_2 y H_2O respectivamente

m_v = Masa de vapor producido por masa de combustible $[m]$

$\Delta U_{vapH_2O}(25^\circ C)$ = Energía interna de vaporización del agua a $25^\circ C = 2304.9 \frac{KJ}{Kg}$

Diagrama de flujo para la conversión del $(PCS)_v$ a $(PCI)_v$





CAPITULO IV

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 Planteamiento del problema

En la actualidad son diversos los problemas que afectan a la sociedad, entre ellos tenemos la escasez del petróleo, el alza de los precios de combustibles convencionales, así como los problemas de contaminación debido a la quema de combustibles fósiles y a la mala disposición de los residuos, por lo que se han estado buscando otras fuentes de energía y técnicas que puedan minimizar estos problemas.

Actualmente el uso de la biomasa como fuente de energía ya no es exclusiva de países subdesarrollados, la tendencia de ocupar la biomasa con fines energéticos ha aumentado en el mundo desarrollado y occidental en los últimos años, como ejemplo podemos mencionar el gran crecimiento que ha tenido la producción de biogás en el mundo.

Las razones por las que en la actualidad se pretende utilizar la biomasa como fuente de energía son varias, pero principalmente podemos mencionar, su carácter renovable, su menor impacto ambiental, que puede abastecer las necesidades de autosuficiencia energética y además de que se convierten residuos que son necesarios eliminar en recursos energéticos.

En los hogares se generan residuos orgánicos y como estos no son manejados adecuadamente se emiten contaminantes hacia atmósfera, suelo y agua, se producen malos olores y problemas de salud, actualmente se han implementado programas para separar los residuos en el hogar, pero muchas veces no se le da solución al problema que constituyen los residuos generados de los alimentos entre otras fuentes orgánicas. Por lo que se propone que en los hogares y diversos negocios en los que se generan residuos orgánicos se utilicen para producir biogás y biofertilizante empleando un sistema de biodigestión, mediante la implementación de este sistema se pretende aportar tecnología para que los hogares y diversos negocios se vuelvan parcialmente sustentables y generen sus propios recursos, por ejemplo el biogás podría utilizarse en la cocina, en el calentador de agua, para iluminar o generar electricidad, y el biofertilizante podría ser usado para sembrar sus propios alimentos o para las plantas del hogar.

Además de esto se tiene la problemática en la que el fruto del chayote es desperdiciado y tirado en el campo debido a problemas de comercialización como se observa en la figura 4.1, por lo que se evaluará si es posible obtener biogás empleando residuos de chayote como materia prima para el proceso de digestión anaerobia, y de esta manera aprovechar estos recursos que se tiran para transformarlos en energía.

Figura 4.1 Chayote desperdiciado y tirado



4.2 Objetivos

General

- Comprobar que es posible generar biogás a partir de residuos de chayote.

Particulares

- Determinar las condiciones más adecuadas para la producción de biogás en un sistema de biodigestión a partir de residuos de chayote.
- Analizar la propuesta para el uso de un sistema de biodigestión con la finalidad de promover el uso de esta tecnología en los hogares.

4.3 Hipótesis

Las variables que se desearan controlar serán la relación de sólidos de chayote y agua, así como la temperatura de digestión para encontrar las condiciones más adecuadas para la generación de biogás.

4.4 Características del chayote

En la tabla 4.1 se muestra de manera resumida las propiedades y composición del chayote, que nos brinda una idea aproximada del contenido energético, de la cantidad de humedad, así como la fracción orgánica que tiene nuestra materia prima.

Tabla 4.1 Propiedades y composición para 100 g de chayote

Contenido energético (Kcal)	26.0-31.0
Componente	
Composición (%)	
Humedad	89.0-93.4
Azúcar soluble	3.3
Almidón	0.2
Proteínas	0.9-1.1
Grasas	0.1-0.3
Carbohidratos	3.5-7.7
Fibra	0.4-1.0
Cenizas	0.4-0.6
Componente	
Composición (mg)	
Ca	12.0-19.0
P	4.0-30.0
Fe	0.2-0.6
Vitamina A	5.0
Tiamina	0.03
Riboflavina	0.04
Niacina	0.4-0.5
Ácido ascórbico	11.0-20.0

Fuente: *Chayote. Sechium edule (Jacq.) Sw.*, (p. 28), por Lira, R., 1996, Italia: International Plant Genetic Resources Institute. Copyright 1996 por International Plant Genetic Resources Institute.

4.5 Determinación de los solidos totales y secado del chayote

La humedad es una propiedad importante, ya que nos permite saber la cantidad de solidos totales (ST) que ingresan en los sistemas de biodigestión, además de que en estos se incluyen la fracción orgánica que se transformara en biogás.

Para la determinación de los solidos totales se peso una determinada cantidad de chayote fresco, se dejo secar al sol y posteriormente se volvió a pesar la muestra para asi determinar la cantidad de agua perdida asi como la cantidad de ST que se encuentran en dicha muestra.

Inicialmente se picaron y se pesaron 562.5 g de chayote, tras su secado se obtuvieron 43 g, es decir un 7.644 % de ST.

Posteriormente se picaron aproximadamente 7 Kg de chayote y se pusieron a secar al sol en charolas de unicel como se observa en las figuras 4.2 y 4.3 para su utilización en las siguientes etapas.

Figura 4.2 Secado del chayote



Figura 4.3 Chayote seco



La experimentación se encuentra dividida en dos partes, en la primera se determino como afectan las condiciones de humedad y la presentación del chayote para la producción de biogás, mientras que la segunda parte tiene como finalidad determinar como afecta la temperatura de digestión en la producción de biogás.

4.6 Primera parte de la experimentación (humedad y presentación de la materia prima)

4.6.1 Diseño experimental

Esta primera parte tiene como finalidad determinar que condiciones de humedad favorecen la producción de biogás a partir del chayote, así como observar como afecta la presentación de la materia prima al proceso. Por lo que se armaron 4 bloques que consisten en una mezcla de sólidos de chayote en agua con las características que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características de cada bloque

Bloque	Características
1	Chayote fresco picado en agua
2	Chayote seco picado en agua
3	Chayote fresco molido en agua
4	Chayote seco molido en agua

Para cada uno de los bloques mencionados anteriormente se armaron 5 sistemas de biodigestión con la misma cantidad de chayote y con diferentes relaciones de agua para cada caso descrito anteriormente y que son mostrados en la tabla 4.3.

Utilizándose recipientes de un litro para las muestras de chayote frescas y recipientes de 230 ml para las muestras de chayote secas.

Tabla 4.3 Masa de chayote y agua utilizadas en cada sistema para cada bloque

Bloque	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5
1	112.5 – 0	112.5 – 87.5	112.5 - 187.5	112.5 - 287.5	112.5 - 387.5
2	22.5 – 7.5	22.5 - 17.5	22.5 - 37.5	22.5 - 57.5	22.5 - 77.5
3	90 – 0	90 – 70	90 – 150	90 – 230	90 – 310
4	22.5 – 7.5	22.5 - 17.5	22.5 - 37.5	22.5 - 57.5	22.5 - 77.5

Nota: Representado en g chayote - g agua

Se lavaron los recipientes y se agregó chayote y agua a cada recipiente de cada bloque, siguiendo las cantidades de la tabla 4.3. Posteriormente cada sistema fue sellado con un globo para garantizar que se comportaran anaeróticamente, y por último cada sistema fue numerado.

Figura 4.4 Chayote fresco picado



Figura 4.5 Pesado del bloque 1



Figura 4.6 Sistemas armados del bloque 1



Figura 4.7 Pesado de chayote seco



Figura 4.8 Muestras de chayote seco



Figura 4.9 Moliendo chayote fresco



Figura 4.10 Pesado del bloque 3



Figura 4.11 Sistemas armados del bloque 2 y 3



Figura 4.12 Muestra de chayote para el bloque 4



Figura 4.13 Sistemas armados del bloque 4



4.6.2 Cálculos

En esta parte se indican la cantidad de agua y solidos totales presentes en cada sistema para cada bloque.

Tabla 4.4 Cantidades de agua y solidos totales del primer bloque (chayote fresco picado)

Recipiente	m_{Ch}	m_{H_2O}	m_{ST}	$m_{H_2O_T}$	m_T	$\%m_{Ch}$	$\%m_{H_2O}$	$\%m_{ST}$	$\%m_{H_2O_T}$
1	112.5	0	8.55	103.95	112.5	100.000	0	7.600	92.400
2	112.5	87.5	8.55	191.45	200	56.250	43.750	4.275	95.725
3	112.5	187.5	8.55	291.45	300	37.500	62.500	2.850	97.150
4	112.5	287.5	8.55	391.45	400	28.125	71.875	2.138	97.863
5	112.5	387.5	8.55	491.45	500	22.500	77.500	1.710	98.290

Nota: masa expresada en g, m_{Ch} : masa de chayote fresco, m_{H_2O} : masa de agua agregada m_{ST} : masa de solidos totales, $m_{H_2O_T}$: masa de agua total, m_T : masa total en el recipiente y $\%m$: porcentaje en masa de dicho componente.

Tabla 4.5 Cantidades de agua y solidos totales del segundo bloque (chayote seco picado)

Recipiente	m_{Ch} o m_{ST} (g)	m_{H_2O} (g)	m_T (g)	$\%m_{Ch}$ o $\%m_{ST}$	$\%m_{H_2O}$
1	22.5	7.5	30	75.000	25.000
2	22.5	17.5	40	56.250	43.750
3	22.5	37.5	60	37.500	62.500
4	22.5	57.5	80	28.125	71.875
5	22.5	77.5	100	22.500	77.500

Nota: m_{Ch} : masa de chayote seco, m_{ST} : masa de solidos totales, m_{H_2O} : masa de agua total, m_T : masa total en el recipiente y $\%m$: porcentaje en masa de dicho componente.

Tabla 4.6 Cantidades de agua y solidos totales del tercer bloque (chayote fresco molido)

Recipiente	m _{Ch}	m _{H₂O}	m _{ST}	m _{H₂O}	m _T	%m _{Ch}	% m _{H₂O}	%m _{ST}	%m _{H₂O}
1	90	0	6.84	83.16	90	100.000	0	7.600	92.400
2	90	70	6.84	153.16	160	56.250	43.750	4.275	95.725
3	90	150	6.84	233.16	240	37.500	62.500	2.850	97.150
4	90	230	6.84	313.16	320	28.125	71.875	2.138	97.863
5	90	310	6.84	393.16	400	22.500	77.500	1.710	98.290

Nota: masa expresada en g m_{Ch}: masa de chayote fresco, m_{H₂O}: masa de agua agregada m_{ST}: masa de solidos totales, m_{H₂O}T: masa de agua total, m_T: masa total en el recipiente y %m: porcentaje en masa de dicho componente.

Tabla 4.7 Cantidades de agua y solidos totales del cuarto bloque (chayote seco molido)

Recipiente	m _{Ch} o m _{ST} (g)	m _{H₂O} (g)	m _T (g)	%m _{Ch} o %m _{ST}	%m _{H₂O}
1	22.5	7.5	30	75.000	25.000
2	22.5	17.5	40	56.250	43.750
3	22.5	37.5	60	37.500	62.500
4	22.5	57.5	80	28.125	71.875
5	22.5	77.5	100	22.500	77.500

Nota: m_{Ch}: masa de chayote seco, m_{ST}: masa de solidos totales, m_{H₂O}: masa de agua total, m_T: masa total en el recipiente y %m: porcentaje en masa de dicho componente.

4.6.3 Resultados

Posteriormente se implemento el uso de una escala que es mostrada en la tabla 4.8, que va de 0 a 4 y que mide de manera cualitativa la generación de biogás de los sistemas, es decir que toma en cuenta el tiempo de gasificación y el volumen del globo, donde 0 significa que tardo mucho en gasificar y que el volumen fue pequeño y el 4 significa que gasifico pronto y con un volumen grande.

Tabla 4.8 Escala de generación de biogás de los sistemas

Generación de biogás	Magnitud
Nulo	0
Poco	1
Medio	2
Alto	3
Muy alto	4

Obteniéndose los siguientes resultados:

Para el primer bloque se observo una gran generación de biogás en el recipiente numero 4, seguido del recipiente numero 2, como se observa en la tabla 4.9 y la gráfica 4.1.

Tabla 4.9 Generación de biogás del primer bloque (Chayote fresco picado)

		Recipientes				
		1	2	3	4	5
Recipientes	Masa (g)	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5
	Volumen (ml)	0	3	1	4	2
1						
2	87.5					
3	187.5					
4	287.5					
5	387.5					

Gráfica 4.1 Generación de biogás del primer bloque (Chayote fresco picado)

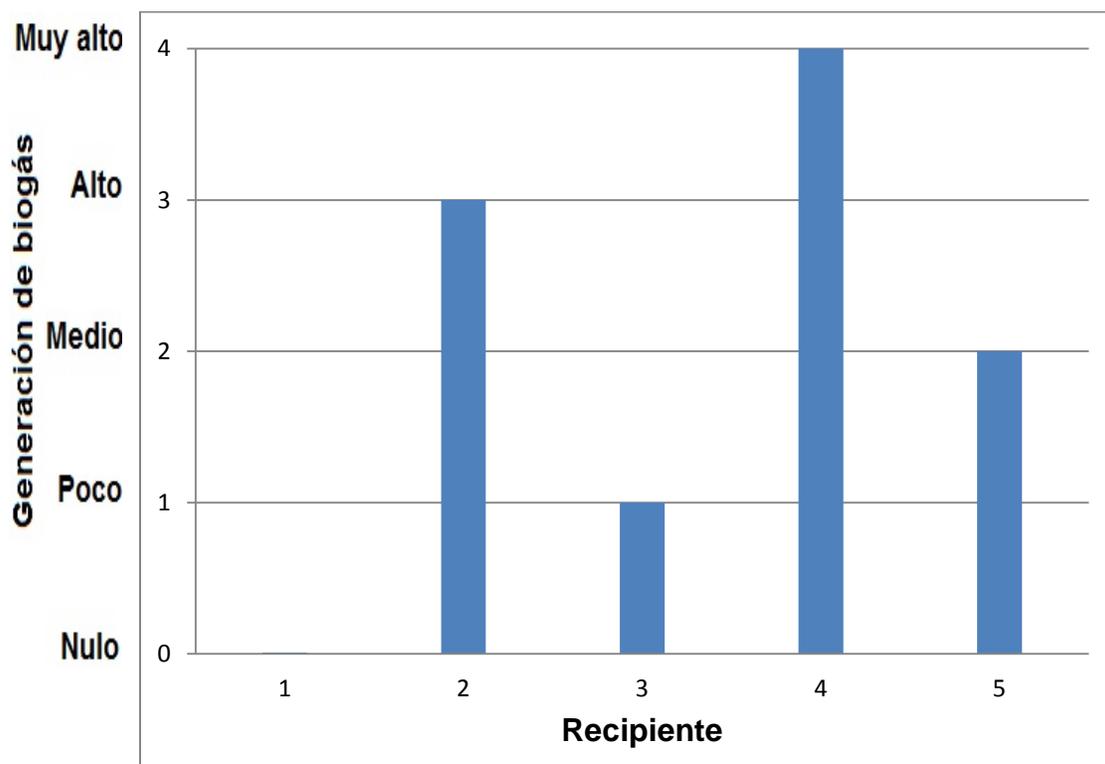


Figura 4.14 Generación de biogás del primer bloque (Chayote fresco picado)



Nota: Sistema 1 a 5 de izquierda a derecha

Para el segundo bloque se observó una gran generación de biogás en el recipiente número 2, seguido del recipiente número 4, como se observa en la tabla 4.10, gráfica 4.2 y la figura 4.15.

Tabla 4.10 Generación de biogás del segundo bloque (Chayote seco picado)

		Recipientes				
		1	2	3	4	5
Recipientes	Masa (g)	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
	Volumen (ml)	7.5	17.5	37.5	57.5	77.5
1		0				
2			4			
3				1		
4					3	
5						2

Gráfica 4.2 Generación de biogás del segundo bloque (Chayote seco picado)

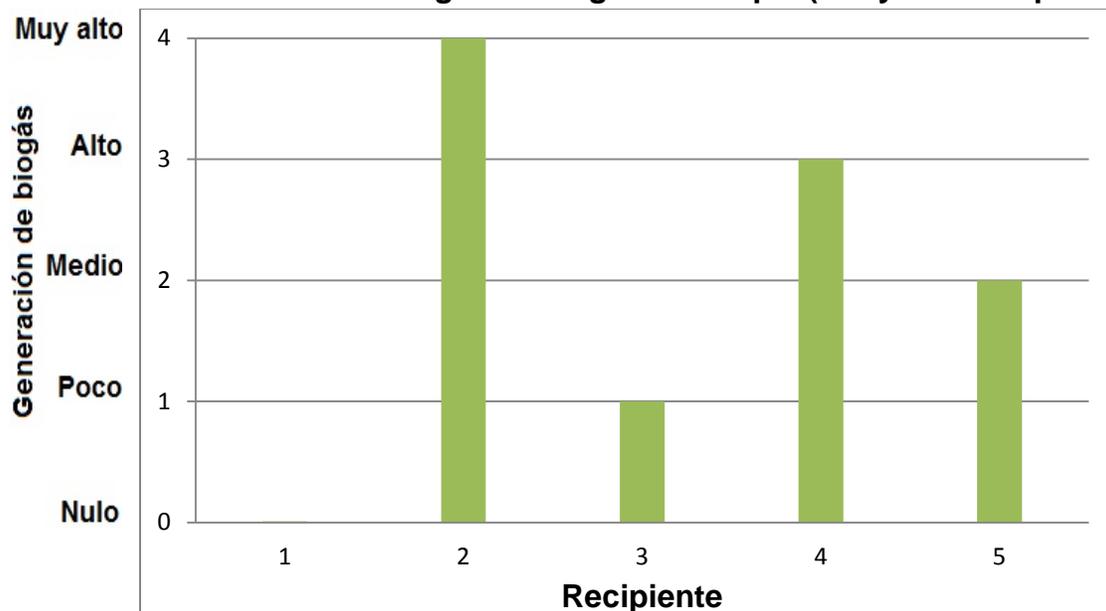


Figura 4.15 Generación de biogás del segundo bloque (Chayote seco picado)



Nota: Sistema 1 a 5 de izquierda a derecha

Para el tercer bloque se observo una gran generación de biogás en el recipiente numero 5, seguido del recipiente numero 3, como se observa en la tabla 4.11, la gráfica 4.3 y la figura 4.16.

Tabla 4.11 Generación de biogás del tercer bloque (chayote fresco molido)

		Recipientes				
		1	2	3	4	5
Recipientes	Masa (g)	90	90	90	90	90
	Volumen (ml)	90	90	90	90	90
1	0	2				
2	70		1			
3	150			3		
4	230				0	
5	310					4

Gráfica 4.3 Generación de biogás del tercer bloque (chayote fresco molido)

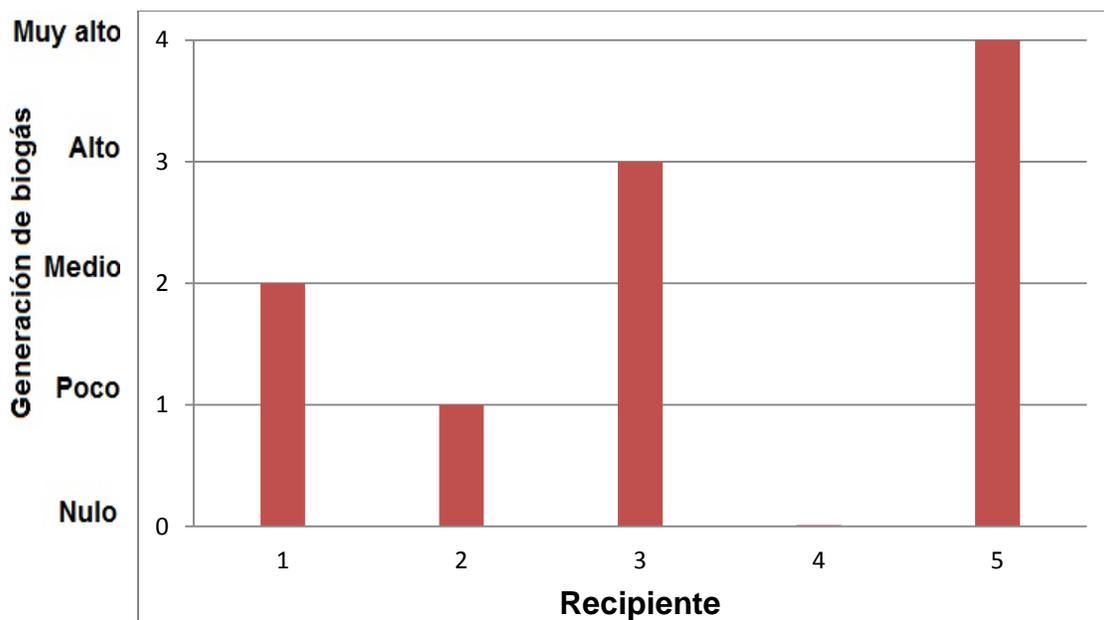


Figura 4.16 Generación de biogás del tercer bloque (chayote fresco molido)



Nota: Sistema 1 a 5 de izquierda a derecha

Para el cuarto bloque se observó una gran generación de biogás en el recipiente número 5, seguido del recipiente número 2, como se observa en la tabla 4.12, la gráfica 4.4 y la figura 4.17.

Tabla 4.12 Generación de biogás del cuarto bloque (chayote seco molido)

Recipientes	Masa (g) Volumen (ml)	1	2	3	4	5
		22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
1	7.5	1				
2	17.5		3			
3	37.5			0		
4	57.5				2	
5	77.5					4

Gráfica 4.4 Generación de biogás del cuarto bloque (chayote seco molido)

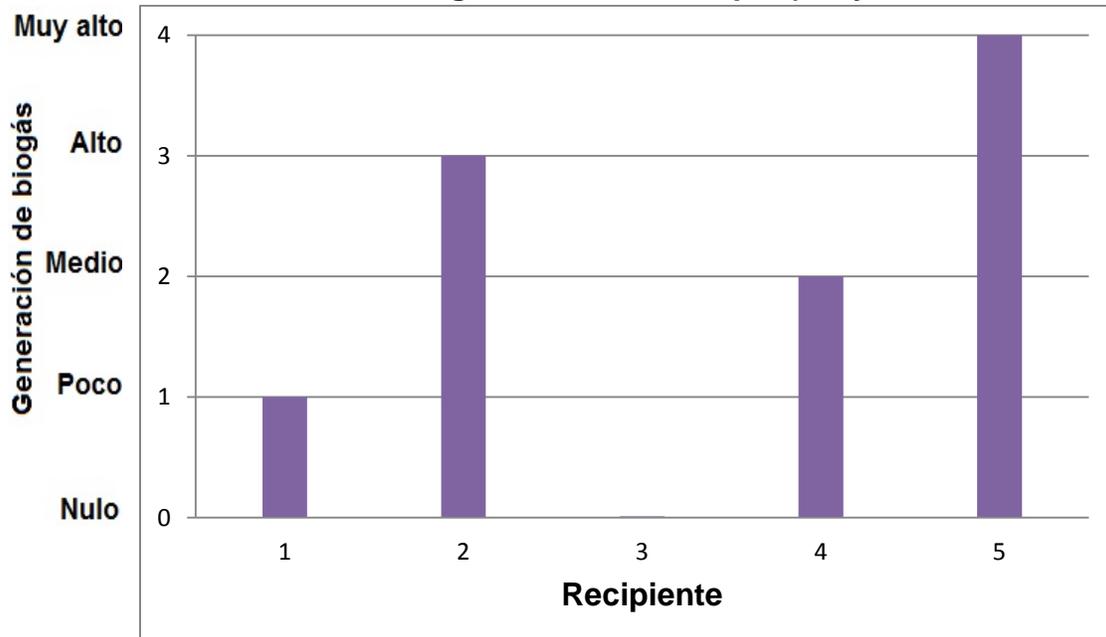


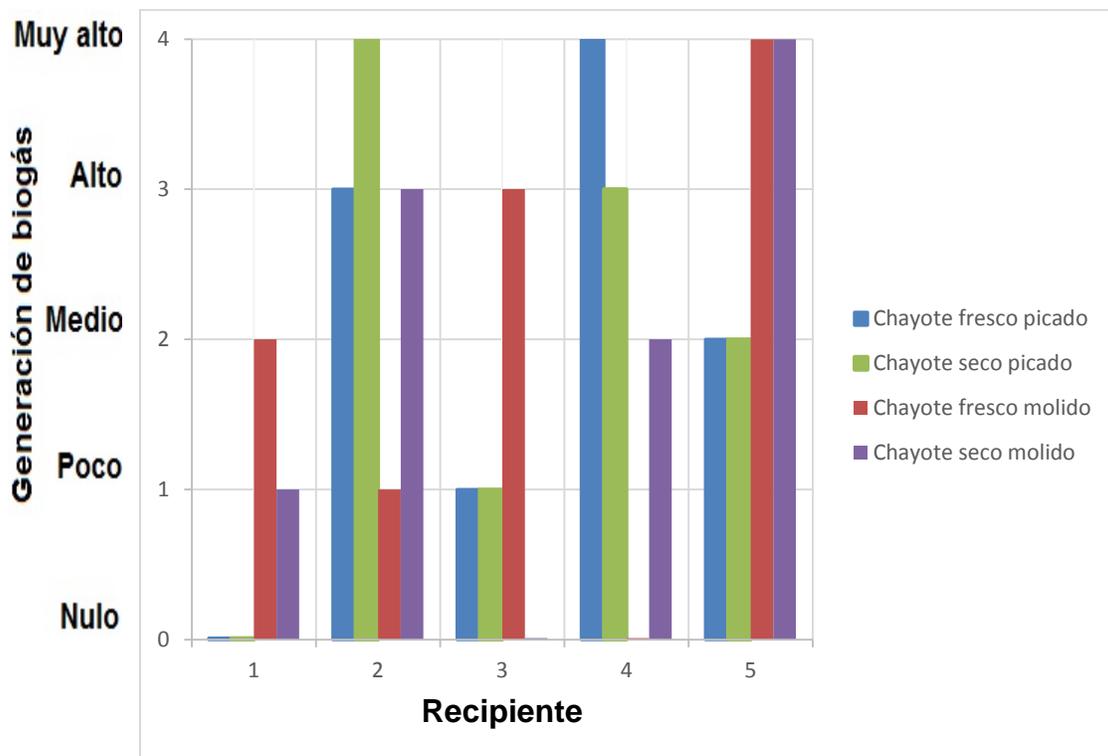
Figura 4.17 Generación de biogás del cuarto bloque (chayote seco molido)



Nota: Sistema 1 a 5 de izquierda a derecha

Por ultimo en la grafica 4.5 se muestra la generación de biogás de los 4 bloques, donde se observa que las relaciones masa de chayote - agua de los recipientes 2, 4 y 5 tuvieron las mejores producciones de biogás.

Gráfica 4.5 Generación de biogás de todos los sistemas de cada bloque



4.6.4 Formación del hongo y medición del pH

Tanto en el primer y cuarto bloque los recipientes 3, 4 y 5 fueron los que presentaron mayor formación de hongo, en el segundo bloque fueron los recipientes 4 y 5, mientras que en el tercer bloque fueron los recipientes 1 y 5.

En las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se muestran los recipientes 3, 4 y 5 respectivamente del primer bloque.

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestran los recipientes 4 y 5 respectivamente del segundo bloque.

En las figuras 4.23 y 4.24 se muestran los recipientes 1 y 5 respectivamente del tercer bloque.

Finalmente en las figuras 4.25, 4.26 y 4.27 se muestran los recipientes 3, 4 y 5 respectivamente del cuarto bloque.

Figura 4.18 Primer bloque recipiente

3



Figura 4.19 Primer bloque recipiente

4



Figura 4.20 Primer bloque recipiente

5

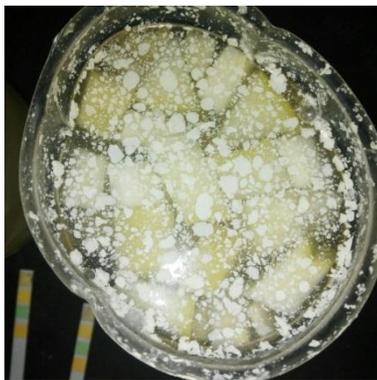


Figura 4.21 Segundo bloque recipiente 4

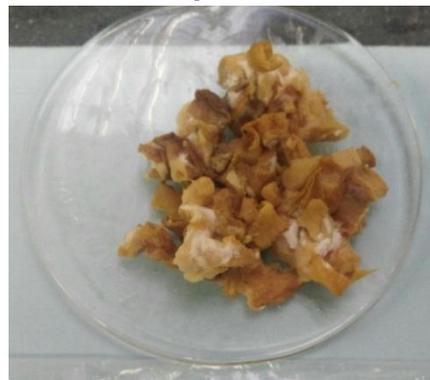


Figura 4.22 Segundo bloque recipiente 5



Figura 4.23 Tercer bloque recipiente 1



Figura 4.24 Tercer bloque recipiente 5



Figura 4.25 Cuarto bloque recipiente 3



Figura 4.26 Cuarto bloque recipiente 4



Figura 4.27 Cuarto bloque recipiente 5



Finalmente en la tabla 4.13 se resumen la mediciones de pH de los sistemas en los que se formo mayor cantidad de hongo.

Tabla 4.13 Mediciones de pH de diversos sistemas

Bloque	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5
1			pH=4	pH=4	pH=4
2			pH=5	pH=6	pH=7
3	pH=3				pH= 3
4			pH=5	pH=4	pH=4

4.7 Segunda parte de la experimentación (Temperatura)

4.7.1 Diseño experimental

La segunda parte de la experimentación tiene como finalidad determinar que condiciones de temperatura favorecen la producción de biogás a partir del chayote, empleando las composiciones de los sistemas que tuvieron mejor generación de biogás en cada bloque de la primer parte experimental y que son mostradas en la tabla 4.14. Es importante mencionar que en esta parte no se utilizo chayote seco molido, ya que la generación de biogás de este tipo de materia prima fue casi idéntico al del chayote seco picado.

Tabla 4.14 Resumen de los sistemas y composiciones con mejor generación de biogás de cada bloque

Bloque	Características	Sistema	%m _{Ch}	%m _{H₂O}
1	Chayote fresco picado en agua	4	28.125	71.875
2	Chayote seco picado en agua	2	56.250	43.750
3	Cayote fresco molido en agua	5	22.500	77.500

Esta parte experimental se dividió en tres bloques A, B y C, cada uno representa un intervalo de temperaturas que se trato de mantener lo mas constante posible y que son mostradas en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Intervalo de temperatura empleados

Bloque	T_{min} (°C)	T_{op} (°C)	T_{max} (°C)
A	22	25	28
B	37	40	43
C	52	55	58

Nota: T_{min}: Temperatura mínima, T_{op}: Temperatura optima y T_{max}: Temperatura máxima

Es decir que tanto el bloque A, B y C contienen sistemas de la tabla 4.14, pero con las diferentes temperaturas mostradas en la Tabla 4.15.

Para calentar los sistemas y mantener lo más constante su temperatura se fabrico un sistema tipo calorímetro con resistencia eléctrica integrada, que transfiere el calor del agua caliente a los sistemas. Para su fabricación se empleo una caja de cartón, aserrín, baño maría eléctrico (recipiente de plástico con resistencia eléctrica), termómetro, motor eléctrico, popote, placa de unicel, silicón y PLASTI LOKA® como se observa desde la figura 4.28 hasta la 4.40.

Figura 4.28 Disposición de los recipientes



Figura 4.29 Resistencia eléctrica instalada



Figura 4.30 Probando el baño maría



Figura 4.31 Cortando la tapa de unicel

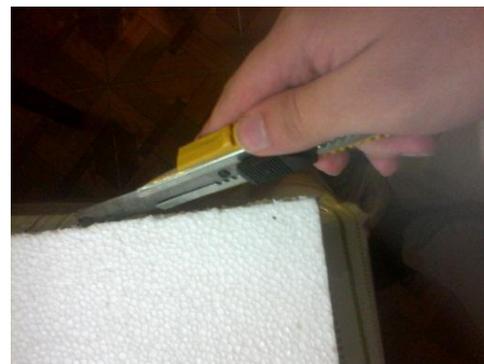


Figura 4.32 Perforando tapa de unicel

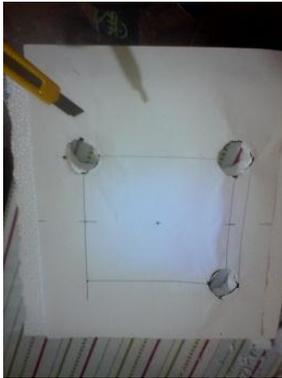


Figura 4.33 Tapa de unicel perforada



Figura 4.34 Cortando tiras de unicel

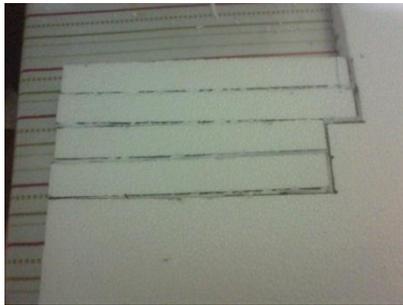


Figura 4.35 Tiras de unicel



Figura 4.36 Pegando las tiras en la tapa

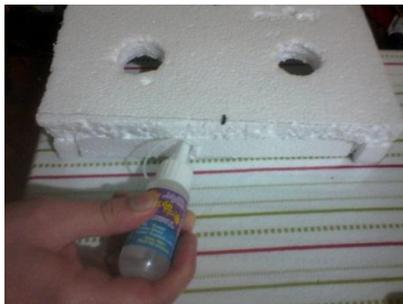


Figura 4.37 Fijando el motor agitador con PLASTI LOKA®



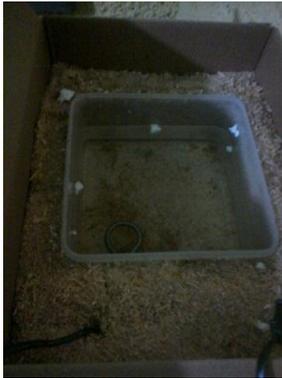
Figura 4.38 Tapa de unicel lista



Figura 4.39 Primer capa de aserrín en la caja de cartón



Figura 4.40 Aislado el baño maría con aserrín



Una vez fabricado el sistema, su operación consistió en colocar los tres recipientes de la tabla 4.14 ya armados dentro del recipiente de plástico (baño María), posteriormente llenarlo con agua, se colocó sobre este la tapa de unicel, se acomodaron los globos para que salieran del otro lado de la tapa, se colocó el termómetro (figura 4.41), se arrancó el motor del agitador y se conectaba y desconectaba la resistencia eléctrica para controlar la temperatura del baño maría de manera manual, es decir que para no sobrepasar la T_{max} se desconectaba la resistencia, mientras que se conectaba cuando el baño maría estaba cerca de la T_{min} , tratando siempre de mantener el sistema en la temperatura óptima durante siete días. Cuando pasaba este tiempo los sistemas eran desarmados y lavados para emplearlos en el siguiente intervalo de temperatura.

Figura 4.41 Operación del sistema



4.7.2 Cálculos

En esta ocasión se emplearon recipientes de vidrio con una capacidad aproximada de 500 ml, empleándose solo la mitad de su capacidad y armándose los sistemas con las cantidades que se muestran en la tabla 4.16

Tabla 4.16 Cantidades chayote y agua empleadas para cada intervalo de temperatura

Bloque	Sistema	%m _{Ch}	%m _{H₂O}	m _{Ch} (g)	m _{H₂O} (g)	m _T (g)
1	4	28.125	71.875	70.3	179.7	250
2	2	56.250	43.750	94.2	73.267	167.5
3	5	22.500	77.500	56.25	193.75	250

Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

4.7.3 Resultados

En esta parte se implemento el uso de la escala que se muestra en la tabla 4.17, que mide cualitativamente el tiempo de gasificación y el volumen del globo, donde 0 significa que tardo mucho en gasificar y que el volumen fue pequeño y el 2 significa que gasifíco pronto y con un volumen grande.

Tabla 4.17 Escala de generación de biogás de los sistemas

Generación de biogás	Magnitud
Nulo	0
Medio	2
Muy alto	4

Obteniéndose los siguientes resultados:

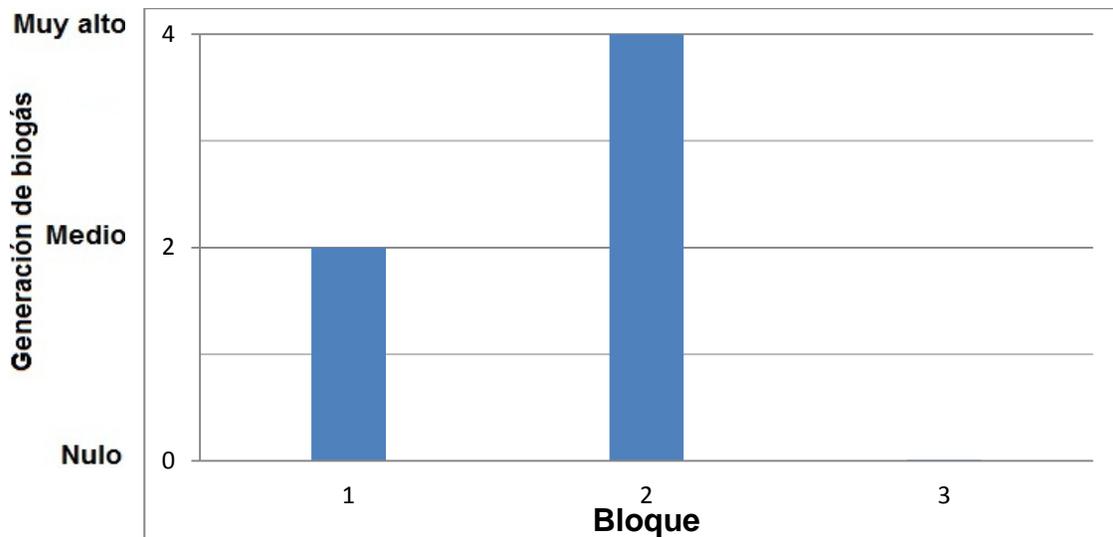
Para el bloque A ($T_{op}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) se observo una gran generación de biogás en el recipiente numero 2 del bloque 2 (chayote seco picado), seguido del recipiente numero 4 del bloque 1 (chayote fresco picado) y en ultimo lugar se encuentra el recipiente numero 5 del bloque 3 (chayote fresco molido, como se observa en la tabla 4.18, en la gráfica 4.6 y en la figura 4.42.

Tabla 4.18 Generación de biogás del bloque A ($T_{op}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

		Bloque		
		1	2	3
Bloque	Masa (g)	70.3	94.2	56.25
	Volumen (ml)	179.7	73.267	193.75
1		2		
2			4	
3				0

Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

Grafica 4.6 Generación de biogás del bloque A ($T_{op}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

Figura 4.42 Generación de biogás del bloque A ($T_{op}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Nota: Globo verde oscuro: chayote fresco picado, globo verde claro: chayote fresco molido y globo blanco: chayote seco picado.

Para el bloque B ($T_{op}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$) se observó una gran generación de biogás en el recipiente número 2 del bloque 2 (chayote seco picado), seguido del recipiente número 5 del bloque 3 (chayote fresco molido) y en último lugar se encuentra el

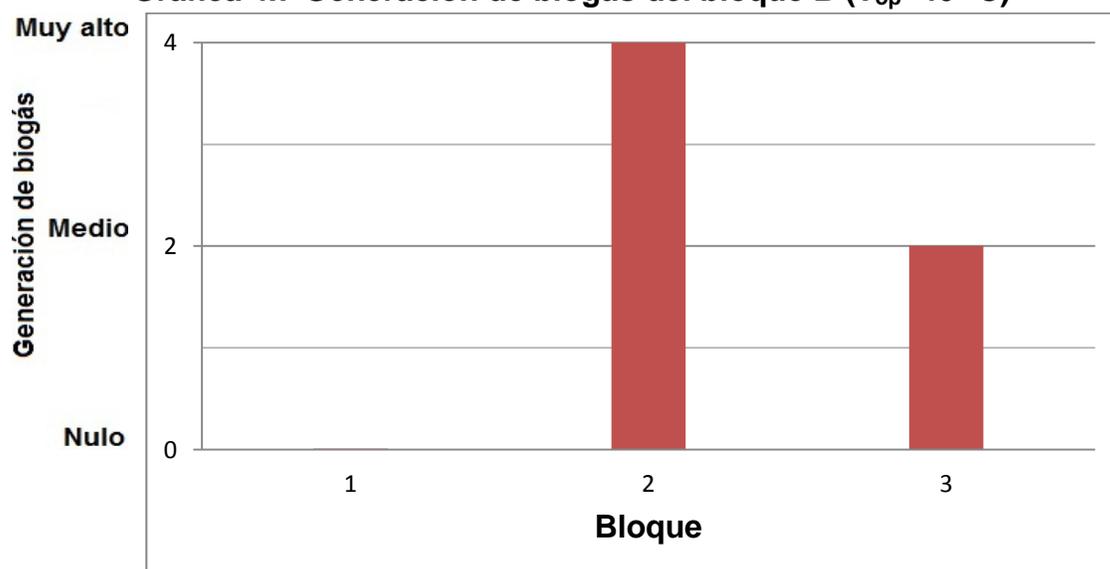
recipiente numero 4 del bloque 1 (chayote fresco picado), como se observa en la tabla 4.19, en la gráfica 4.7 y en la figura 4.43.

Tabla 4.19 Generación de biogás del bloque B ($T_{op}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

		Bloque		
		1	2	3
Bloque	Masa (g)	70.3	94.2	56.25
	Volumen (ml)	0	2	1
1	179.7			
2	73.267			
3	193.75			

Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

Gráfica 4.7 Generación de biogás del bloque B ($T_{op}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

Figura 4.43 Generación de biogás del bloque B ($T_{op}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Nota: Globo azul oscuro: chayote fresco picado, globo verde: chayote fresco molido y globo azul claro: chayote seco picado.

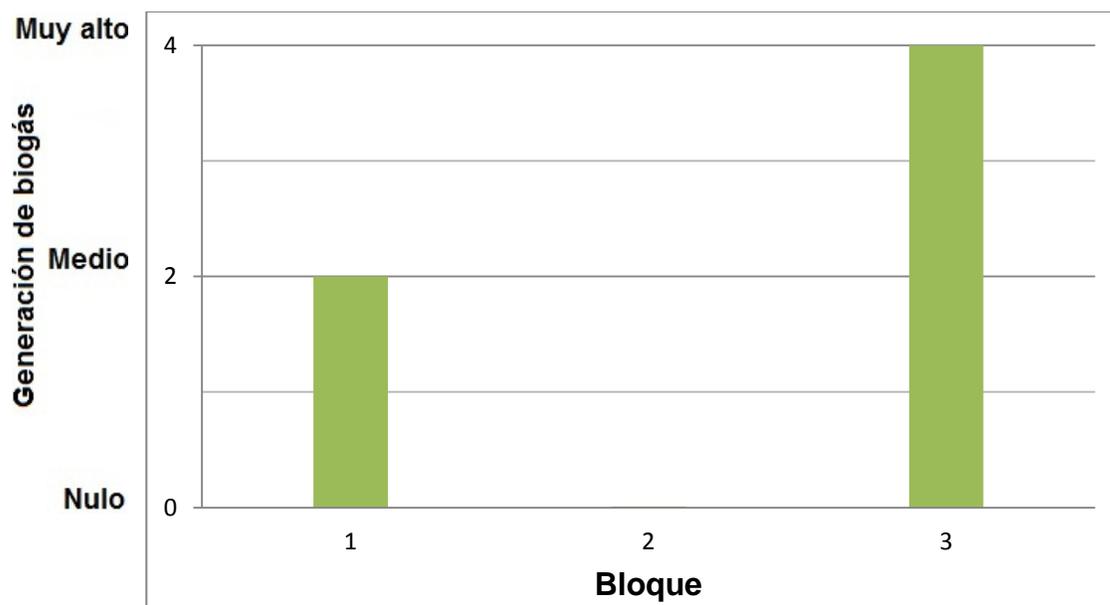
Para el bloque C ($T_{op}=55\text{ }^{\circ}\text{C}$) se observo una gran generación de biogás en el recipiente numero 5 del bloque 3 (chayote fresco molido), seguido del recipiente numero 4 del bloque 1 (chayote fresco picado) y en ultimo lugar se encuentra el recipiente numero 2 del bloque 2 (chayote seco picado), como se observa en la tabla 4.20, en la gráfica 4.8 y en la figura 4.44.

Tabla 4.20 Generación de biogás del bloque C ($T_{op}=55\text{ }^{\circ}\text{C}$)

		Bloque		
		1	2	3
Bloque	Masa (g)	70.3	94.2	56.25
	Volumen (ml)			
1	179.7	1		
2	73.267		0	
3	193.75			2

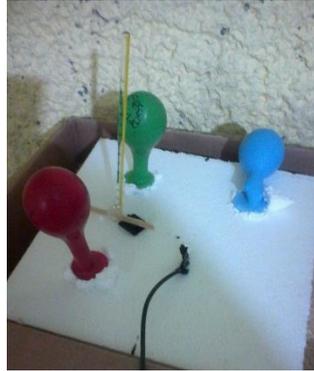
Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

Gráfica 4.8 Generación de biogás del bloque C ($T_{op}=55\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

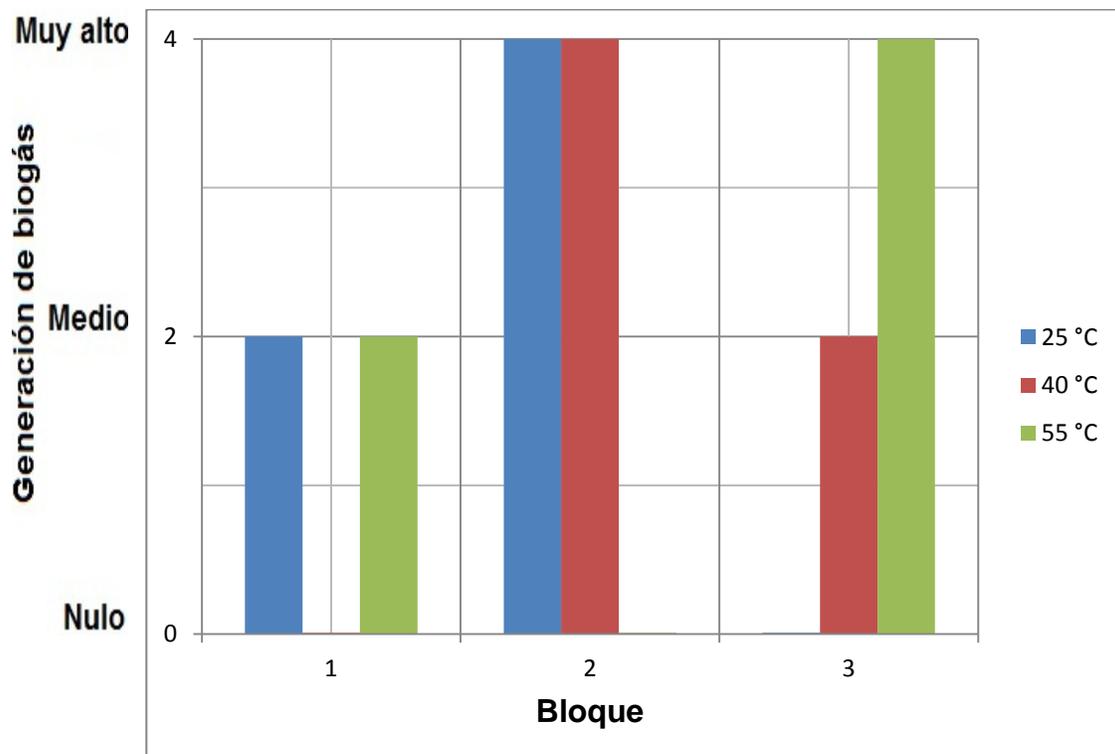
Figura 4.44 Generación de biogás del bloque C ($T_{op}=55\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Nota: Globo verde: chayote fresco picado, globo rojo: chayote fresco molido y globo azul: chayote seco picado.

En la grafica 4.9 se puede observar que al realizarse la digestión anaerobia tanto a 25 como a 40 $^{\circ}\text{C}$ los recipientes que contenían muestras de chayote seco fueron las que tuvieron mayor generación de biogás, mientras que a 55 $^{\circ}\text{C}$ la mayor generación de biogás se presentó en el recipiente que contenía chayote fresco molido.

Grafica 4.9 Generación de biogás de cada uno de los bloques de temperatura



Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

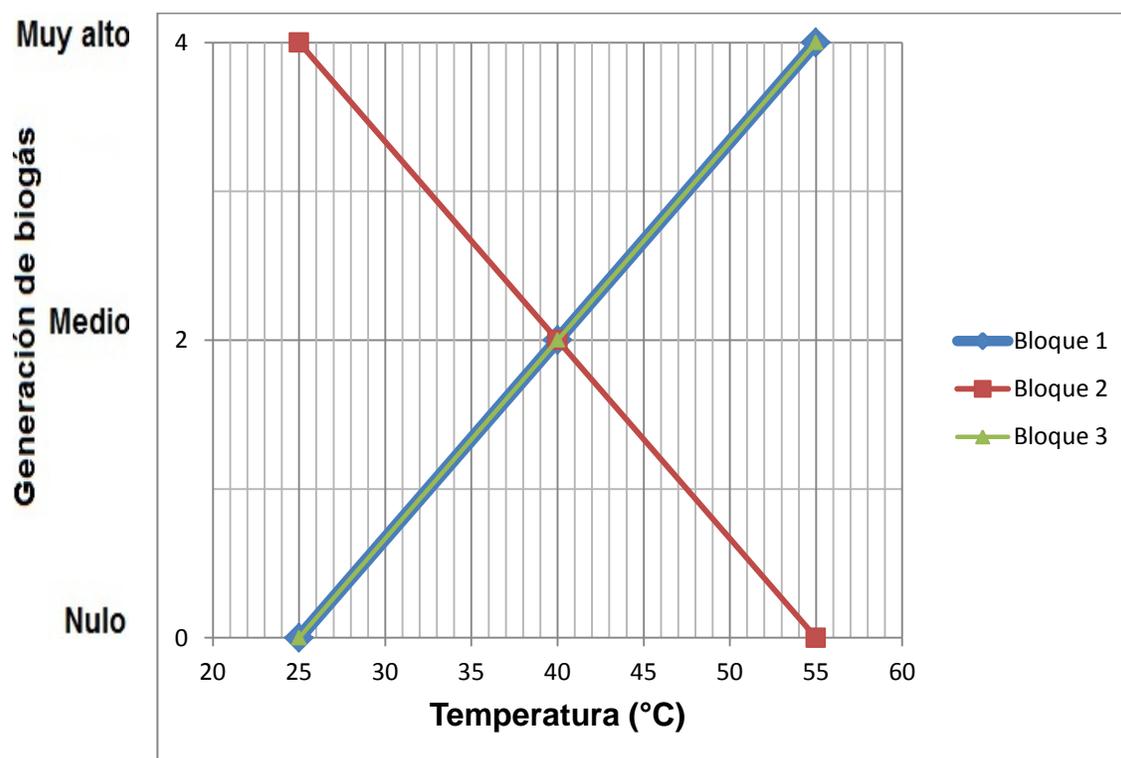
Finalmente en la tabla 4.21 y la grafica 4.10 podemos observar como influyo la temperatura en la generación de biogás de cada bloque.

Tabla 4.21 Generación de biogás de cada bloque a las diferentes temperaturas

		Bloque		
		1	2	3
T (°C)	25	Nulo	Muy alto	Nulo
	40	Medio	Medio	Medio
	55	Muy alto	Nulo	Muy alto

Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

Grafica 4.10 Generación de biogás de cada bloque a las diferentes temperaturas



Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado y Bloque 3: chayote fresco molido.

4.7.4 Formación del hongo

En esta etapa de la experimentación casi no hubo formación de hongo en comparación con la primera etapa, como se puede observar en las siguientes figuras.

En las figuras 4.45, 4.46 y 4.47 se muestran respectivamente el recipiente 4 del bloque 1, recipiente 2 del bloque 2 y recipiente 5 del bloque 2 a 25 °C.

En las figuras 4.48, 4.49 y 4.50 se muestran respectivamente el recipiente 4 del bloque 1, recipiente 2 del bloque 2 y recipiente 5 del bloque 2 a 40 °C.

Finalmente en las figuras 4.51, 4.52 y 4.53 se muestran respectivamente el recipiente 4 del bloque 1, recipiente 2 del bloque 2 y recipiente 5 del bloque 2 a 55 °C.

**Figura 4.45 Bloque 1
25 °C**



**Figura 4.46 Bloque 2
25 °C**



**Figura 4.47 Bloque 3
25 °C**



**Figura 4.48 Bloque 1
40 °C**



**Figura 4.49 Bloque 2
40 °C**



**Figura 4.50 Bloque 3
40 °C**



**Figura 4.51 Bloque 1
55 °C**



**Figura 4.52 Bloque 2
55 °C**



**Figura 4.53 Bloque 3
55 °C**



4.8 Análisis de resultados

Al realizar la digestión anaerobia a temperatura ambiente, se observó que los recipientes que contenían las composiciones de 56.25, 28.125 y 22.5 % en masa de chayote fueron los que presentaron mayor generación de biogás como se observa en la tabla 4.22, remarcando que el sistema 5 del bloque 3 (chayote fresco molido) fue el que generó más biogás en comparación con los demás sistemas. Con respecto al tiempo, los sistemas del bloque 3 (chayote fresco molido) presentaron los tiempos de gasificación más cortos ya que su estado líquido facilitó la producción de biogás.

Tabla 4.22 Generación de biogás a temperatura ambiente por sistema de cada bloque

		Sistema				
		1	2	3	4	5
%m _{ch}		100	56.25	37.5	28.125	22.5
Bloque	1	Nulo	Alto	Poco	Muy alto	Medio
	2	Nulo	Muy alto	Poco	Alto	Medio
	3	Medio	Poco	Alto	Nulo	Muy alto
	4	Poco	Alto	Nulo	Medio	Muy alto

Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado, Bloque 3: chayote fresco molido, Bloque 4: chayote seco molido y %m_{ch}: porcentaje en masa de chayote.

Posteriormente al realizar la digestión anaerobia a 25, 40 y 55 °C con las composiciones que tuvieron mayor generación de biogás, se observó que los sistemas que contenían chayote seco gasificaron en mayor volumen cuando se operó a 25 y 40 °C, mientras que las muestras de chayote fresco gasificaron en

mayor volumen cuando se opero a 55 °C. Es decir que los sistemas de chayote seco se favorecieron cuando se opero en la condición mesofílica (20 a 45 °C), mientras que las muestras de chayote fresco (picado y molido) se favorecieron cuando se opero en la condición termofílica (mayor a 45 °C), como se observa en la tabla 4.23. Con respecto al tiempo, los sistemas que contenían chayote fresco molido fueron los que empezaron a gasificar más pronto en los tres casos (25, 40 y 55 °C), pero a las temperaturas de 25 y 40 °C estos eran superados en volumen de gasificación con el transcurso de los días por los recipientes que contenían chayote seco.

Tabla 4.23 Generación de biogás por sistema de cada bloque

		Bloque		
		1	2	3
%m_{ch}		28.125	56.25	22.5
T (°C)	25	Nulo	Muy alto	Nulo
	40	Medio	Medio	Medio
	55	Muy alto	Nulo	Muy alto

Nota: Bloque 1: chayote fresco picado, Bloque 2: chayote seco picado, Bloque 3: chayote fresco molido, Bloque 4: chayote seco molido y %m_{ch}: porcentaje en masa de chayote.

CAPITULO V

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN

En este capítulo se describirán diferentes propuestas de biodigestión a nivel piloto, desde la recolección de los materiales orgánicos hasta la obtención de calor y electricidad mediante la combustión del biogás generado.

Realizándose el balance de masa y energía de dichas propuestas con fin de obtener biogás que cubra las necesidades mínimas de calefacción y electricidad de un hogar promedio, es decir, suministrarle la mínima energía para cocinar, calentar el agua para el aseo personal y electricidad para alumbrar.

Se plantea calcular un consumo promedio de electricidad y gas LP de una vivienda de la ciudad de México, posteriormente se determinara un consumo mínimo de biogás equivalente, y en base a esto se realizaran los respectivos balances de masa y energía, para determinar las necesidades de materia orgánica y energía para obtener la mínima cantidad de biogás.

5.1 Determinación del consumo promedio de electricidad y gas LP de una vivienda de la ciudad de México

Primeramente para determinar las necesidades energéticas promedio de una vivienda de la ciudad de México se investigaron ciertos indicadores sociodemográficos como son la población, datos de las viviendas, así como la disponibilidad de diversas tecnologías de la información y la comunicación, así como el hábito del ahorro de energía y la separación de residuos de la ciudad de México, como se observa en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.

Tabla 5.1 Población total y distribución por género de la ciudad de México

	Hombres	Mujeres	Total
Población	4,227,442	4,691,211	8,918,653
%	47.4	52.6	100

Fuente: *Panorama sociodemográfico de México 2015*, p. 14, por INEGI. 2015, México: INEGI. Copyright 2015 por INEGI.

Tabla 5.2 Total de viviendas y disponibilidad de servicios de la ciudad de México

	Que disponen				Total
	De agua entubada	De drenaje	De servicio sanitario	De electricidad	
Viviendas	2,325,583	2,570,107	2,585,715	2,596,120	2,601,323
%	89.4	98.8	99.4	99.8	100
POV	3.429				
POC	0.8				

Nota: **POV**: Promedio de ocupantes por vivienda y **POC**: Promedio de ocupantes por cuarto.
 Fuente: *Panorama sociodemográfico de México 2015*, p. 14, por INEGI. 2015, México: INEGI.
 Copyright 2015 por INEGI.

Tabla 5.3 Disponibilidad de las tecnologías de la información y la comunicación de las viviendas de la ciudad de México

	Que disponen					
	De internet	De televisión de paga	De pantalla plana	De computadora	De celular	De teléfono fijo
Viviendas	1,508,767	1,147,183	1,607,618	1,422,924	2,224,131	1,805,318
%	58	44.1	61.8	54.7	85.5	69.4

Fuente: *Panorama sociodemográfico de México 2015*, p. 14, por INEGI. 2015, México: INEGI.
 Copyright 2015 por INEGI.

Tabla 5.4 Disponibilidad de tecnologías para el ahorro de energía y viviendas que separan los residuos de la ciudad de México

	Que disponen			Que separan residuos
	De panel solar	De calentador solar	De focos ahorradores	
Viviendas	13,007	572,291	1,703,867	2,348,995
%	0.5	22	65.5	90.3

Fuente: *Panorama sociodemográfico de México 2015*, p. 14, por INEGI. 2015, México: INEGI.
 Copyright 2015 por INEGI.

A partir de estos datos sería posible realizar una estimación del consumo eléctrico de una vivienda de la ciudad de México, pero hay que tener en cuenta que este valor depende del número de integrantes, el consumo individual de cada electrodoméstico, así como del periodo de tiempo que estos son utilizados, así que una forma de realizar esta estimación de manera sencilla y rápida es a partir del consumo total de energía eléctrica de la zona, lo que fue de 14,464.264 GWh en el

año 2015 (SENER, 2017). Así que a partir de este valor se obtienen los parámetros que se muestran en la tabla 5.5, al dividir el consumo eléctrico total entre el número de habitantes y viviendas que disponen de energía eléctrica.

Tabla 5.5 Consumo de energía eléctrica promedio en la ciudad de México

	Unidades	Año 2015
Consumo de energía eléctrica	GJ/hab	5.850
	GJ/vivienda	20.057

Principalmente el consumo de energía eléctrica de una vivienda dependerá del número de integrantes, pero a partir del valor del promedio de ocupantes por vivienda de la tabla 5.2 podemos suponer que de manera general mínimo hay 3 habitantes y máximo 4 habitantes por vivienda, presentándose en la tabla 5.6 los respectivos consumos para cada caso en diferentes periodos de tiempo

Tabla 5.6 Consumo de energía eléctrica promedio por persona y viviendas en diferentes periodos de tiempo

		Consumo eléctrico (GJ)			
		Diario	Quincenal	Mensual	Anual
	Por habitante	0.016	0.240	0.488	5.850
Por vivienda	Promedio	0.055	0.824	1.671	20.057
	3 habitantes	0.048	0.721	1.463	17.551
	4 habitantes	0.064	0.962	1.950	23.401

Sería importante dividir del consumo total de energía eléctrica, el que se destina a la iluminación y a los demás aparatos eléctricos, por lo que se estimara el consumo de electricidad de los focos, suponiendo que en cada vivienda hay una cantidad de 5 a 10 focos y que son utilizados en promedio 150 horas al mes, en esta parte sería importante dividir el consumo de iluminación para la población que emplea focos ahorradores (20 w) e incandescentes (75 w) y que son mostrados respectivamente en la tabla 5.7 y 5.8.

Tabla 5.7 Consumo mínimo y máximo de focos ahorradores por vivienda

		Consumo eléctrico iluminación (GJ)			
		Diario	Quincenal	Mensual	Anual
	Por foco	0.0004	0.005	0.011	0.130
Viviendas	5 focos	0.002	0.027	0.054	0.648
	10 focos	0.004	0.053	0.108	1.296

Tabla 5.8 Consumo mínimo y máximo de focos incandescentes por vivienda

		Consumo eléctrico iluminación (GJ)			
		Diario	Quincenal	Mensual	Anual
	Por foco	0.001	0.020	0.041	0.486
Viviendas	5 focos	0.007	0.100	0.203	2.430
	10 focos	0.013	0.200	0.405	4.860

De las tablas 5.6 a 5.8 se deduce que el consumo de electricidad aproximado de todos los focos ahorradores en un hogar promedio va del 3.231 y 5.538 % del consumo total de electricidad, mientras que el consumo de focos incandescentes va del 12.115 y 24.23 %, aquí se refleja la importancia de emplear focos ahorradores, además de que estos duran mas tiempo.

Para la estimación del consumo promedio del gas LP en las viviendas de la ciudad de México se empleo el dato de consumo per cápita de gas LP de México del año 2008, teniendo un valor de 65 Kg/hab (SENER, 2010, p. 28).

Tabla 5.9 Consumo per cápita másico de gas LP en el año 2008

	Unidades	Año 2008
Consumo de gas LP	Kg/hab	65
	Kg/vivienda	265

A partir de los consumos mostrados en la tabla 5.9 se calcularon los consumos de gas LP en diferentes periodos de tiempo y que son mostrados en la tabla 5.10, suponiendo que de manera general mínimo hay 3 habitantes y máximo 4 habitantes por vivienda.

Tabla 5.10 Consumo de gas LP por persona y viviendas en diferentes periodos de tiempo

		Consumo másico (Kg)			
		Diario	quincenal	Mensual	anual
	Por habitante	0.178	2.671	5.417	65.000
Por vivienda	Promedio	0.623	9.349	18.958	227.500
	3 habitantes	0.534	8.014	16.250	195.000
	4 habitantes	0.712	10.685	21.667	260.000

Posteriormente a partir del poder calorífico másico del gas LP, que tiene un valor de 48.037 MJ/Kg (Franco y Velázquez, 2014, p. 162), y de los datos de consumo

de la tabla 5.10 se calcularon sus equivalentes energéticos y son mostrados en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Equivalente energético del consumo de gas LP por persona y viviendas en diferentes periodos de tiempo

		Equivalente energético (GJ)			
		Diario	Quincenal	Mensual	Anual
	Por habitante	0.009	0.128	0.260	3.122
Por vivienda	Promedio	0.030	0.449	0.911	10.928
	3 habitantes	0.026	0.385	0.781	9.367
	4 habitantes	0.034	0.513	1.041	12.490

Posteriormente en la tabla 5.12 se muestra el consumo energético total (electricidad y gas LP) por persona y viviendas en diferentes periodos de tiempo.

Tabla 5.12 Consumo energético total (electricidad y gas LP)

		Consumo energético de electricidad y gas LP (GJ)			
		Diario	Quincenal	Mensual	Anual
	Por habitante	0.025	0.369	0.748	8.973
Por vivienda	Promedio	0.085	1.273	2.582	30.986
	3 habitantes	0.074	1.106	2.243	26.918
	4 habitantes	0.098	1.475	2.991	35.890

Estos consumos de energía eléctrica y gas LP servirán para establecer una aproximada cantidad de materia orgánica que será necesaria agregar a un biodigestor para producir el biogás necesario para satisfacer las necesidades de un hogar promedio.

De aquí en adelante se emplearan los consumos de electricidad y gas LP diarios de una vivienda promedio, en la tabla 5.13 se muestra la energía consumida diariamente de los servicios de una vivienda promedio.

Tabla 5.13 Consumo energético de una vivienda promedio

Energía consumida (GJ/día)				
Toda la vivienda	Servicio de electricidad	Servicio de gas LP	Servicio de iluminación (intervalo)*	
0.085	0.055	0.030	0.002	0.013

Nota: * Ya esta incluido en el servicio de electricidad

A partir de los consumos de energía mostrados en la tabla 5.13 se procedió a estimar las cantidades de metano necesarios para abastecer de energía dichos servicios y que son mostrados en la tabla 5.14, considerando que el metano tiene un poder calorífico de 0.05 GJ/kg (Wauquier, 2004, p. 181), que equivale a 0.036 GJ/m³ (Varnero, 2011, p. 55) y suponiendo que su transformación en electricidad y calor tendría una eficiencia del 100 %.

Tabla 5.14 Consumo de metano de una vivienda promedio

	Consumo de metano por día				
	Toda la vivienda	Servicio de electricidad	Servicio de gas (calor)	Servicio de iluminación (intervalo)*	
Masa (Kg)	1.698	1.099	0.599	0.036	0.266
Volumen (m³)	2.358	1.526	0.832	0.049	0.370

Nota: * Ya esta incluido en el servicio de electricidad

5.2 Estimación preliminar de la cantidad de materia orgánica para el proceso de biodigestión

Los resultados del apartado anterior serán utilizados como base para estimar la cantidad de residuos orgánicos necesarios para producir biogás para satisfacer las necesidades de electricidad y gas (calor) en una vivienda promedio.

Primero se realizara una comparación de la cantidad necesaria de diferentes tipos de sustratos, estiércol, residuos vegetales y una mezcla de diversos residuos orgánicos generados en el hogar para observar como influyen en la producción total de biogás.

Como no se encontraron rendimientos experimentales de producción de biogás a partir de chayote se procederá a estimarlo de manera teórica a partir de la composición promedio de sus componentes orgánicos, es decir de su contenido

de carbohidratos proteínas y grasas que son mostradas de manera resumida en la tabla 5.15.

Tabla 5.15 Propiedades y composición para 100 g de chayote

Contenido energético (Kcal)	26.0-31.0	
	Composición (%)	
Componente	Intervalo	Promedio
Humedad	89.0-93.4	91.2
Carbohidratos	3.5-7.7	5.6
Proteínas	0.9-1.1	1
Grasas	0.1-0.3	0.2

Fuente: *Chayote. Sechium edule (Jacq.) Sw.*, (p. 28), por Lira, R., 1996, Italia: International Plant Genetic Resources Institute. Copyright 1996 por International Plant Genetic Resources Institute.

Cada componente orgánico que conforma el chayote será multiplicado por su respectivo rendimiento de biogás teórico, que fueron mostrados en la tabla 2.8, serán sumados los resultados para cada componente y posteriormente serán divididos entre la masa total de chayote y finalmente para hacerlo un valor más exacto a la realidad será multiplicado por una fracción de degradación anaerobia (para residuos vegetales podemos asumir un valor de biodegradabilidad orgánica de 75 %) como es mostrado en la ecuación 5.1.

$$RM_{Ch} = \frac{RMT_{Ca} \cdot m_{Ca} + RMT_{Pr} \cdot m_{Pr} + RMT_{Gr} \cdot m_{Gr}}{m_{Ch}} \cdot \frac{\% B}{100 \%} \quad 5.1$$

Donde:

RM_{Ch} = Rendimientos de metano del chayote $\left[\frac{L^3}{m} \right]$

RMT_i = Rendimientos de metano teóricos del componente i $\left[\frac{L^3}{m} \right]$

m_i = Masa del componente i $[m]$

Ca=Carbohidratos

Pr= Proteínas

Gr= Grasas

Ch=Chayote

% B =Porcentaje de biodegradabilidad

Es decir:

$$RM_{Ch} = \frac{0.35 \frac{m^3}{Kg} \cdot 5.6 g + 0.57 \frac{m^3}{Kg} \cdot 1 g + 0.95 \frac{m^3}{Kg} \cdot 0.2 g}{0.1 Kg Ch} \cdot \frac{75 \%}{100 \%} \cdot \frac{1 Kg}{1000 g}$$

$$= 0.0204 \frac{m^3 \text{ metano}}{Kg \text{ chayote}} \quad 5.2$$

O lo que es equivalente a

$$RM_{Ch} = \frac{0.35 \frac{m^3}{Kg} \cdot 5.6 g + 0.57 \frac{m^3}{Kg} \cdot 1 g + 0.95 \frac{m^3}{Kg} \cdot 0.2 g}{0.0068 Kg SV} \cdot \frac{75 \%}{100 \%} \cdot \frac{1 Kg}{1000 g}$$

$$= 0.3 \frac{m^3 \text{ metano}}{Kg SV} \quad 5.3$$

En la tabla 5.16 se muestran diversas características para diversos sustratos orgánicos como son su % SV, relación C/N y su potencial de metano.

Tabla 5.16 Potencial de metano de diversos sustratos orgánicos

Sustrato	% SV	Potencial de metano (m ³ /Kg SV)	Relación C/N	Potencial de metano (m ³ /Kg húmedo)
Estiércol de cerdo	22	0.321	15.8	0.071
Estiércol de pollo	19.5	0.321	10.6	0.063
Estiércol vacuno	27.1	0.247	25	0.067
Hojas de maíz	76.9	0.252	54	0.194
Paja de trigo	77.9	0.268	99.8	0.209
Paja de arroz	81.6	0.284	44.1	0.232
Desperdicios de cocina	22.7	0.553	20.3	0.126
Desechos de frutas y hortalizas	3.3	0.356	13.1	0.012
Chayote	6.8	0.3	ND	0.020
Aceite animal usado	99.6	0.78	ND	0.777

Aceite vegetal usado	99.5	0.801	ND	0.797
Desechos de jardín	60.4	0.187	25.9	0.113

Fuente: *Bioresource Technology*, (p. 568), por Li Y., Zhang R, Liu G., Chen, C., He Y. & Liu X., 2013, ELSEVIER. Copyright 2013 por ELSEVIER.

Así que a partir de la cantidad de metano consumido en una vivienda promedio (Tabla 5.14), se determinó la cantidad necesaria de cada sustrato mostrado en la tabla 5.15 para producir el suficiente metano para abastecer los servicios energéticos de una vivienda promedio por día (tabla 5.17).

$$MS = \frac{V}{PC \cdot PM} \quad 5.4$$

Donde

MS = Masa de sustrato [m]

V = Volumen necesario de metano [L^3]

PM = Potencial de metano del sustrato [$\frac{L^3}{m}$]

Tabla 5.17 Cantidad de sustrato necesario para la producción de metano que cubra las necesidades energéticas de una vivienda promedio

Sustrato	Cantidad de sustrato en (Kg/día)				
	Toda la vivienda	Servicio de electricidad	Servicio de gas (calor)	Servicio de iluminación (intervalo)*	
Estiércol de cerdo	33.392	21.615	11.777	0.698	5.237
Estiércol de pollo	37.673	24.386	13.287	0.788	5.909
Estiércol vacuno	35.229	22.804	12.425	0.737	5.526
Hojas de maíz	12.169	7.877	4.292	0.254	1.909
Paja de trigo	11.295	7.311	3.984	0.236	1.772
Paja de arroz	10.176	6.587	3.589	0.213	1.596
Desperdicios de cocina	18.785	12.160	6.625	0.393	2.946
Desechos de frutas y hortalizas	200.726	129.932	70.794	4.198	31.483

Chayote	115.594	74.825	40.769	2.417	18.131
Aceite animal usado	3.035	1.965	1.071	0.063	0.476
Aceite vegetal usado	2.959	1.915	1.044	0.062	0.464
Desechos de jardín	20.878	13.515	7.363	0.437	3.275

Nota: * Ya esta incluido en el servicio de electricidad

En la tabla 5.18 se muestran la disponibilidad de diferentes residuos animales, en base a estos datos podemos estimar el número de animales necesarios para producir el estiércol necesario al día y que es mostrado en la tabla 5.19.

Tabla 5.18 Producción de biogás por tipo de residuo animal

Estiércol	Disponibilidad (Kg/día)
Porcino (50 kg)	2.25
Aves (2 kg)	0.18
Bovino (500 kg)	10

Fuente: *Manual del biogás*, (p. 34), por Varnero, M. T., 2011, FAO. Copyright 2011 por FAO.

Tabla 5.19 Cantidad de animales para obtener suficiente estiércol

Estiércol	Cantidad de animales				
	Toda la vivienda	Servicio de electricidad	Servicio de gas (calor)	Servicio de iluminación (intervalo)*	
Cerdo	14.841	9.607	5.234	0.310	2.328
Aves	209.293	135.477	73.816	4.377	32.827
Vacuno	3.523	2.280	1.242	0.074	0.553

Nota: * Ya esta incluido en el servicio de electricidad

Como se observa en la tabla 5.17 y en la 5.19 se necesita de una considerable cantidad de estiércol así como de animales (cerdos y pollos) para abastecer de energía una vivienda, pero no sería gran inconveniente para una granja o un establo.

Como se observa en la tabla 5.17 es necesaria una enorme cantidad de desperdicios de frutos y verduras de los que no se disponen en una vivienda.

Pero el conjunto de residuos de cocina, frutas, verduras, y de jardín generados en un hogar pueden ser empleados para satisfacer las necesidades de gas (calor) y

electricidad. Los residuos antes mencionados corresponden a una fracción orgánica de los RSU que sería importante evaluar como posible propuesta.

5.3 Propuesta de biodigestión de RSU orgánicos

Los principales RSU orgánicos que se generan en un hogar y que pueden ser aprovechados para la generación de metano son los residuos de cocina, restos de frutas y verduras y residuos de jardín. Por lo que esta parte consiste en evaluar cuanto metano se podría producir y que servicios podría satisfacer en un hogar promedio.

En la ciudad de México la generación per cápita diaria de RSU es de 1.5 Kg, con una composición de 52.4 % de materiales orgánicos, como son residuos de comida y de jardines (SEMARNAT, 2012). Por lo que la generación per cápita diaria de RSU orgánicos sería de 0.786 Kg, suponiendo que esta parte orgánica estuviera compuesta por un 50 % de residuos de cocina, 35 % de residuos de frutas y verduras y 15 % de residuos de jardín, podemos estimar la cantidad de residuos orgánicos que se generan diariamente en un hogar promedio de la ciudad de México como se observa en la tabla 5.20.

Tabla 5.20 Generación promedio de RSU orgánicos en la ciudad de México

	Generación de RSU orgánicos (Kg/día)			
	Total	Cocina	Frutas y verduras	Jardín
Habitante	0.786	0.393	0.275	0.118
Hogar promedio	2.695	1.347	0.943	0.404

Posteriormente se estimara la producción de metano de un hogar promedio (tabla 5.21) mediante la cantidad de residuo generado al día de la tabla 5.20, empleando los potenciales de metano de la tabla 5.16. Es importante mencionar que las producciones de metano estimadas en la tabla 5.21 serian alcanzadas en un tiempo de retención de 20 a 25 días.

Tabla 5.21 Estimación de la producción de metano

	Producción de metano de un hogar promedio			
	RSU orgánicos			
	Total	Cocina	Frutas y verduras	Jardín
Volumen (m³)	0.226	0.169	0.011	0.046
Masa (Kg)	0.163	0.122	0.008	0.033

Nota: Se muestra la producción de metano a partir de la masa de RSU generado en un día, suponiendo un tiempo de retención de 20 a 25 días, es decir que el rendimiento máximo de biogás no se alcanzara en un día, y que la cantidad evaluada de RSU es el que se genera en un día.

En la tabla 5.22 se muestra la energía liberada al quemarse las cantidades de metano mostradas en la tabla 5.21.

Tabla 5.22 Equivalente energético del metano producido

Equivalente energético del metano producido (GJ)			
RSU orgánicos			
Total	Cocina	Frutas y verduras	Jardín
0.00813	0.006	0.0004	0.002

Como se puede observar en la tabla 5.22 los residuos de frutas y verduras son los que generan menos energía que los demás RSU, esto es debido principalmente por su poca concentración de sólidos volátiles.

En la tabla 5.23 podemos observar que el total de energía que podemos obtener de los RSU orgánicos generados en un día es de 0.00813 GJ, en la tabla 5.24 se muestra de manera resumida los requerimientos de energía diarios de una vivienda promedio y la energía producida por los RSU generados en un día.

Tabla 5.24 Energía consumida y producida en una vivienda

Energía consumida (GJ/día)				Energía Producida (GJ)*	
Toda la vivienda	Servicio de electricidad	Servicio de gas (calor)	Servicio de iluminación (intervalo)*		RSU**
0.085	0.055	0.03	0.002	0.013	0.00813
9.567	14.785	27.105	406.579	62.551	%

Nota: *: Ya esta incluido en el servicio de electricidad, **: Energía producida a partir de la masa de RSU total generado en un día.

Como se observa en la tabla 5.24 la energía producida por los RSU que son generados en un día en una vivienda promedio (0.00813 GJ) no abastece por completo una vivienda, solo representa el 9.567 % de la energía consumida en toda la vivienda, el 14.785 % de la energía eléctrica consumida, el 27.105 % de la energía del servicio de gas consumido, mientras que si se realizan ajustes en el numero y tipo de focos es posible iluminar una vivienda promedio.

Dicho de otra forma con la energía producida (0.00813 GJ), podemos establecer que aparatos, en que tiempo y que cantidad podemos hacerlos funcionar suponiendo una eficiencia del 100 %, como se observa en la tabla 5.25 para el servicio de iluminación o en la tabla 5.26 para el servicio de gas (calor).

Tabla 5.25 Distribución de la energía producida en el servicio de iluminación

Servicio de iluminación		
Tipo de focos	Numero de focos	Tiempo de uso (h)
Ahorrador	22.901	4.93
Incandescente	6.107	4.93

Tabla 5.26 Distribución de la energía producida para el servicio gas (calor)

Servicio de gas (calor)	
Equipo	Tiempo de uso (h)
Boiler o estufa	6.518

Es decir que con 0.00813 GJ es posible encender casi 23 focos ahorradores simultáneamente y dejarlos prendidos casi 5 horas seguidas cada uno, mientras que con focos incandescentes solo sería 6 focos.

Por otra parte con 0.00813 GJ es posible encender la estufa o el boiler por poco más de seis horas y media de manera seguida.

CONCLUSIONES

Al observar el aumento de volumen de los sistemas de biodigestión, se comprobó que es posible generar biogás a partir de residuos de chayote, y que el volumen de producción de biogás dependerá de las propiedades de la materia prima (fase, relación agua y sólidos totales) y de la temperatura a la que es realizada la digestión anaerobia. Con la experimentación realizada a temperatura ambiente se encontraron las relaciones de sólidos de chayote y agua que favorecieron la generación de biogás, encontrándose adecuado para las muestras de chayote fresco picado en agua un % m/m de chayote de 28.125 %, para chayote seco picado en agua un % m/m de chayote de 56.25 % y para chayote fresco molido en agua un % m/m de chayote de 22.5 %, este último mencionado fue el que tuvo mayor volumen de producción a temperatura ambiente. Posteriormente al realizar la experimentación a diferentes temperaturas y manteniendo constantes las relaciones de sólidos totales y agua para cada caso, se encontró que en los recipientes con muestras de chayote seco picado se favorecía la generación de biogás en el intervalo de 22 a 43 °C, lo que se conoce como digestión mesófila, mientras que en los recipientes con muestras de chayote fresco (picado y molido) se favorecía la generación de biogás en el intervalo de 52 a 58 °C, lo que se conoce como digestión termófila, además se observó que los recipientes con muestras de chayote fresco molido gasificaban en menor tiempo que las demás.

Con el análisis hecho en el capítulo V se observó que es posible suministrar parcialmente de energía a los hogares con sus residuos generados, además se observó el gran potencial de producción de biogás que tienen el estiércol y los residuos de las cocinas, sin embargo en los hogares no se disponen de cantidades suficientes de residuos para abastecerse totalmente de energía, pero puede aprovecharse en granjas, establos y comedores en los que se producen grandes cantidades de residuos orgánicos.

Finalmente, además de lo mencionado en el párrafo anterior, debemos remarcar los diversos beneficios en el ámbito social, económico y ambiental del uso del biogás producido mediante digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos y otros tipos de biomasa, entre ellos tenemos: El carácter renovable de la biomasa, que de esta manera se pueden abastecer las necesidades de autosuficiencia energética, se obtiene un ahorro económico y el dinero empleado en la compra de combustibles fósiles puede emplearse en otros gastos, que el biogás tiene un menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles, que se pueden generar empleos y activar la economía en zonas rurales, se transforman materiales residuales en productos con valor agregado, etc.

BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials [ASTM]. (1987). *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.

Argentina. Secretaría de Energía. (2008). *Energía Biomasa*. Recuperado el 8 de mayo de 2017, de http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_biomasa.pdf

Averill, B. A. & Eldredge, P. (s. f.). *Energy Changes in Chemical Reactions*. Recuperado el 4 de agosto de 2017, de <https://2012books.lardbucket.org/pdfs/principles-of-general-chemistry-v1.0/s09-energy-changes-in-chemical-rea.pdf>

Brown, T. L., LeMay, H. E. y Bursten, B. E. (2004). *Química: la ciencia central*. México: Pearson Educación.

Bullock, J. y Kristiansen, B. (1987). *Biotecnología básica*. España: Acribia.

Cabrera, M., Vera A., Cornejo, J. M., Ordás, I., Tolosana, E., Ambrosio, Y.,... Garraza, J. Á. (2011). *Evaluación del potencial de energía de la biomasa*. Recuperado el 25 de abril de 2017, de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e14_biomasa_A_8d51bf1c.pdf

Carta, J. A., Calero, R., Colmenar, A., y Castro, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: Pearson.

Chang, R. (2010). *Química*. México: McGraw-Hill.

Clark, J. H. & Deswarte, F. E. (2015). *Introduction to chemicals from biomass*. Chichester, West Sussex: Wiley.

Dominguez, J. A. (1995). *Energías alternativas*. Madrid: Equipo Sirius.

Encyclopedia.com. (2016). *Berthelot, Pierre Eugène Marcellin*. Recuperado el 6 de agosto de 2017, de <http://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/chemistry-biographies/pierre-eugene-marcellin-berthelot>

Equipos y Laboratorio de Colombia. (2015). *¿Que es la bomba calorimétrica?*. Recuperado el 2 de agosto de 2017, de <http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/>

España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE]. (2007). *Energía de la biomasa*. Recuperado el 2 de junio de 2017, de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_b954457c.pdf

Fernández, J. M. (2009). *Tecnología de las energías renovables*. Madrid: Mundi Prensas.

Flores, Á. E. (2006). *El cambio tecnológico en los sistemas energéticos*. Recuperado el 20 de marzo de 2017, de https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjehuqPgN_TAhUs7IMKHdt2DeoQFggiMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.oei.es%2Fhistorico%2Fmemoriasctsi%2Fmesa6%2Fm06p31.pdf&usq=AFQjCNEJJb_wMgluD6htsbNhZNaZFPxifw

Franco, A. y Velázquez, M. (2014). Una aproximación sociodemográfica al consumo de energía en los hogares mexicanos, 2014. Recuperado el 2 de octubre de 2017, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232092/07_Franco_Velazquez.pdf

Gil, G. (2008). *Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas*. Madrid: Mundi Prensas.

IKA. (s. f.). *Analytical Technology*. Recuperado de https://www.ika-apparatuur.nl/media/productfile/dijkstravereenigde_analytische_informatie_ika.pdf

INEGI. (2015). *Panorama sociodemográfico de México 2015*. Recuperado el 26 de septiembre de 2017, de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825078065>

Li Y., Zhang R., Liu G., Chen, C., He Y. & Liu X. (2013). *Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates*. Recuperado el 27 de mayo de 2017, de <http://angenent.bee.cornell.edu/research/F-BMP-organic%20wastes-Labatut%202011.pdf>

Madrid, A. (2009). *Energías renovables: fundamentos, tecnologías y aplicaciones: solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidráulica, pilas de combustible, cogeneración y fusión nuclear*. Madrid: Mundi Prensas.

México. Secretaría de Energía [SENER]. (2017). *Sistema de Información Energética*. Recuperado el 29 de septiembre de 2017, de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>

México. SENER. (2010). *Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo (2010-2025)*. Recuperado el 1 de octubre de 2017, de http://www.cie.unam.mx/~rbb/Lic/Documentos_SENER/GAS_LP.pdf

Moran, M. J. & Shapiro, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. España: Reverte.

Moreno, J. C. y Giraldo, L. (s. f.). *Calorimetría: una herramienta técnica para la evaluación de procesos biológicos y médicos*. Recuperado el 27 de junio de 2017, de <http://hipotesis.uniandes.edu.co/hipotesis/images/stories/ed02pdf/Calorimetria.pdf>

Museo del IES Canarias Cabrera Pinto. (2012). *Calorímetro de Lavoisier-Laplace*. Recuperado de <http://www.museocabrerapinto.es/blascabrera/museo-virtual/energia-y-calorimetria/calorimetro-de-lavoisier-laplace>

Museo Virtual de la Historia de la Educación [MUVHE]. (2009). *Calorímetro de Lavoisier y Laplace*. Recuperado de http://www.um.es/muvhe/user/ver_fichas.php?id=44&id_categoria=471

Parr Instrument Company. (2006). *Calorimeter Applications*. Recuperado el 30 de junio de 2017, de http://www.siamzim.com/pdf/calorimeters/TN_104.pdf

Portillo, G. (2017). *Todo lo que debes de saber sobre la bioenergía o energía de la biomasa*. Recuperado de <https://www.renovablesverdes.com/biomasa/>

Química Suiza Industrial [QSI]. *Calorímetros IKA C 6000: Diseño, Tecnología y Automatización*. Recuperado de <http://www.qsindustrial.biz/en/experiencias/venezuela/calorimetros-ika-c-6000-diseno-tecnologia-y-automatizacion>

Rex, A. F. y Wolfson, R. (2011). *Fundamentos de física*. España: Pearson.

Ribeiro, M. D. (s. f.). *Técnicas Calorimétricas*. Recuperado el 6 de agosto de 2017, de <http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/577/article/3000639/pdf>

Rodríguez, J., González, L. O., Rojas, A. F. y Palacios, J. A. (2013) *Energía y Ambiente*. Santiago de Cali: Universidad Nacional, Sede Palmira

Sarge, S. M., Höhne, G. W., & Hemminger W. (2014). *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*. Alemania: Wiley-VCH.

Saura, F. (s. f.). *Biomasa y agroenergía*. Recuperado el 24 de abril 2017, de http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/maina/index/assoc/Maina_19/81v4p012.dir/Maina_1981v4p012.pdf

SEMARNAT. (2012). *Informe De La Situación Del Medio Ambiente En México*. Recuperado el 1 de octubre de 2017, de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/00_intros/pdf.html

Smith, T. M. y Smith, R. L. (2007). *Ecología*. Madrid: Pearson Educación.

Strezov, V. & Evans, T. (2015). *Biomass processing technologies*. Boca Raton: CRC Press.

Thieman, W. J. y Palladino M. A. (2010). *Introducción a la biotecnología*. Inglaterra: Pearson.

tuimpacto.org. (2014). *¿Cuáles son las principales fuentes emisoras de gas metano?* Recuperado de <http://www.tuimpacto.org/origen-del-metano.php>

Varnero, M. T. (2011). *Manual del biogás*. Recuperado el 1 de marzo de 2017, de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Wall, J. et al. (2008). *Bioenergy*. Recuperado el 5 de octubre de 2017, de http://biogas.ifas.ufl.edu/Publs/Bioenergy_CH16_ASM_Press_2008.pdf

Wauquier, J. –P. (2004). *El refino del petróleo: petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación*. Madrid: Díaz de Santos.