	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(100)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	CRISTIAN SNEYDER GÓMEZ LÓPEZ RONY ALEJANDRO ÁNGEL ECHAVEZ		
FACULTAD	DE CIENCIAS AGRARIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA AMBIENTAL		
DIRECTOR	EIMER AMAYA AMAYA		
TÍTULO DE LA TESIS	DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DE LOS LIXIVIADOS DEL PROYECTO BOVINO DE LA GRANJA DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER SECCIONAL OCAÑA		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>EL PRESENTE TRABAJO DE GRADO CONTIENE EL ESTUDIO, DISEÑO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA GENERACION DE BIOGAS, APROVECHANDO LOS RESIDUOS ORGANICOS GENERADOS POR EL PROYECTO BOVINO DE LA GRANJA DE LA U.F.P.S.O, EN DONDE SE ESTIMO LA CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGANICOS PARA GENERAR ENERGIA RENOVABLE A TRAVES DEL BIOGAS, ADEMAS DEL APROVECHAMIENTO DEL BIOABONO, GENERADO POR ESTE PROCESO, QUE FUNCIONA COMO FERTILIZANTE. EN PROMEDIO LA PRODUCCION DEL SISTEMA FUE DE 0.034 M³ DE BIOGAS POR KILOGRAMO DE RESIDUO ORGANICO APROVECHADO, ADEMAS DENTRO DEL PROYECTO, SE ESTIMO LAS CANTIDADES TOTALES DE BIOGAS Y BIOABONO GENERADO, SI SE APROVECHA AL MAXIMO TODOS LOS RESIDUOS GENERADOS POR LA GRANJA DEL PROYECTO BOVINO</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 100	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 35	CD-ROM: 1



**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA
GENERACIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DE LOS LIXIVIADOS DEL
PROYECTO BOVINO DE LA GRANJA DE LA UNIVERSIDAD
FRANCISCO DE PAULA SANTANDER SECCIONAL OCAÑA**

**CRISTIAN SNEYDER GÓMEZ LÓPEZ
RONY ALEJANDRO ÁNGEL ECHAVEZ**

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director

I.A. Esp. Eimer Amaya Amaya

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL**

Ocaña, Colombia

Septiembre de 2020

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de investigación a Dios porque ha estado con nosotros en cada paso que dimos, cuidándonos y dándonos fortaleza para continuar; a nuestros padres, quienes a lo largo de nuestra vida han velado por nuestro bienestar y educación, siendo apoyo incondicional en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se nos presenta, sin dudar ni un solo momento en nuestra inteligencia y capacidad. Es por ello que somos lo que hoy en día hemos demostrado.

Cristian Sneyder Gómez López

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

Principalmente a mis padres Víctor julio Ángel ropero y Yamile Echavez quienes con su esfuerzo y amor hicieron posible cumplir hoy un sueño más, por inspirarme de valentía, disciplina, esfuerzo y responsabilidad para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A todos los profesores que en todo este tiempo me apoyaron y me dieron las bases para mi formación como profesional, pues sin sus conocimientos nada de esto fuera posible hoy.

Por ultimo dedicarles este título tan importante a mis amigos, compañeros que me acompañaron en esta etapa aportando a mi formación tanto profesional como ser humano.

Rony Alejandro Ángel Echavez

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de los que formamos parte de este grupo de trabajo. Por esto agradecemos a nuestro director, el ingeniero especialista Eimer Amaya Amaya, al grupo que conformamos para la ejecución de este trabajo de grado, quienes a lo largo de este tiempo hemos puesto a prueba las capacidades y conocimientos en el desarrollo de esta investigación la cual ha finalizado llenando todas nuestras expectativas y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

Cristian Sneyder Gómez López

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradecer a Dios, a mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y por haberme apoyado durante todo este tiempo. A la universidad por haber ofrecido su campus para nuestro proceso formativo. De manera muy especial a nuestro director de tesis el ingeniero especialista Eimer Amaya Amaya, quien estuvo con nosotros a lo largo del desarrollo de nuestro proyecto de grado.

A mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente.

Rony Alejandro Ángel Echavez

Índice

Capítulo 1: Diseño e implementación de un sistema piloto para la generación de biogás a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander seccional Ocaña.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación	3
1.5 Delimitaciones.....	5
1.5.1 Delimitación Operativa	5
1.5.2 Delimitación Conceptual.....	6
1.5.3 Geográfica	6
1.5.4 Temporal.	6
 Capítulo 2: Marco Referencial	 7
2.1 Marco Histórico.....	7
2.2 Marco conceptual.	9
2.2.1 El biogás.....	9
2.2.2 Materiales orgánicos	9
2.2.3 Los lixiviados	9
2.2.4 Biodigestor	10
2.2.4 Digestión aeróbica	10
2.2.5 Digestión anaeróbica.....	10
2.2.6 Biogás	11
2.2.7 Bioabono	11
2.2.8 Biofertilizante	12
2.2.9 Lodos de digestión anaeróbica	12
2.2.10 Efluentes del biodigestor.....	12
2.2.11 Reactor	13
2.3 Marco teórico.	14
2.3.1 Lixiviados, composición y generación	14
2.3.2 Procesos de biodigestión.....	16

2.3.3 Respiración anaeróbica.	20
2.3.4 Fundamentos de la fermentación metanogénica.....	21
2.3.6 Tipos de biodigestores.	27
2.3.7 Componentes de un digestor anaeróbico	31
2.3.5 Biodigestores.....	38
2.4 Marco legal.	39
2.4.1 Ley 23 del 12 de diciembre de 1973.....	39
2.4.2 Decreto 2811 de Diciembre 18 de 1974	39
2.4.3. LEY 9 de Enero 24 de 1979	39
2.4.4 Decreto 1594 de Junio 26 de 1984	39
2.4.5 Ley 99 de Diciembre 22 de 1993.....	39
Capítulo 3: Diseño metodológico	40
3.1 Tipo de Investigación	40
3.3 Muestra	42
3.2 Población	43
3.3. Recolección de la información.....	44
3.4 Análisis y procedimientos de datos	44
Capítulo 4: Desarrollo del proyecto.....	45
4.1 Diseñar un sistema piloto para la generación de biogás, a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.	48
4.1.1 Diseño del sistema piloto del biodigestor.	52
4.2 Construir el sistema piloto para la generación de biogás y recolección del lixiviado por medio de biodigestores en base a criterios de índole ambiental y técnica.	60
4.3 Determinar la cantidad de biogás y de abono que se produce dentro del biodigestor seleccionado para su aprovechamiento en la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.	68
4.3.1. Determinación de la cantidad de Biogás. Antes de iniciar la producción se debe	68
4.3.2 Determinación de la cantidad de Biogabono.....	80
Capítulo 5. Conclusiones.....	85
Capítulo 6. Recomendaciones	86
Referencias	87

Lista de tablas

Tabla 1. Estimación de la cantidad de residuos sólidos generados por el proyecto bovino.....	43
Tabla 2. Total de residuos orgánicos generados en la granja del proyecto bovino.....	51
Tabla 3. Proporción de mezcla para digestor	52
Tabla 4. Tiempos de Retención en Rango Mesofílico	53
Tabla 5. Clasificación de la producción de biogás.....	55
Tabla 6. Materiales utilizados para la construcción del prototipo del sistema.....	62
Tabla 7. Registro de la producción del Biogás del sistema piloto	74
Tabla 8. Producción del Biogás del sistema piloto (08-08-2020-14-08-2020).....	76
Tabla 9. Registro de la producción del Biogás del sistema piloto (17-08-2020-22-08-2020).....	78

Lista de figuras

Figura 1. Fermentación anaeróbica de glucosa en etanol.	19
Figura 2. Respiración anaeróbica de la glucosa.	21
Figura 3. Esquema de las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica.	23
Figura 4. Biodigestor tipo Chino.....	29
Figura 5. Biodigestor tipo hindú.	31
Figura 6. Fases a desarrollar para la ejecución del proyecto.....	41
Figura 7. Proyecto Bovino de la granja UFPSO.	50
Figura 8. Recolección de materia orgánica.	50
Figura 9. Recolección de materia orgánica.	51
Figura 10. Medidas de tambor industrial de 120 litros.	56
Figura 11. Distribución del tanque para el prototipo del digestor.....	58
Figura 12. Esquema del prototipo del digestor. Fuente: Pascalino y Acosta. Biogás: una alternativa energética a partir de los residuos orgánicos. 2012.	60
Figura 13. Prototipo del sistema a construir.	61
Figura 14. Materiales para el prototipo del sistema.	63
Figura 15. Desarrollo de la tubería de descarga del digestor.	64
Figura 16. Instalación de la tubería de descarga del digestor.	64
Figura 17. Sellado con producto especial en conducto de gas.	65
Figura 18. Instalación de la tubería de descarga del digestor.	66
Figura 19. Instalación de la manguera de salida de gas.	66
Figura 20. Acople entre digestor, neumático de almacenamiento y quemador.	67
Figura 21. Carga y mezclado de residuos orgánicos en el sistema	69

Figura 22. Prototipo del sistema cargado de acuerdo a las condiciones iniciales del proyecto.	70
Figura 23. Neumático de almacenamiento a capacidad	72
Figura 24. Prueba de quemado del biogas	73
Figura 25. Regulador de salida de gas.	73
Figura 26. Quemado inicial de de Biogas.	75
Figura 27. Quemado final de de Biogas.	75
Figura 28. Producción de biogas en primera semana (08-08-2020-14-08-2020)	77
Figura 28. Duración del gasto de biogas en primera semana (08-08-2020-14-08-2020)	77
Figura 30. Duración del gasto de biogas en segunda semana (17-08-2020-22-08-2020).....	78
Figura 31. Duración del gasto de biogas en en segunda semana (17-08-2020-22-08-2020).....	79
Figura 32. Pesaje de los residuos del digestor o Bioabono.	81
Figura 33. Producción de Biogas y Bioabono. Manual del Biogas. FAO, 2011.	81
Figura 34. Prototipo del digestor luego de la producción.	82
Figura 35. Aprovechamiento del bioabono, Area de impacto (4.25 m ²)	83

Capítulo 1: Diseño e implementación de un sistema piloto para la generación de biogás a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña

1.1 Planteamiento del problema

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (ONU, 2005). Debido al constante crecimiento de la población humana, los países en desarrollo enfrentan el reto de incrementar la producción de alimento para satisfacer una creciente demanda, sin embargo esto trae como consecuencia acumulación de desechos sólidos y líquidos que pueden causar degradación del suelo y contaminación de las fuentes hídricas si no son manejados adecuadamente.

Paralelamente en muchas zonas rurales del mundo se emplean tradicionalmente fuentes de energía como la leña, lo cual contribuye a la deforestación y otros problemas sociales, surge entonces la necesidad de emplear alternativas más amigables con el ambiente.

Dentro de la granja de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña se desarrollan actividades que están relacionadas con la crianza y la producción animal (ganado bovino) dicha actividad hace que se genere una cantidad considerable de residuos sólidos y líquidos (lixiviados), al no tener un uso adecuado ni una gestión de residuos sólidos integra, generan una contaminación debido al mal uso que se le da, ya que la gran mayoría de los

residuos llegan a los cultivos, se vierten al suelo, filtrándose hasta las aguas subterráneas, y en últimas a fuentes hídricas.

La libre disposición de estiércol de ganado en el campo o su tratamiento inadecuado lo convierte en una fuente de contaminación ambiental y en un foco infeccioso para seres humanos, puesto que propicia el desarrollo de vectores de enfermedades (Liriano, 2005). La aplicación del estiércol fresco o seco como fertilizante no es bueno para la agricultura, porque se debe descomponer primero antes que las plantas lo aprovechen; además, esta práctica no es recomendable por el peligro de contaminación que puede significar la infiltración de materia orgánica sin digerir para el manto freático o los cursos de agua (Vásquez et ál., 1997).

Teniendo presente que la granja de la universidad cuenta con una cantidad considerable de ganado que genera gran contaminación por residuos sólidos orgánicos, es necesario llevar un control y un aprovechamiento para lograr una gestión integral de residuos sólidos que en el presente proyecto se aborda a través de la implantación de un biodigestor para transformar esos residuos en energías ambientalmente sostenible.

1.2 Formulación del problema

¿El diseño de un biodigestor para el control y tratamiento del estiércol del ganado bovino de la granja de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, podrá minimizar el impacto ambiental y proporcionara una fuente energética renovable?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General. Implementar un sistema piloto para la generación de biogás a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.

1.3.2 Objetivos Específicos. Diseñar un sistema piloto para la generación de biogás, a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.

Construir el sistema piloto para la generación de biogás y recolección del lixiviado por medio de biodigestores en base a criterios de índole ambiental y técnica.

Determinar la cantidad de biogás y de abono que se produce dentro del biodigestor seleccionado para su aprovechamiento en la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.

1.4 Justificación

El biogás, como fuente de energía renovable, ha despertado un gran interés en los últimos años, siendo tal vez una de las tecnologías de más fácil implementación, sobre todo en sectores rurales. Su potencial desarrollo, no solo considerando la producción de biogás, sino que como ayuda a la obtención de biofertilizante y tratamiento de problemas sanitarios en algunos casos,

hacen que replicabilidad y difusión en los sectores con abundancia de materia orgánica de desecho sea atractivo. (FAO, 2011)

En la actualidad, el biogás se utiliza en todo el mundo como una fuente de combustible tanto a nivel industrial como doméstico. Su explotación ha contribuido a impulsar el desarrollo económico sostenido y ha proporcionado una fuente energética renovable alternativa al carbón y el petróleo.

Este tipo de energía está principalmente orientado a suplir necesidades y generar oportunidades, siendo principalmente, granjas de pequeña escala y las comunidades rurales, los más indicados para utilizar eficientemente los recursos locales, y reciclar los desechos generados en sus procesos, en donde cabría incluir la granja y el proyecto bovino de la Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña.

Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, se genera el biogás, el cual, está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir energía gaseosa (biogás). FAO, 2011.

Estos desechos, compuestos por los residuos generados por el proyecto bovino de la universidad tienen como característica que en su proceso de biodegradación natural, mediante

microorganismos, se fermentan generando gas metano (CH₄) que al contenerlo y aprovecharlo adecuadamente se utiliza para proporcionar energía renovable limpia. (Rodríguez, L. 2014)

El biogás generado por este medio tiene los mismos usos que el gas metano de origen fósil, puede utilizarse para combustión directa en procesos de cocción y calefacción, como combustible de transporte, iluminación, y producción de electricidad.

Teniendo estos antecedentes, este proyecto se justifica al aprovechar la gran cantidad de residuos que genera la granja y transformarla en energías limpias (biogás) , para con esto poder llegar a darle una solución o un manejo adecuado mediante el proceso que llevaremos a cabo durante el periodo de desarrollo en este proyecto. Con el fin de implementar nuevas prácticas con la ayuda del biodigestor.

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación Operativa: Para realizar Diseño de un sistema para la generación de biogás a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander seccional Ocaña, es indispensable conocer la cantidad de residuos sólidos orgánicos que se generan en la granja, de igual forma es necesario conocer sobre tipos de biodigestores y cada uno de los sistemas que componen a los mismos. Por otro lado se deben establecer la legislatura ambiental que contempla el diseño, construcción y uso de este tipo de sistemas. Para la operatividad de este proyecto se deben tener competencias específicas en ingeniería de campo, toma de datos y criterio ambiental fundamentado en la legislación nacional

1.5.2 Delimitación Conceptual. Para poder desarrollar el proyecto a cabalidad es determinante manejar conceptos como: Residuos sólidos orgánicos, biodigestores, gas metano, biogás, biodegradación, digestión anaerobia, digestión aerobia, gestión de los residuos, efluentes de biodigestor entre otros.

1.5.3 Geográfica. La ejecución del proyecto será realizado en el proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, que se encuentra ubicada en el sector nororiental del país, con coordenadas geográficas de 8°14'5,53" N 73°19'16,76" O

1.5.4 Temporal. Se tiene estimado desarrollar el proyecto en un total de 4 meses, teniendo como fecha de inicio el día de la aprobación de la propuesta del presente trabajo de grado por parte del comité académico.

Capítulo 2: Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

Cuando a finales del siglo XVIII el físico italiano Alessandro Volta identificó por primera vez el metano (CH₄) como el gas inflamable en las burbujas que emergían de los pantanos, no se pudo imaginar la importancia que este gas podría llegar a tener para la sociedad humana en los siglos venideros.

El metano alcanzó una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Con el fin de la guerra y la fácil disponibilidad de combustibles fósiles, la mayoría de las instalaciones fueron cesando en su funcionamiento. Sin embargo, en India, a comienzos de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble propósito del aprovechamiento energético y la obtención de un biofertilizante. En China, a inicios de la década de los 70, se ha fomentado la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional.

En los países industrializados la historia de la tecnología de biodigestión ha sido diferente y el desarrollo ha respondido más bien a motivaciones medioambientales que puramente energéticas, constituyendo un método clásico de estabilización de lodos activos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias. Durante la década de los ochenta, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales. Sin embargo, con la disminución de los precios del petróleo, a finales de los

años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaeróbica volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaeróbicas a escala industrial y doméstica. En la actualidad, el biogás se utiliza en todo el mundo como una fuente de combustible tanto a nivel industrial como doméstico. Su explotación ha contribuido a impulsar el desarrollo económico sostenido y ha proporcionado una fuente energética renovable alternativa al carbón y el petróleo. (FAO, 2011)

La actividad agropecuaria y el manejo adecuado de residuos rurales pueden contribuir significativamente a la producción y conversión de residuos animales y vegetales (biomasa) en distintas formas de energía. Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, se genera el biogás, el cual, está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabonos) y al mismo tiempo, producir energía gaseosa (biogás).

Desde una perspectiva de los países desarrollados y en desarrollo, la biotecnología anaeróbica contribuye a cumplir tres necesidades básicas: a) Mejorar las condiciones sanitarias mediante el control de la contaminación; b) generación de energías renovables para actividades domésticas; y c) suministrar materiales estabilizados (bioabonos) como un biofertilizante para los cultivos. Por lo tanto, la biotecnología anaeróbica juega un importante papel en el control de la contaminación y para la obtención de valiosos recursos: energía y productos con valor agregado. (FAO, 2011)

2.2 Marco conceptual.

A continuación, se definen los conceptos necesarios para el desarrollo del presente trabajo de grado y que son indispensables en la investigación.

2.2.1 El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. (FAO, 2011)

2.2.2 Materiales orgánicos: Las actividades pecuarias y agrícolas, producen Materiales orgánicos que pueden ser tratados mediante el proceso anaeróbico [Acevedo 2006], los materiales orgánicos de origen animal también pueden emplearse como sustrato para la obtención de biogás y bioabono. Olaya, Y. & González, L. (2009)

2.2.3 Los lixiviados: son líquidos oscuros que se producen por la descomposición de la materia orgánica y el agua que entra al relleno por la precipitación, los cuales al fluir, disuelven sustancias y arrastran partículas contenidas en los residuos. La composición de los lixiviados varía mucho de acuerdo con el tipo de residuos, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química y otras condiciones del lugar, pero todos coinciden en poseer una alta carga orgánica. (Corena, M. 2008)

2.2.4 Biodigestor. El biodigestor o reactor de biodigestión, según Rodrigo, Cañellas, Meneses, Castells y Solé (2008) es “un dispositivo que permite desarrollar de forma controlada el proceso de descomposición de la materia prima, de esta forma el gas producido queda confinado en su interior hasta que es liberado para su uso” (pág. 32), permitiendo almacenar el biogás, si es necesario purificarlo, y utilizarlo. Los recursos empleados como materia prima para la generación del biogás pueden ser cultivos energéticos; o materiales residuales restantes de la actividad agrícola. El dispositivo que se utiliza para confinar y almacenar la energía producida, de forma que podamos emplearla luego se denomina biodigestor o reactor de biodigestión, el cual permite desarrollar de forma controlada el proceso de descomposición anaerobia, hasta que el gas es liberado para su uso.

2.2.4 Digestión aeróbica La digestión aeróbica consiste en procesos realizados 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. La digestión aeróbica es un proceso mediante el cual los lodos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la auto oxidación de la materia celular. (FAO, 2011)

2.2.5 Digestión anaeróbica La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente

inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. (FAO, 2011)

2.2.6 Biogás. El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. (FAO, 2011)

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como el estiércol y las basuras orgánicas. La composición química del biogás indica que el componente más abundante es el metano (CH_4); este es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero. La mezcla de CH_4 con el aire es combustible y arde con llama azul. (Pérez, J., 2010)

2.2.7 Bioabono Las características del bioabono, dependen en gran medida del tipo de tecnología y de las materias primas utilizadas para la digestión. Durante el proceso anaeróbico, parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor al de las materias primas. Gran parte de la materia orgánica de este producto

se ha mineralizado, por lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico. (FAO, 2011)

2.2.8 Biofertilizante. Se define por su aporte de elementos minerales, especialmente nitrógeno. Como subproducto después de la generación de biogás, se obtiene materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales. En función a la carga usada y el proceso seguido, esta materia orgánica, también conocida como bioabono puede presentarse de dos formas: líquida y sólida. (FAO, 2011)

2.2.9 Lodos de digestión anaeróbica. Cada seis o doce meses es aconsejable descargar totalmente el biodigestor continuo, para una adecuada mantención. Esto permite retirar del fondo del biodigestor los lodos de digestión, material sólido pastoso, con un elevado contenido de agua, constituido por fracciones de materia orgánica estabilizada, nutrientes totales y disponibles, sales solubles, con valores de pH cercanos a la neutralidad, además enriquecido en inóculos microbianos metanogénicos. (FAO, 2011)

2.2.10 Efluentes del biodigestor. En un biodigestor de carga continua, la determinación del Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), permite definir el volumen de afluente o material de carga diaria, que tendrá el digester durante toda su etapa de trabajo. Esta carga diaria de afluente, como máximo tiene un 8% de sólidos totales (ST). La entrada de este afluente, genera un volumen equivalente de efluente o material de descarga, que por lo general presenta alrededor de un 2% de ST.; además de una proporción de nutrientes y fuentes carbonadas disueltas. (FAO,2011)

2.2.11 Reactor. El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos. El suelo del reactor está inclinado, para que la arena, el material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de HDPE, concreto hasta acero inoxidable. (FAO,2011)

2.3 Marco teórico.

2.3.1 Lixiviados, composición y generación Los lixiviados son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de composición. El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante generado en un relleno.

2.3.1.1 Composición de Lixiviados: Los lixiviados en el relleno arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que provoca que tengan elevadas cargas orgánicas y un color que varía desde café-pardo-grisáceo cuando están frescos hasta un color negro viscoso cuando envejecen. Se reportan concentraciones tan elevadas como 60,000 mg/l de DQO. Los lixiviados también poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) y de metales pesados. Varios estudios indican que el carbono orgánico en forma coloidal tiene el potencial de adsorber altas concentraciones de metales en su superficie, por lo que actúan como transporte de metales traza en los lixiviados. (Corena, M. 2008)

2.3.1.2 Generación de Lixiviados: Al depositarse los residuos en los rellenos, éstos comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos complejos. Los productos principales de la descomposición son los líquidos lixiviados. Los líquidos pueden afectar la salud de las poblaciones de los alrededores. Los líquidos lixiviados se forman mediante el percolado de líquidos (como por ejemplo, agua de lluvia) a través de sustancias en proceso de descomposición. El líquido, al fluir, disuelve algunas sustancias y arrastra partículas con otros compuestos químicos. Los ácidos orgánicos formados en ciertas etapas de la descomposición

contenidos en el lixiviado (como ácido acético, láctico o fórmico) disuelven los metales contenidos en los residuos, transportándolos con el lixiviado. (Corena, M. 2008)

Para determinar la generación de lixiviados, debe tomarse en cuenta los factores climatológicos, así como las características de los residuos, las características del material de cobertura, las características del cerramiento final y el mantenimiento a largo plazo del relleno. Debe hacerse un análisis de escenarios de trabajo para las diferentes características mencionadas, incluyendo operaciones adecuadas e inadecuadas del sistema.

De manera específica debe tenerse en cuenta las infiltraciones de aguas lluvias, de escorrentía y de nivel freático al relleno. El modelo a utilizar para la generación de lixiviados debe igualmente considerar la generación de éstos por efectos de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en el relleno.

Deben igualmente verificarse las capacidades de drenaje del sistema para garantizar que el lixiviado producido se pueda evacuar. (Corena, M. 2008)

Cambios en el lixiviado durante el proceso de formación. Los cambios que se producen en la calidad del lixiviado durante el proceso de estabilización son usados para interpretaciones didácticas y operacionales de la descripción de las fases de estabilización. La fase de ajuste inicial, transición, formación de ácidos, fermentación metánica y maduración final es identificada y descrita en términos de parámetros físicos, químicos y biológicos que se reportan comúnmente en la literatura. La composición química de los lixiviados variará mucho

según la antigüedad del relleno sanitario y la historia previa al momento del muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altos. Por otro lado si se recoge una muestra durante la fase de fermentación del metano el pH estará en el rango de 6.5 a 7.5 y los valores de concentración de DBO₅, COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. (Corena, M. 2008)

2.3.2 Procesos de biodigestión. El correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos.

La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos.

2.3.2.1 Digestión aeróbica. La digestión aeróbica consiste en procesos realizados 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. Al comienzo, el proceso de digestión aeróbica tuvo escasa aceptación, debido a que se desconocían sus principios fundamentales, además de que encarecían los costos del tratamiento por la cantidad adicional de energía necesaria para el suministro de aire al proceso. En contraste, los procesos de digestión anaeróbica permiten utilizar el metano generado como fuente de energía. La principal ventaja del proceso aeróbico es la simplificación en las operaciones de disposición de los lodos comparada con la relativa complejidad operativa del proceso de digestión anaeróbica.

La digestión aeróbica es un proceso mediante el cual los lodos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular.

En las primeras fases del proceso de digestión aeróbica, cuando una población de microorganismos se pone en contacto con una fuente ilimitada de sustrato, los microorganismos se reproducen con una tasa de crecimiento poblacional logarítmico que sólo está limitada por su propia habilidad de reproducirse. La tasa de consumo de oxígeno aumenta rápidamente debido a la absorción y asimilación de materia orgánica para la síntesis de nueva masa protoplasmática.

A medida que progresa la oxidación de la materia orgánica disponible, la tasa de crecimiento bacteriano empieza a disminuir. Las fuentes de carbono orgánico disponibles se hacen limitantes, y por consiguiente, también se presenta una disminución en la tasa de consumo de oxígeno. Cuando la cantidad de materia orgánica disponible es apenas suficiente para

garantizar la subsistencia de las distintas especies de microorganismos, éstos comienzan a autooxidarse mediante su metabolismo endógeno.

La digestión aeróbica presenta diversas ventajas dentro de las cuales destacan la facilidad de operación del sistema, bajo capital de inversión comparada con la digestión anaeróbica, no genera olores molestos, reduce la cantidad de coliformes fecales y por lo tanto, de organismos patógenos, produce un sobrenadante clarificado con una baja DBO₅, con pocos sólidos y poco fósforo. El proceso presenta también sus desventajas, entre las que se suele mencionar los altos costos de operación causados por los altos consumos de energía, la falta de parámetros y criterios claros para el diseño y la dificultad que presentan los lodos digeridos aeróbicamente para ser separados mediante centrifugación y filtración al vacío.

2.3.2.2 Digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H₂O₂). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. En la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas

respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas.

De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo. El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación anaeróbica o respiración anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones.

Fermentación anaeróbica. En una 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. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y por lo tanto, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva.

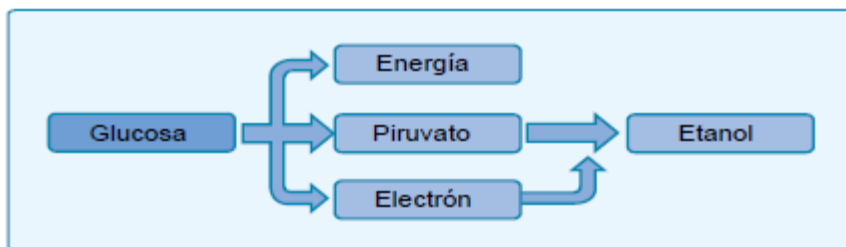


Figura 1. Fermentación anaeróbica de glucosa en etanol. FAO, 2011. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Es importante destacar que la mayor parte (dos tercios) del metano se produce mediante fermentación anaeróbica en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones. La producción de metano mediante esta vía se conoce comúnmente como metanogénesis acetotrófica. La fermentación anaeróbica se puede aplicar para la recuperación de biocombustibles (e.g. hidrógeno y butanol) y productos bioquímicos (nisina y ácido láctico).

2.3.3 Respiración anaeróbica. La respiración anaeróbica es un proceso biológico de oxido- reducción 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. La realizan exclusivamente algunos grupos de bacterias y para ello utilizan una cadena transportadora de electrones análoga a la de las mitocondria en la respiración aeróbica.[]

No debe confundirse con la fermentación, que es un proceso también anaeróbico, pero en el que no participa nada parecido a una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica. La respiración anaeróbica requiere aceptores de electrones externos para la disposición de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica (Figura 2). Los aceptores de electrones en este caso pueden ser CO_2 , SO_4 -o NO_3

La energía liberada es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica.

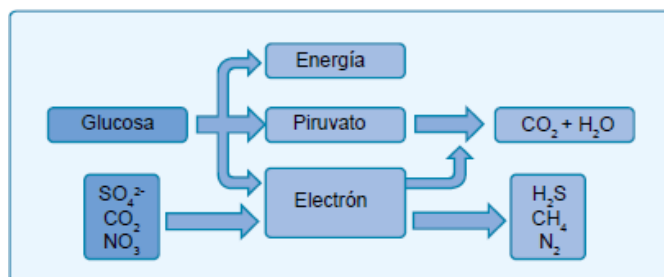


Figura 2. Respiración anaeróbica de la glucosa. FAO, 2011. Obtenido de

<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

2.3.4 Fundamentos de la fermentación metanogénica

Etapas de la fermentación metanogénica. La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los

microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H_2 y CO_2 .

En la Figura 3. Se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

Hidrólisis. La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los Microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del

nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

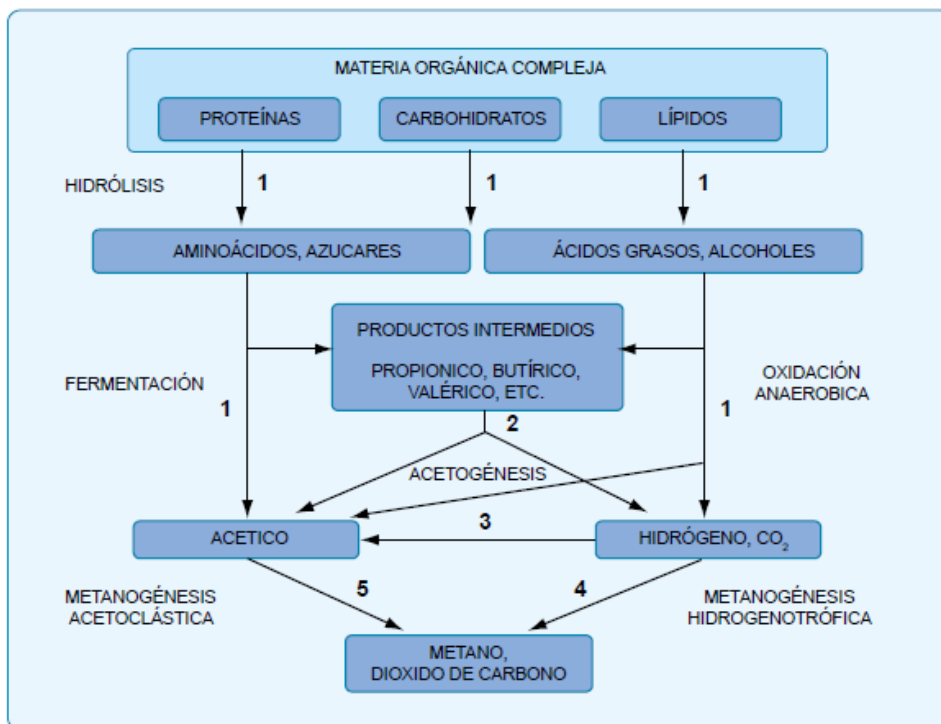


Figura 3. Esquema de las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica. FAO, 2011.

Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso. La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la

ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores.

Etapa fermentativa o acidogénica Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno

disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

Etapa acetogénica Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

Etapas metanogénica En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotrrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y

metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

2.3.6 Tipos de biodigestores. Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización. Los más sencillos caen dentro de la clasificación de digestores discontinuos o de cargas por lotes y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación. Resulta conveniente clasificarlos según su modo de operación con relación a su alimentación o carga en los siguientes tipos:

2.3.6.1 Continuos: Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales.

2.3.6.2 Semi continuos: Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del

afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor Indiano y chino.

2.3.6.3 Discontinuos o régimen estacionario: Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada.

Modelo Chino. Los digestores de este tipo son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo y se construyen totalmente enterrados (FAO, 1986). Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas compostados mezclados con lodos activos de otro digestor, a través de la cubierta superior, que es removible. Una vez cargado así, es alimentado diariamente con los residuos que se encuentren disponibles, provenientes de la letrina y de los animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digestor.

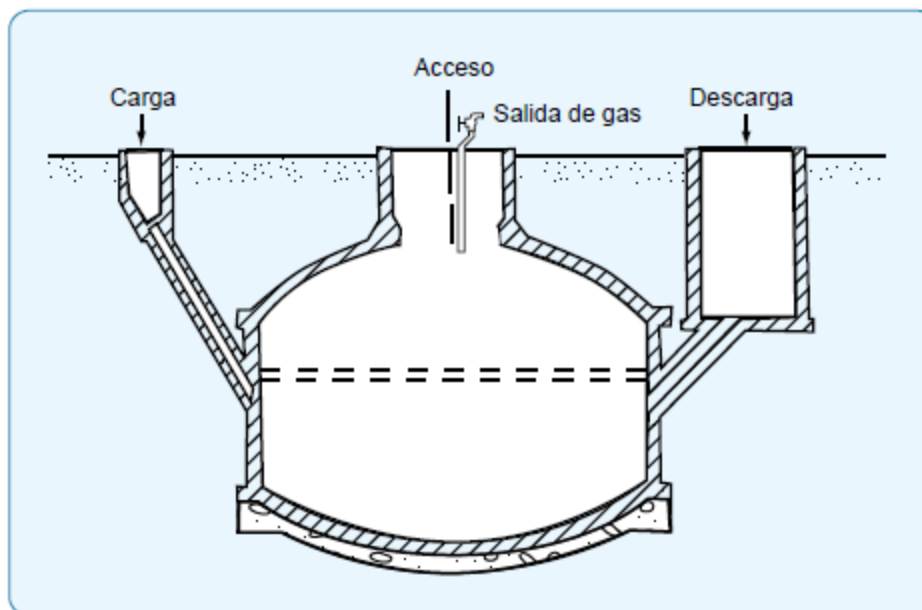


Figura 4. Biodigestor tipo Chino. FAO, 2011. Obtenido de

<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo del digestor, aumenta su presión forzando al líquido, en los tubos de entrada y salida a subir y llegándose a alcanzar presiones de hasta 100 cm de columna de agua. Se generan entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores.

Periódicamente se extrae una parte del líquido en fermentación a través del tubo de salida, mediante una cubeta y una o dos veces al año el digestor se vacía completamente aplicando el residuo (sólido) a los campos de cultivo. A pesar que el digestor chino es poco eficiente para

generar biogás, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general largos y además se tiene gran cantidad de este material cuando se necesita para mezclar con el suelo antes de la siembra. Los tiempos de retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 60 días, requiriéndose para alcanzar la misma eficiencia (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) de 1/2 a 1/3 de este tiempo de retención en los biodigestores tipo hindú.

Modelo Hindú. Estos digestores en general son enterrados y verticales, semejando a un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación (Hilbert y Eppel,2007). El gasómetro está integrado al sistema, o sea que, en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 30 cm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores.

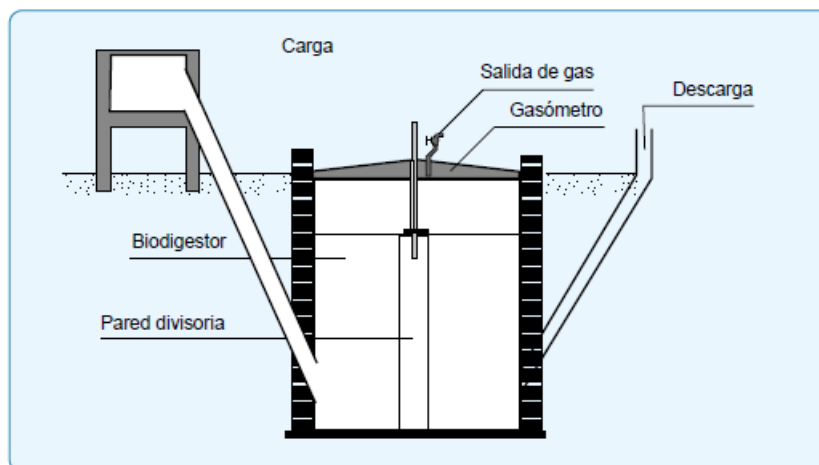


Figura 5. Biodigestor tipo hindú. FAO, 2011. Obtenido de

<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. Para aumentar la retención de la materia prima, posee un tabique central. En este caso, los materiales usados son preferentemente excretas, las que deben estar bien diluidas y mezcladas homogéneamente. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0.5 y 1,0 volumen de gas por volumen de digestor por día.

2.3.7 Componentes de un digestor anaeróbico Los principales componentes de un digestor anaeróbico lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas.

Reactor. El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos. El suelo del reactor está inclinado, para que la arena, el material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen

olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de HDPE, concreto hasta acero inoxidable.

Entrada del afluente. Normalmente, el afluente se introduce por la parte superior del digestor y el sobrenadante se extrae por el lado contrario.

Salida del efluente. En un digestor de cubierta fija puede haber de 3 a 5 tubos de sobrenadante colocados a distintos niveles, o un único tubo con válvulas a distintos niveles, para la extracción del mismo. Por regla general, se elige aquel nivel que extraiga un efluente de mejor calidad (con la menor cantidad posible de sólidos).

Extracción de lodos. Las tuberías de extracción de lodos suelen estar colocadas sobre bloques a lo largo del suelo inclinado del digestor. El lodo se extrae por el centro del reactor. Estas tuberías tienen, por lo general, 15 cm de diámetro o van equipadas con válvulas tapón para evitar obstrucciones, y se utilizan para llevar periódicamente el lodo del digestor a un sistema de evacuación de lodos.

Sistema de gas. El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia orgánica degradada, según las características del influente. El gas se compone fundamentalmente de metano y anhídrido carbónico. El contenido en metano del gas de un digestor que funcione adecuadamente variará del 65% al 70% en volumen, con una oscilación en el anhídrido carbónico del 30% al 35%. Uno o dos por ciento del gas del digestor se compone de otros gases.

Debido a la presencia de metano (60%), el gas del digestor posee un poder calorífico aproximado de 500 a 600 kilocalorías por litro. El sistema de gas lo traslada desde el digestor hasta los puntos de consumo o al quemador de gases en exceso. El sistema de gas se compone de las siguientes partes:

- Cúpula de gas.
- Válvulas de seguridad y rompedora de vacío.
- Apaga llamas.
- Válvulas térmicas.
- Separadores de sedimentos.
- Purgadores de condensado.
- Medidores de gas.
- Manómetros.
- Reguladores de presión.
- Almacenamiento del gas.
- Quemador de los gases sobrantes.

Cúpula de gas. Habitualmente, la parte superior del digestor, llamada domo o cúpula o campana de gas, se utiliza para almacenar el biogás que se genera. Esta campana de almacenamiento puede ser rígida o flotante. En algunos casos, está separada del digestor y se le llama gasómetro. En los tanques de cubierta fija, puede haber también un cierre de agua

incorporado, para proteger la estructura del tanque del exceso de presión positiva o negativa (vacío) creada por la extracción del lodo o del gas demasiado rápidamente.

Si la presión de gas sube por encima de los 30 cm de columna de agua, se escapará a través del cierre de agua hacia la atmósfera, sin levantar la cubierta. Si se extrae el lodo o se utiliza el gas con demasiada rapidez, el vacío puede pasar de los 20 cm y romper el cierre de agua, permitiendo la entrada del aire en el tanque. Sin el cierre de agua el vacío aumentaría enormemente y destrozaría el tanque.

La tubería entre el tanque de almacenaje de gas y el digestor puede también proteger a éste de las pérdidas del cierre de agua, si el paso no está cortado. Cuando se introducen líquidos en el digestor, el gas puede salir por la tubería hacia el tanque de almacenaje y cuando se extraen del digestor, el gas puede volver al tanque a través de la misma conducción.

Válvulas de seguridad y rompedora de vacío. La válvula de seguridad y la rompedora de Vacío van colocadas sobre la misma tubería, pero cada una trabaja independientemente. La válvula de seguridad consta de un plato cargado con arandelas de peso calibrado. La combinación de estos pesos junto con el peso del plato debe igualar la presión de gas de proyecto del tanque (normalmente entre 15 y 20 cm de columna de agua). Si la presión de gas en el tanque excede de este límite, la válvula se abrirá y dejará escapar gas durante un par de minutos. Ello debe ocurrir antes de que se rompa el cierre de agua. El cierre de agua se puede romper cuando la alimentación del tanque sea excesiva o cuando la extracción del gas sea demasiado lenta. La

válvula rompedora de vacío funciona de manera idéntica, excepto en que alivia las presiones negativas para evitar el colapso del tanque.

Apaga llamas. El apaga llamas típico es una caja rectangular que contiene aproximadamente de 50 a 100 placas de aluminio corrugado con agujeros taladrados. Si se ocasionara alguna llama en la tubería del gas, se enfriaría por debajo del punto de ignición al pasar a través de los deflectores, pero el gas podría seguir pasando con poca pérdida de carga.

- Para evitar explosiones deben instalarse apaga llamas:
- Entre las válvulas de seguridad y rompedora de vacío y en la cúpula del digestor.
- Después del purgador de sedimentos, en la tubería de gas del digestor.
- En el quemador de gases en el exceso.
- Delante de cada caldera, horno o llama.

Válvulas térmicas. Se trata de otro dispositivo de protección instalado cerca de una fuente de llama y cerca de la cúpula de gas. Este tipo de válvulas son redondas, con un plato de cierre unido al accionamiento, por un muelle vástago. El vástago apoya sobre un disco fusible que mantiene el plato unido. Si la llama genera el calor suficiente, el elemento fusible se funde y el muelle acciona el vástago hasta que el plato asienta, para cortar el paso del gas.

Separadores de sedimentos. Un separador de sedimentos es un recipiente de 30 a 40 cm de diámetro y 60 a 90 cm de longitud. Está situado, generalmente, en la parte superior del digestor, cerca de la cúpula de gas, y está equipado también con un deflector interior perforado, y un drenaje de condensados cerca del fondo. El gas entra por la parte superior de un lateral del

tanque, desciende, atraviesa el deflector, vuelve a subir y sale por la parte superior. La humedad del gas y todos los trozos grandes de incrustaciones quedan retenidos aquí antes de entrar en el sistema de gas.

Purgadores de condensado. El gas del digestor está bastante húmedo, y en su recorrido desde el tanque caliente hasta zonas de temperatura más bajas el agua se condensa. Esta agua debe recogerse en los puntos bajos del sistema, ya que de lo contrario impedirá que el gas circule, causando daño en algunos equipos como los compresores, e interfiriendo en la posterior utilización del gas. Estos purgadores disponen generalmente de una capacidad de un cuarto o medio litro de agua.

Medidores de gas. Los medidores de gas pueden ser de diversos tipos, como fuelles, diagramas de flujo en paralelo, molinetes y placas de orificios o presión de diferencial

Manómetros. Los manómetros se instalan en varios puntos del sistema para indicar la presión del gas en centímetros de columna de agua.

Reguladores de presión. Se instalan, generalmente, antes y después del quemador de gases en exceso. Estos reguladores suelen ser del tipo diafragma y controlan la presión en todo el sistema de gas del digestor. Normalmente se taran a 20 cm de columna de agua, ajustando la tensión del muelle sobre el diafragma. Si la presión de gas en el sistema es inferior a 20 cm de columna de agua, no llegará gas al quemador. Cuando la presión del gas alcance los 20 cm de columna de agua, el regulador se abre ligeramente, dejando que el gas pase al quemador. Si la presión continúa aumentando, el regulador se abre aún más para compensar. Los reguladores de

gas están también situados en otros puntos del sistema, para regular la presión de gas en las calderas, calentadores y motores.

Almacenamiento del gas. El gas producido en la digestión anaeróbica se puede almacenar en un gasómetro que está separado del digestor, o bien, en el mismo digestor en la parte superior de éste.

- *Gasómetros a presión.* El gas que se produce en el digestor es enviado por medio de compresores a depósitos donde queda almacenado a presión. Posteriormente, es extraído de estos depósitos y enviado a las instalaciones de utilización o de quemado. La presión de almacenamiento es, aproximadamente, de 3.4 atm, lo que permite disminuir el volumen de gas a una tercera parte de lo que ocupa en el digestor.

- *Gasómetros de cubierta flotante.* Almacenan el gas variando su altura. En estos gasómetros los gases se mantienen a una presión baja aproximada de 200 mm de columna de agua. Consisten en una campana flotante, similar a la cubierta flotante de un digestor primario. Una serie de ruedas permiten que la cubierta pueda deslizarse libremente hacia arriba o hacia abajo, según la cantidad de gas almacenado. Estas ruedas deslizan sobre unos perfiles de acero que actúan como guías de la campana.

Quemador de los gases sobrantes. La antorcha o quemador de gases se utiliza para eliminar los gases en exceso del sistema de digestión. Va provisto de una llama piloto de quemado continuo, para que cualquier exceso de gas que pase por el regulador se queme.

Muestreador. El muestreador consiste en una tubería de 8 ó 10 cm de diámetro con una tapa de cierre con bisagras que penetra en el tanque de digestión, a través de la zona de gas, y que está siempre sumergida unos 30 cm en el lodo del digestor. Esto permite la toma de muestras del lodo del digestor, sin pérdida de presión de gas, y sin crear condiciones peligrosas causadas por la mezcla de aire y gas del digestor.

Sistema de calentamiento del digestor. Un digestor puede funcionar a cualquier temperatura, sin embargo, el tiempo que tarda en completar la digestión es variable y está en relación con ella. A medida que aumenta la temperatura, disminuye el tiempo necesario para que se produzca la estabilización del lodo. En general, los digestores modernos funcionan en un rango de temperaturas medias, entre 35 y 37°C, que corresponde a rango mesofílico. Los digestores se pueden calentar de diversos modos, aunque las instalaciones actuales están dotadas, en general, de digestores que se calientan por medio de la recirculación de lodos del digestor a través de un intercambiador exterior de agua caliente. El gas del digestor se usa como combustible en la caldera, cuya temperatura óptima de operación es de 60 a 80°C. El agua caliente se bombea 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. (FAO,2011)

2.3.5 Biodigestores. Los biodigestores conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo para lograr su descomposición produciendo biogás y

bioabono [Yank et al., sf; Pedraza et al. 2002; Ramón et al. 2006]. Según la FAO, 2011. Se desataca:

2.4 Marco legal.

2.4.1 Ley 23 del 12 de diciembre de 1973. Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el código de recursos naturales y de protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones.

2.4.2 Decreto 2811 de Diciembre 18 de 1974, Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

2.4.3. LEY 9 de Enero 24 de 1979. Por la cual se dictan Medidas Sanitarias.

2.4.4 Decreto 1594 de Junio 26 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I – del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y vertimientos de residuos líquidos.

2.4.5 Ley 99 de Diciembre 22 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.

Capítulo 3: Diseño metodológico

3.1 Tipo de Investigación

La investigación se puede manifestar de tres formas: cuantitativa, cualitativa y mixta (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010).

El presente proyecto se enmarca en el enfoque cuantitativo, debido a que se procederá a estimar los parámetros y la cantidad de lixiviados, para calcular las dimensiones del sistema piloto a proponer, y luego de proceder a la construcción y puesta en marcha del sistema se procederá a cuantificar la operatividad del sistema piloto a través del cálculo de los productos generados como biogás y bioabono.

Dentro de las investigaciones cuantitativas se encuentran de tipo exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. Algunas investigaciones pueden tener más de un alcance, como en este caso en donde el proyecto es descriptivo, buscando caracterizar y cuantificar los lixiviados generados; y también correlacional, pues la finalidad es conocer la relación entre la cantidad de lixiviados aprovechados por el sistema piloto y la cantidad de productos generados como biogás y bioabono.

El diseño metodológico adopta la investigación experimental, es decir, que para la evaluación del sistema piloto, se manipulan intencionalmente diferentes variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre la variable

dependiente dentro de una situación de control. En la figura 6, se describe el procedimiento para la ejecución del proyecto.

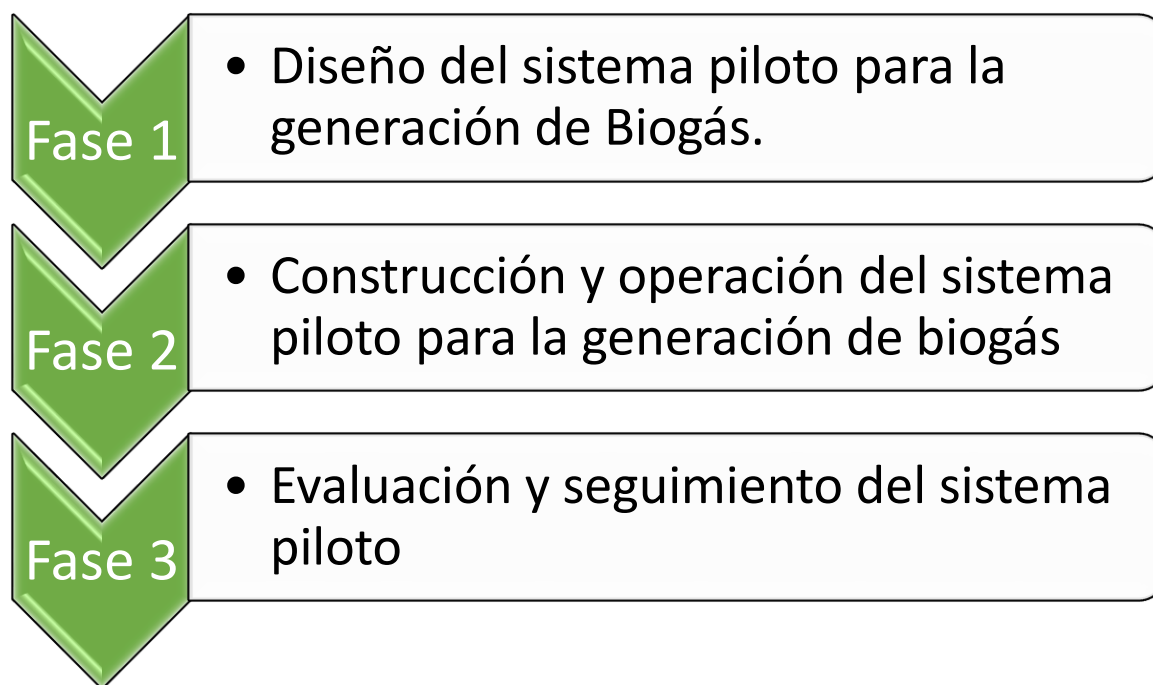


Figura 6. Fases a desarrollar para la ejecución del proyecto. Autores, 2019.

Fase 1. Diseño del sistema piloto para la generación de Biogás. Se desarrollará a través de un estudio del arte, para identificar qué tipo de biodigestor se adecua a las condiciones de los lixiviados producidos por el proyecto bovino de la Universidad, luego se realizará la caracterización de los lixiviados por medio de laboratorios, para determinar la carga contaminante y los parámetros indispensables a tener en cuenta, y por último a través de aforos se determinará el total de residuos orgánicos generados en el proyecto bovino para establecer la cantidad de lixiviados que los componen. Con base a esta información se procederá a realizar el diseño del sistema piloto, por medio de cálculos matemáticos y se presentara gráficamente por medio del software AutoCAD en el cual la universidad posee licencia.

Fase 2. Construcción y operación del sistema piloto para la generación de biogás. En primera medida, se establecerá el lugar en donde se ubicara el sistema piloto, con base en el diseño realizado en la etapa anterior se procederá a ubicar, adecuar y construir el sistema piloto de acuerdo a las especificaciones técnicas, luego se iniciara la puesta en marcha y por último se realizará un seguimiento a las condiciones de operatividad del sistema.

Para esta investigación se define como variable dependiente la cantidad de biogás y bioabono producido a través de los lixiviados; también se definen las variables independientes como el tipo de composición de los lixiviados o su caracterización de parámetros y la cantidad aprovechada por el sistema piloto. Por lo tanto dependiendo de la composición y cantidad de los lixiviados generados, se estimara la cantidad de biogás y bioabono producido.

De los resultados que se obtengan del análisis de la caracterización y cantidad de los lixiviados, se realizarán comparaciones y deducciones estadísticas entre los valores medios para todas las variables analizadas.

Fase 3. Evaluación del sistema. Para culminar el desarrollo del presente proyecto de grado se procederá a evaluar el sistema a través de la cantidad de biogás y de abono que se produce dentro del biodigestor seleccionado para su aprovechamiento en la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.

3.3 Muestra

Es indispensable determinar la cantidad de los lixiviados que se aprovecharan para establecer la capacidad o volumen de que se usara en el sistema piloto. La muestra de la población será la capacidad del sistema piloto para el aprovechamiento de los lixiviados.

Para este proyecto se realiza el tipo de muestreo simple, dicha muestra puede ser representativa de espacios y tiempos mayores si se sabe con anterioridad que la composición es constante y no existe alteración de los parámetros evaluados en el tiempo

3.2 Población

En esta investigación se definen los residuos orgánicos, específicamente los lixiviados como unidad de análisis. Se delimita la población como todos los lixiviados generados por el proyecto bovino de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Debido a que en la investigación la unidad de análisis son los lixiviados generados por el proyecto bovino de la institución, se pretende realizar la caracterización y cuantificación, para lo que se realizaran estimaciones a través de las proyecciones de los residuos generados por unidad bovina. El proyecto Bovino de la universidad posee las características presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1

Estimación de la cantidad de residuos sólidos generados por el proyecto bovino

Tipo de Bovino	Cantidad	Residuos Generados por unidad (Kg)
Vacas adultas	38	5.25
Terneros de cría	4	3
Terneros de levante	13	7
Toro	1	8.2

3.3. Recolección de la información.

La técnica de recolección de información que se utilizará en la ejecución de este proyecto se realiza mediante uso de fuentes primarias, para el levantamiento de información, estado del arte y recopilación de manuales guías e instructivos de sistemas de biodigestión. Además por medio de visitas técnicas y revisión de bases de datos se estimará la cantidad de residuos generados en el proyecto bovino. Este volumen cuantificado servirá para estimar la capacidad del biodigestor a implementar.

3.4 Análisis y procedimientos de datos

En primera medida se clasificará toda la información relacionada con el diseño, construcción y puesta en marcha de sistemas de biodigestión, luego se determinará por medio de cálculos y proyecciones matemáticas y estadísticas el volumen de residuos sólidos orgánicos generado por el proyecto bovino de la UFPSO, en base a esto se realizará los cálculos de generación de biogás del proyecto y de generación energética.

Se realizará el dimensionamiento del estanque de biodigestión y el diseño del estanque de biodigestión y se calculará los parámetros básicos de los equipos complementarios de la instalación.

Por último la información tomada en la recolección de datos, se presentará por medio de gráficos y porcentajes en cada una de las variables que intervienen en el sistema biodigestor como cantidad de volúmenes a aprovechar y porcentajes de rendimientos de biogás y bioabonos.

Capítulo 4: Desarrollo del proyecto

Para realizar el diseño de un sistema para la generación de biogás a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña, fue necesario estructurar una secuencia de acuerdo al diseño metodológico, basada en los diferentes objetivos específicos que a medida su elaboración y cumplimiento, permitieron llevar a cabo el presente trabajo de grado.

Los parámetros de cálculo está dado, en la determinación de los parámetros de altura y diámetro del tanque de fermentación, para obtener el volumen deseado en correspondencia con el volumen de la cúpula, según el objetivo para lo cual se va a diseñar la planta.

Elementos que componen un biodigestor

Tanque de digestión: Es el que define la denominación del biodigestor. El mismo está compuesto por la cámara de fermentación y la cúpula. En la cámara de fermentación anaeróbica el material a descomponer permanece un determinado tiempo, llamado tiempo de retención, en el cual ocurre la degradación y liberación del biogás. Su geometría es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen de material a degradar. La función de la cúpula es almacenar el gas en los momentos que no existe consumo, pues la producción de gas es ininterrumpida a lo largo de todo el día. La capacidad de almacenaje de la cúpula depende del volumen de la cámara de fermentación.

Laguna de compensación: En ella se acumula el material ya fermentado (digerido), donde puede recogerse. La capacidad de la laguna esta en dependencia del volumen del biodigestor (un tercio del mismo) y puede tener diferentes formas (cuadrada, circular, rectangular) y construirse encima de la cúpula o al lado del tanque de fermentación.

Registro de carga: Puede tener variadas formas y su tamaño depende del diseño del digestor. En el mismo se introduce el material a fermentar, mezclándose con agua en las proporciones adecuadas y homogenizándose.

Conducto de carga: Comunica al registro de carga con el tanque de fermentación.

Principales parámetros para el cálculo de una planta de biogás

- Volumen del digestor: Volumen de la materia orgánica más el agua;
- Volumen de la cámara de fermentación;
- Volumen de la campana: Valor máximo de almacenamiento de gas;
- Volumen de carga: Se refiere al volumen total de materia ya diluido que penetra dentro del digestor por día;
- Tiempo de retención: Este parámetro indica la cantidad de tiempo en días que permanece el material dentro del digestor.

En el diseño del sistema piloto, el parámetro principal fue la capacidad del digestor, debido a que otros parámetros como registros y conductos de carga, quedan limitados por la disponibilidad de materiales y facilidad constructiva.

4.1 Diseñar un sistema piloto para la generación de biogás, a través de los lixiviados del proyecto bovino de la granja de la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.

Se realizó los diseños, de lo que sería el biodigestor necesario, para aprovechar todos los lixiviados generados en la granja de la UFPSO, por medio de un prototipo a escala, que se construirá en el desarrollo del presente proyecto.

Para el desarrollo del diseño se fundamentó en la metodología planteada por el Grupo de Energía del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), plasmada en la revista ciencias técnicas agropecuarias de Cuba.

En dicho artículo, se desarrolló una metodología con el objetivo de facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para el diseño de biodigestores, también se apoyó en el manual de Biogás de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

A continuación se presenta el diseño del prototipo de sistema piloto del biodigestor con capacidad para aprovechar los lixiviados generados en la granja de la UFPSO, el cual será construido y puesto en marcha.

Es de aclarar que se pueden diseñar los biodigestores a partir de 2 tipos de análisis, el primero es de acuerdo a la cantidad de excretas que deseamos procesar, a partir de esa información se diseñará el tamaño adecuado del digestor y la producción de biogás y bioabono.

El segundo tipo de análisis, es de acuerdo a la cantidad de energía de biogás y abono que se tiene como requerimiento, a partir de estos valores calcular la necesidad de materia orgánica y su correspondiente digestor.

Teniendo como fundamento que el diseño del biodigestor con capacidad de aprovechar, todos los lixiviados, es de gran envergadura, el diseño del prototipo se realizó con una escala 1:133, algunos parámetros constructivos variaran de acuerdo a la disponibilidad de materiales, implementos y métodos.

Considerando que el tercer objetivo del presente proyecto es determinar la cantidad de biogás y abono que se produce al aprovechar los lixiviados generados por el proyecto bovino de la granja de la UFPSO, el análisis se realizó de acuerdo a la primera premisa.

Para esto, se realizó un aforo en el corral bovino de la granja, en donde en un tiempo de 24 horas, es decir en un día, se recogió 5 bultos de 40 kg, por lo tanto la capacidad de generación del proyecto bovino de la granja fue de 200 kg, esta cantidad de lixiviados, no corresponde a la totalidad generada por el ganado, debido a que los animales no se encuentran todo el tiempo en el corral, (aproximadamente permanecen 10 horas durante la alimentación y el ordeño). En el presente proyecto se consideró solo los residuos que por su facilidad, se pueden disponer manejar y adecuar, que corresponden a los generados en el corral y por medio de las mediciones se estimó en 200 kg/día.

De la figura 7 a la figura 9 se muestra la recolección y medición de los residuos que se pueden aprovechar del proyecto bovino.



Figura 7. Proyecto Bovino de la granja UFPSO. Autores, 2020.



Figura 8. Recolección de materia orgánica. Autores, 2020.

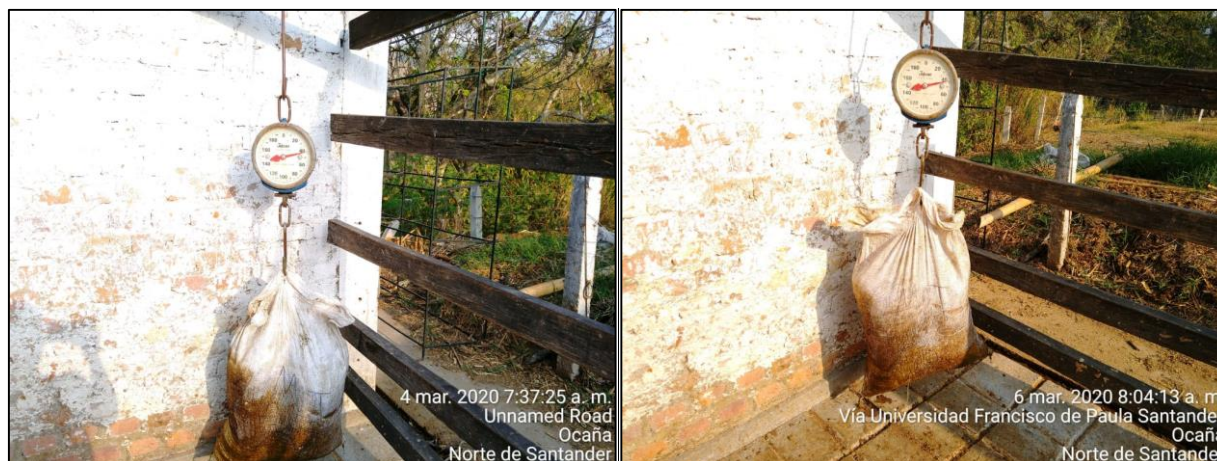


Figura 9. Recolección de materia orgánica. Autores, 2020.

Por otro lado, en la Tabla 2 se presenta la cantidad generada estimada en totalidad del ganado, de acuerdo al manual del biogás. (FAO, 2011)

Tabla 2

Total de residuos orgánicos generados en la granja del proyecto bovino de la UFPSO

Tipo de Bovino	Cantidad	Residuos Generados por unidad (Kg)	Residuo total
Vacas adultas	21	18	380
Terneros de cría	4	3	12
Terneros de levante	13	5	65
Toro	1	20	20
Total de residuos generados			477

La tabla 2, presenta el valor aproximado del total de residuos generados por los bovinos de la granja de la UFPSO, sin embargo su recolección no es viable, por la extensión y dificultad de recolectar y disponer todos los residuos.

4.1.1 Diseño del sistema piloto del biodigestor. Se debe tener en cuenta que los residuos se incorporan al biodigestor diluidos en agua. La cantidad de agua a agregar dependerá de la cantidad de sólidos totales de las excretas frescas y del tipo de carga.

Cuando se utilizan biodigestores rurales pequeños de carga semi-continúa, en forma práctica se recomiendan las mezclas presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3

Proporción de mezcla para digestor

Tipo animal	Estiércol: agua
Bovino	1:1
Porcino	1:3
Aves	1:3

Fuente: FAO, 2011. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Para los animales de tipo bovino se tiene una relación de 1:1 por lo tanto, para los 200 Kg de estiércol de nuestro análisis, debemos añadir 200 litros de agua, lo que nos daría 400 litros de mezcla que debemos cargar cada día al digestor, que se conoce como cantidad de sustrato diario introducido. La escala y capacidad del biodigestor dependerá de los materiales disponibles en el mercado, por lo tanto es posible que no se desarrolle el prototipo con una escala comercial, debido a que los recipientes comerciales, que se piensa usar como digestores, vienen con medidas estandarizadas, por lo tanto el diseño no se realizará como se hace comúnmente, es decir no se diseñara por necesidad de gas y tampoco se diseñará por capacidad de generación de residuos sólidos orgánicos, sino que se diseñará por la capacidad del tambor a usar, en este proyecto se usará un

tambor plástico hermético boca ancha de capacidad de 120 litros con medidas nominales de 807 mm (alto) x 498 mm (diámetro).

4.1.1.1 Cálculo del volumen del digestor

El volumen del digestor (Vd) se determina a partir del tiempo de retención hidráulica (TR) y la cantidad de sustrato diario introducido (Vcd) así:

$$Vd(m^3) = TR(días) * Vcd (m^3/día)$$

Donde:

Tr = Tiempo de retención (tiempo que requieren las bacterias para degradar la materia orgánica).

El tiempo de retención varía entre 20 y 55 días, en dependencia de la categorías de animales (cerdos, caballos, vacunos, etcétera), ya que se usan diferentes proporciones entre las cantidades de excretas y agua. Para el presente proyecto se consideró un periodo de 30 días, apoyado en los valores de la Tabla 4.

Tabla 4

Tiempos de Retención en Rango Mesofílico

Tipo de estiércol	Tiempo de retención
Estiércol de vaca	20–30 días
Estiércol de cerdo	15-20 días
Estiércol de ave	20-40 días
Estiércol animal, mezclado con residuos animales	50-80 días

Fuente. FAO, 2011. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Por lo tanto el volumen del digestor está dado por:

$$Vd(lts) = 30(\text{días}) * 400 (\text{litros/día})$$

$$Vd(lts) = 12000 \text{ litros}$$

Este volumen aplicaría, para un biodigestor que aproveche todos los residuos sólidos generados por el proyecto bovino, sin embargo para el diseño del sistema piloto, solo utilizaremos el volumen dado por la capacidad del tambor de plástico obtenido en el mercado.

En este caso, teniendo presente que el volumen del digestor, está dado por la capacidad del tambor industrial de 120 litros, por lo tanto se halló la necesidad de residuo orgánico diario para alimentar el prototipo del digestor en un 75% que es el volumen correspondiente a los residuos orgánicos, es decir 90 litros de mezcla.

$$Vpd(lts) = 30(\text{días}) * X (\text{litros/día})$$

$$Vpd(lts) = 90 \text{ litros}$$

$$90 \text{ litros}/30(\text{días}) = X (\text{litros/día})$$

$$X \left(\frac{\text{litros}}{\text{día}} \right) = 3$$

Una vez realizados los cálculos se pudo constatar que la escala del prototipo será de 1:133, además de verificar que la cantidad de sustrato diario introducido debe ser de 3 kilos de mezcla (50% - 50%) de agua y excreta bovina.

4.1.1.2 Cálculo de producción de biogás por día. Para determinar la cantidad total de energía debemos conocer la producción de biogás que produce 1kg de estiércol bovino, el cual podemos observar en la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de la producción de biogás

Tipo animal	Producción de biogás diario
1 kg de estiércol bovino	0,038 m ³ de biogás
1 kg de estiércol de ave	0,043 m ³ de biogás
1 kg de estiércol porcino	0,035 m ³ de biogás
1 kg de estiércol vegetales	0,040 m ³ de biogás

Fuente. FAO, 2011. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Producción de gas para estiércol Bovino = 0.038 m³ de Biogás

Biogas diario (m³) = cantidad de lixiviados generados por día * 0.038

Bd(m³) = 200 kg * 0.038 m³/kg

Bd(m³) = 7.6 m³

Por lo tanto se puede deducir, que si se aprovechan todos los residuos del proyecto bovino de la granja de la UFPSO, se produciría hasta 7.6 m³ de biogás diario, es decir 0.038 m³/kg, valor que comprobaremos al poner en marcha el prototipo de sistema piloto.

Al tener una escala 1:133, se espera que el prototipo sea capaz de producir 0.057 m³ de gas diario.

4.1.1.3 Dimensionamiento del biodigestor. A partir del cálculo del volumen del biodigestor, se pueden establecer las otras medidas, tales como diámetro y altura del cilindro que funcionará como digestor. Generalmente los digestores son cilíndricos, debido a la consistencia de la forma geométrica, a que requiere menor cantidad de materiales de construcción, y a que es más hermético. Sin embargo al realizar un prototipo partimos no al calcular las dimensiones del biodigestor sino que calcularemos cual es la capacidad de aprovechamiento de residuos orgánicos del tambor plástico con medidas estandarizadas de 120 litros de capacidad de volumen. Conociendo las dimensiones de altura y diámetro del tambor de plástico hermético que son 80 y 50 centímetros respectivamente, procedemos a realizar los cálculos, para determinar cuál será el volumen de digestión y de fermentación.

En el volumen calculamos la profundidad del pozo (tipo vertical) considerando que se trata de un biodigestor cilíndrico vertical de diámetro (d) Igual a la profundidad (h). Para lo cual consideramos las dimensiones del tambor industrial, que nos funcionara como digestor, que se mencionaron anteriormente de 80 centímetros de altura y 50 centímetros de diámetro. Ver

Figura 10.



Figura 10. Medidas de tambor industrial de 120 litros. Autores, 2020.

Cálculo del volumen de la cámara de fermentación: El volumen de la cámara de fermentación V_{cf} constituye entre un 75% ~ 80% del volumen del digestor, por lo cual:

$$V_{cf} = V_d * (0,75 \sim 0,80), m^3$$

Considerando el volumen del tambor industrial que se usará como digestor es $V_d = 120$ litros, aplicándolo a la expresión anterior, se tendrá que

$$V_{cf} = 120 \text{ lt } (0,75 \sim 0,80)$$

$$V_{cf} = (90 \sim 96) \text{ litros}$$

Cálculo del volumen de la cúpula: La cúpula es un segmento de una esfera y su volumen V_c está en el rango de 20% ~ 25% del volumen digestor, cuando él mismo tiene un fin doméstico, por tanto se tendrá la expresión:

$$V_c = V_d * (0,20 \sim 0,25)$$

Donde:

$$V_c = \text{Volumen de la cúpula, litros}$$

$$V_c = (24 \sim 30) \text{ litros}$$

Cálculo del volumen total del digestor. De lo anteriormente planteado se tendrá que el volumen total del digestor V_d es la suma del volumen de la cámara de fermentación V_{cf} más el volumen de la cúpula V_c .

$$V_d = V_{cf} + V_c$$

$$V_d = 90 + 30$$

$$V_d = 120$$

Al considerar la forma cilíndrica del tambor, por medio de una regla de tres, podemos estimar la altura a la que deben permanecer los lixiviados en el digestor.

Si el 100% de la capacidad está a una altura de 80 cm, el 75% de la capacidad, será el volumen de la cámara de fermentación que corresponde a 60 centímetros de altura y a un volumen de mezcla 1:1 de 90 litros de estiércol mezclado con agua.



Figura 11. Distribución del tanque para el prototipo del digestor. Autores, 2020.

Debido a que el prototipo del biodigestor va a ser de tipo “flujo discontinuo” es decir la carga de residuos orgánicos se hace de forma total al inicio de la operación y la descarga se realiza al finalizar el proceso. Los demás elementos que componen al biodigestor se implementaran por facilidad constructiva y disponibilidad de los materiales.

4.2 Construir el sistema piloto para la generación de biogás y recolección del lixiviado por medio de biodigestores en base a criterios de índole ambiental y técnica.

Una vez establecidos los parámetros de diseño para el sistema piloto y de acuerdo a los criterios mencionados anteriormente, se procedió a la construcción del prototipo en base al siguiente esquema.

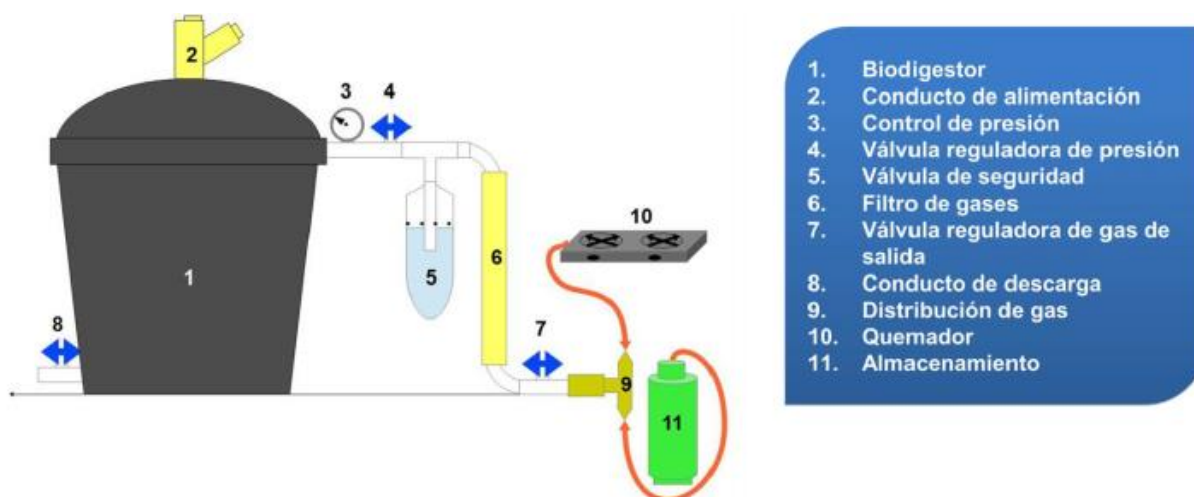


Figura 12. Esquema del prototipo del digestor. Pascalino y Acosta. Biogás: una alternativa energética a partir de los residuos orgánicos. 2012. Obtenido de: <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/787/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20FIN%20AL.pdf>

De acuerdo a los componentes y disponibilidad de materiales se espera obtener un sistema como el que se presenta en la figura 13.



Figura 13. Prototipo del sistema a construir. Fuente: Panel del biogás, Servicios manufactureros. Recuperado de: <http://www.oas.org/dsd/Energy/Documents/SimposioG/3%20Panel%20I%20Biogas.pdf>

Para comenzar la construcción del prototipo del sistema es importante recalcar que se deben cumplir los parámetros del sistema diseñado, como se menciona en el literal 4.1.

Es decir, se propuso diseñar y construir un prototipo de escala 1:133 para el manejo de los residuos orgánicos del proyecto bovino, con ánimo de establecer cual podrá ser el impacto de construir el sistema completo y cuanta energía por parte del biogás se puede aprovechar en el campus de la UFPSO.

Para ello se estableció en el diseño los siguientes parámetros:

- Carga orgánica (biomasa).
- Cantidad de mezcla de agua (Ma).

- Determinación del tiempo de retención (Tr).
- Determinación de las dimensiones del biodigestor.

Para la realización del prototipo se dispuso de los siguientes materiales:

Tabla 6

Materiales utilizados para la construcción del prototipo del sistema

Elemento	Dimensiones	Cantidad
Tambor Plástico de 120 litros	80 cm*50 cm	1
Manguera de gas amarillo de 3/8"	6 metros	1
Llave de paso 1/2"	Und	2
Adaptador 1/2"	Und	7
Tubería Galvanizada 1/2"	3 metros	1
Abrazaderas 1/2"	Und	9
Teflón Industrial	Und	1
Tubo PVC 2" tipo liviano	2 metros	1
Codos de 90° de 2" tipo liviano	Und	2
Neumático	Und	1
Pegante	Und	1
Sintesolda	Und	1
Regulador de presión	Und	1

Los materiales utilizados se presentan en la figura 14.

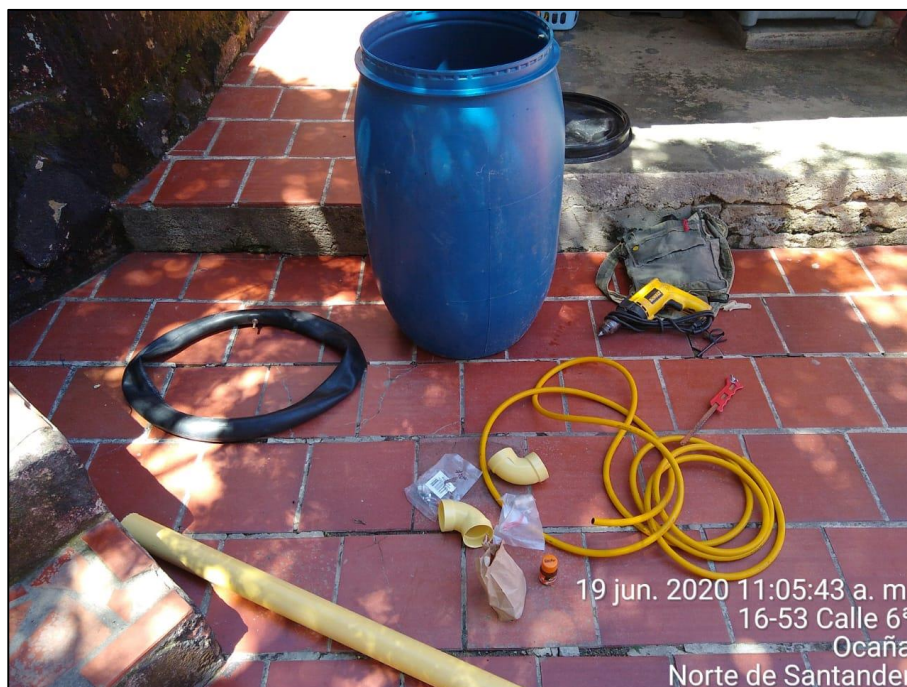


Figura 14. Materiales para el prototipo del sistema. Autores, 2020.

Una vez obtenidos todos los materiales para la construcción del sistema, se inició el desarrollo del sistema.

En primera medida es importante recordar que el sistema será de tipo de flujo discontinuo, por lo tanto la carga se realizará de manera completa al inicio y la descarga al final del proceso.

Definido la capacidad del tanque, se inició la construcción del sistema. Lo primero que se desarrolló fue los agujeros de la tubería de descarga, para ello, se utilizó un taladro con una broca de 2 pulgadas, como se presenta en la figura 15.



Figura 15. Desarrollo de la tubería de descarga del digestor. Autores, 2020.

Luego se procedió a realizar el conducto de salida del gas, en la tapa del tanque del prototipo, por donde fluirá el biogás hacia el almacenamiento, como se muestra en la Figura 16.

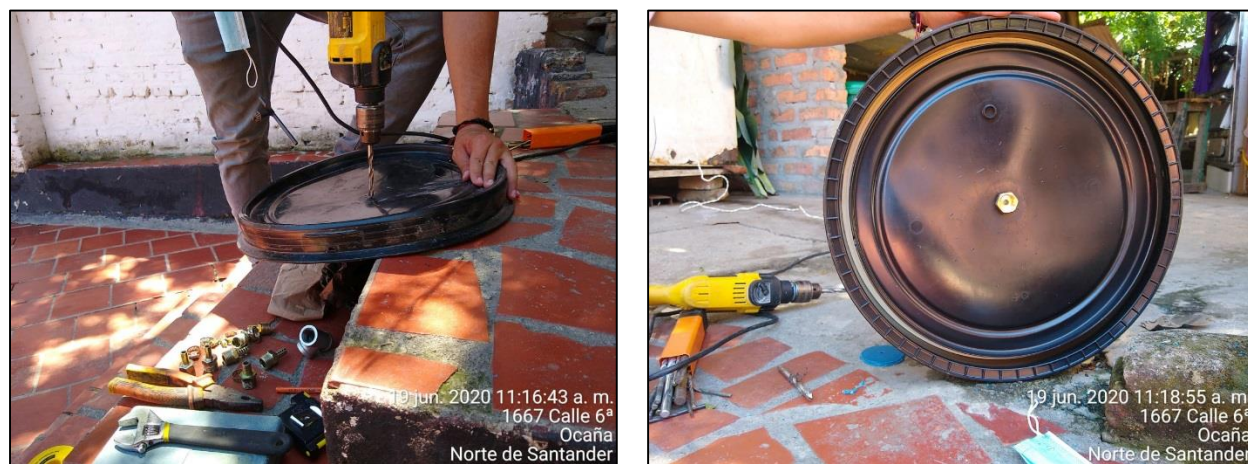


Figura 16. Instalación de la tubería de descarga del digestor. Autores, 2020.

Teniendo presente que el biodigestor, debe ser totalmente hermético, se procedió a sellar la salida de gas, con producto “SinteSolda”

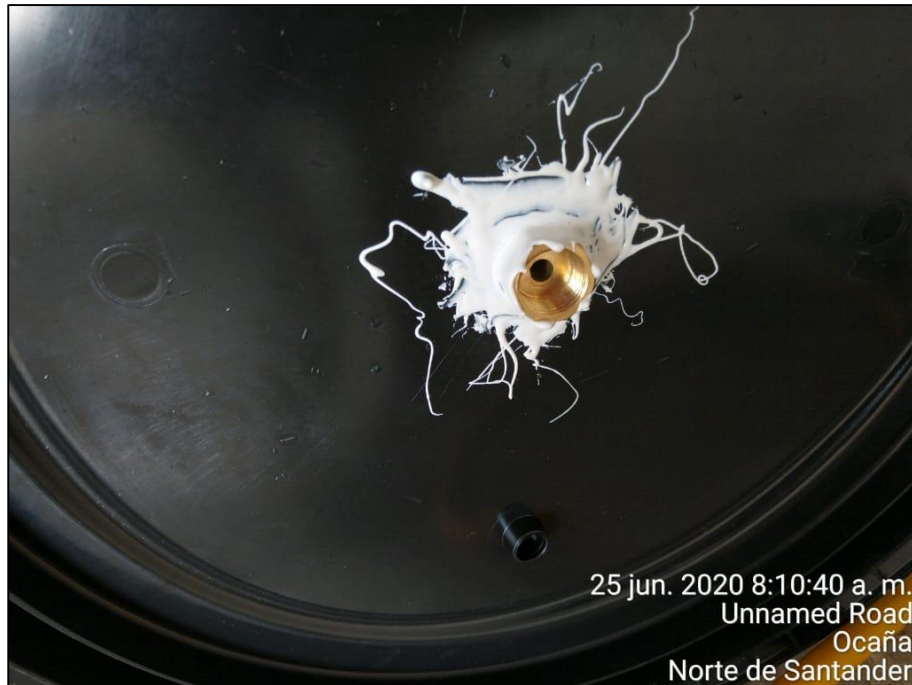


Figura 17. Sellado con producto especial en conducto de gas. Autores, 2020.

Luego, se continuo con la instalación de la tubería de descarga de 2 pulgadas y de sus accesorios 2 codos de 90° de 2 pulgadas, como se muestra en la figura 18.



Figura 18. Instalación de la tubería de descarga del digestor. Autores, 2020.

Después, se continuó con la instalación de la manguera o conducto del gas que va desde el tanque del digestor, hasta el neumático de almacenamiento, con el uso de elementos como llaves de paso, abrazaderas y adaptadores de ½” como se ve en la figura 19.

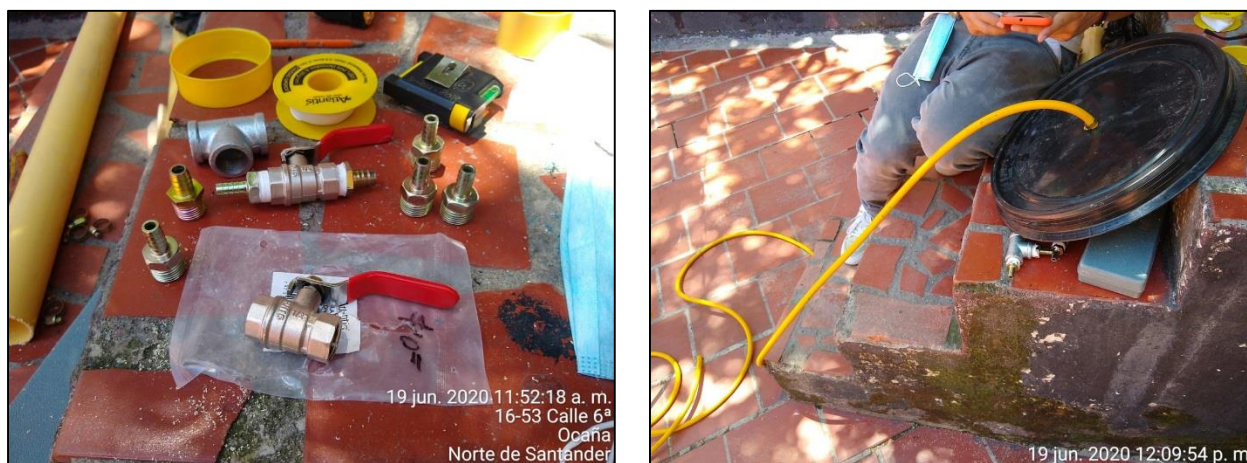


Figura 19. Instalación de la manguera de salida de gas. Autores, 2020.

Para culminar con el desarrollo del prototipo, se procedió a realizar las conexiones entre en digester y el neumático de almacenamiento y las conexiones de llaves de paso para el regulador de presión y la llegada al quemador.



Figura 20. Acople entre digester, neumático de almacenamiento y quemador. Autores, 2020.

Una vez culminado la construcción del prototipo, se transporta hacia la granja de la universidad, para iniciar con su inspección y puesta en marcha, con ánimo de evaluar la cantidad de biogás y bioabono generado por el funcionamiento del prototipo creado a una escala 1:100 de la capacidad que podría aprovecharse de los residuos orgánicos generados en la granja del proyecto bovino de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

4.3 Determinar la cantidad de biogás y de abono que se produce dentro del biodigestor seleccionado para su aprovechamiento en la Universidad Francisco De Paula Santander Seccional Ocaña.

4.3.1. Determinación de la cantidad de Biogás. Antes de iniciar la producción se debe corroborar, diferentes aspectos en el arranque y operación del biodigestor, en primera medida se debe procurar que el medio sea estrictamente anaeróbico, debido a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno, por lo tanto es indispensable verificar que el prototipo del biodigestor esté completamente sellado y sea totalmente hermético, así que es necesario realizar un chequeo y corrobora que el sistema se encuentre libre de fugas.

En el presente proyecto, el arranque del biodigestor se realizó con el material de la carga disponible en el proyecto bovino vacuno, la cantidad de carga a utilizar, así como la proporción de la mezcla, se siguieron de acuerdo a los parámetros de diseño, especificados en el [capítulo 4.1](#)

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que para que un digestor de residuos orgánicos opere en forma correcta, debe estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura, además aun no siendo en recipiente de alta presión, el contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad. También debe contar con medios para efectuar la carga y descarga del sistema.

Tener acceso para el mantenimiento y por ultimo contar con un medio para romper las natas o costras que se forman.

El estiércol bovino se mezcló con agua en proporciones de 1:1 de acuerdo a la Tabla 3, y con la cantidad establecida del 75% de la capacidad del tanque de 120 litros, como se mencionó anteriormente, el prototipo del sistema es de flujo discontinuo, por lo tanto, se realizó la carga inicial de manera completa con una mezcla compuesta de 45 kg de estiércol bovino y 45 kg de agua. Como se muestra en la *Figura 21*.



Figura 21. Carga y mezclado de residuos orgánicos en el sistema. Autores, 2020.

El proceso de carga continua, realizada en un solo depósito de digestión, correspondería a una fermentación de una sola etapa. La producción del biogás, comienza después de cierto periodo (Tiempo de Retención Hidráulica) a partir de una carga inicial, en función del tipo de las materias primas y de la temperatura interna de funcionamiento del biodigestor. La carga inicial del prototipo se puede observar en la *Figura 22*.



Figura 22. Prototipo del sistema cargado de acuerdo a las condiciones iniciales del proyecto.

Autores, 2020.

En el presente proyecto se consideró un tiempo de retención de 30 días, sin embargo se dejó abierta la conexión de la salida de gas, durante 5 a 7 días, con el objeto de eliminar todo el oxígeno que podría existir como producto de las primeras fases del proceso de descomposición de las materias orgánicas. Posteriormente cerrar y dejar que se eleve la presión interna y soltar el gas.

Diariamente se verificó que las condiciones del sistema, fueran las indicadas para la operación y se agitó para evitar la producción de costras y que de alguna manera no se generará el biogás esperado.

Luego de Transcurridos 15 días de la carga inicial o de arranque, se debe comenzar a verificar el inicio de producción de biogás (CO_2 y CH_4 en proporción similar), mediante la verificación de “quemado de biogás”. Se acopla una manguera a la salida de gas y utilizando un quemador o mechero, se prueba si el gas se enciende. Si el gas quema de buena consistencia, se puede iniciar el uso normal del biogás, si se observa color amarillo en llama quiere decir que posee oxígeno, y que no se alcanzó a eliminarlo todo.

Periódicamente se debe inspeccionar y verificar si existen filtraciones de agua o aire en los digestores de biogás, para proceder a su reparación.

Para iniciar el quemado, el sistema se debe presurizar, para esto es necesario una producción inicial que llene la capacidad del sistema, esto es el volumen de la cúpula y el volumen de almacenamiento del neumático, para determinar inicialmente la producción del Biogás del sistema, procedimos a calcular la cantidad de Biogás necesaria para presurizarse.

Inicialmente calculamos el volumen de la cúpula del tanque, para tal razón utilizamos la fórmula de volumen de un cilindro.

$$\text{Volumen de cúpula} = \pi * r^2 * h$$

$$\text{Volumen de cúpula} = \pi * 0.25^2 * 0.2$$

$$\text{Volumen de cúpula} = 0.04 \text{ m}^3$$

Luego se procedió a calcular el volumen del neumático de almacenamiento, para esto se consideró que el neumático es un cilindro y se determinó de la siguiente forma:

$$\text{Volumen del neumático} = \text{Volumen de almacenamiento} = \pi * r^2 * h$$

El diámetro interno del neumático es de 12 cm, para considerar una altura del cilindro, se procedió a calcular el perímetro del neumático, el cual es un rin de 18 pulgadas de diámetro, por lo tanto:

$$\text{Perímetro del neumático} = \text{altura} = 2 * \pi * r.$$

$$\text{Perímetro del neumático} = \text{altura} = 2 * \pi * 0.2286$$

$$\text{Perímetro del neumático} = \text{altura} = 1.43 \text{ m}$$

$$\text{Volumen del neumático} = \text{Volumen de almacenamiento} = \pi * 0.06^2 * 1.43$$

$$\text{Volumen del neumático} = \text{Volumen de almacenamiento} = 0.01617 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total necesario para presurizar el sistema} = 0.04 \text{ m}^3 + 0.01617 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total necesario para presurizar el sistema} = 0.056 \text{ m}^3$$

Luego de las diferentes verificaciones, chequeos diarios y agitación constante, después de transcurrido la mitad del tiempo de retención, se observó que el neumático de almacenamiento, lleno su capacidad, como se muestra en *Figura 23*.



Figura 23. Neumático de almacenamiento a capacidad. Autores, 2020.

Después de verificar, que el biodigestor poseía una presión estable, se procedió a hacer las primeras pruebas de quemado del biogas, para después calcular la producción total del sistema piloto y hacer aproximaciones de lo que se podría generar, si se aprovecha todos los residuos orgánicos del proyecto bovino de la UFPSO.



Figura 24. Prueba de quemado del biogas. Autores, 2020.



Figura 25. Regulador de salida de gas. Autores, 2020.

Luego de presurizado el sistema, se procedió a realizar quemado diario para determinar la producción total del biogas. Después, se procedió a realizar la actividad de quemado del biogas, durante las semanas siguientes, para el cálculo de la producción total, se llevó a cabo un registro

diario del caudal diario y del tiempo de quema, para calcular la producción inicial y las producciones posteriores como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Registro de la producción del Biogás del sistema piloto

Fecha	Área de tubería (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo de quema (S)	Producción m ³
08/08/2020	7.12557E-05	2.1	0.000149637	527	0.078858727
10/08/2020	7.12557E-05	1.8	0.00012826	489	0.062719302
11/08/2020	7.12557E-05	1.8	0.00012826	478	0.061308438
12/08/2020	7.12557E-05	1.8	0.00012826	421	0.053997599
13/08/2020	7.12557E-05	1.5	0.000106884	507	0.05418999
14/08/2020	7.12557E-05	1.5	0.000106884	497	0.053121154
17/08/2020	7.12557E-05	1.5	0.000106884	516	0.055151942
18/08/2020	7.12557E-05	1.2	8.55069E-05	547	0.046772267
19/08/2020	7.12557E-05	1.2	8.55069E-05	520	0.044463581
20/08/2020	7.12557E-05	1.2	8.55069E-05	472	0.040359251
21/08/2020	7.12557E-05	0.9	6.41302E-05	445	0.028537924
22/08/2020	7.12557E-05	0.9	6.41302E-05	432	0.027704231
23/08/2020	7.12557E-05	0.9	6.41302E-05	410	0.026293368
24/08/2020	7.12557E-05	0.6	4.27534E-05	356	0.015220226
25/08/2020	7.12557E-05	0.31	2.20893E-05	313	0.006913944
Producción de presurización					0.055442827
Producción total					0.71105477

La primera puesta en marcha del sistema se realizó el 25 de junio del 2020, sin embargo el sistema no estaba totalmente hermetico, por lo tanto no presento producción tras dos semanas de digestión, Luego se selló los elementos que podrian generar fugas, luego de una semana, el Biogas, no alcanzaba la presión necesaria, para generar una velocidad minima de quemado. Por lo tanto, el 26 de julio se inicio de nuevo, una puesta en marcha con nuevos residuos. Sin

embargo, se dejó una pequeña cantidad que ya estaba en proceso de digestión para acelerar el proceso.

La primera producción se realizó el sábado 10 de agosto de 2020 y fue la de mayor volumen con un valor de 0.078 m^3 de Biogas, el quemador se moduló a una velocidad de salida de 2.1 m/s y la quema fue constante durante 8 minutos y 47 segundos, luego comenzó a bajar la llama y se procedió a terminar la primera quema.



Figura 26. Quemado inicial de de Biogas. Autores, 2020.



Figura 27. Quemado final de de Biogas. Autores, 2020.

Luego de la primera quema de biogas, se procedio a registrar la producción de biogas diariamente, como se muestra en la tabla 7.

De acuerdo a los calculos el promedio de quema diario fue de 488 segundos o 8 minutos y 8 segundos. Luego de registrar los datos, se procedio a compactar los datos de la primera semana de funcionamiento y de la segunda semana de funcionamiento, como se muestra en la tabla 8 y la tabla 9.

Tabla 8

Producción del Biogás del sistema piloto (08-08-2020-14-08-2020)

Fecha	Tiempo de quema (S)	Producción m³	Promedio	D.E	C.V
08/08/2020	527	0.078858727			
10/08/2020	489	0.062719302			
11/08/2020	478	0.061308438	0.060699201	0.009787016	16%
12/08/2020	421	0.053997599			
13/08/2020	507	0.05418999			
14/08/2020	497	0.053121154			

Graficamente estos resultados se pueden observar en la figura 28 y la figura 29. La primera semana la producción diaria promedio fue de 0.061 m³ con un coeficiente de variación del 16% y se observa en el grafico que la producción descendio dia, tras dia. Por otro lado el tiempo de quema en primedio fue de 485 segundos, debido a la regulación del caudal por medio de la valvula.

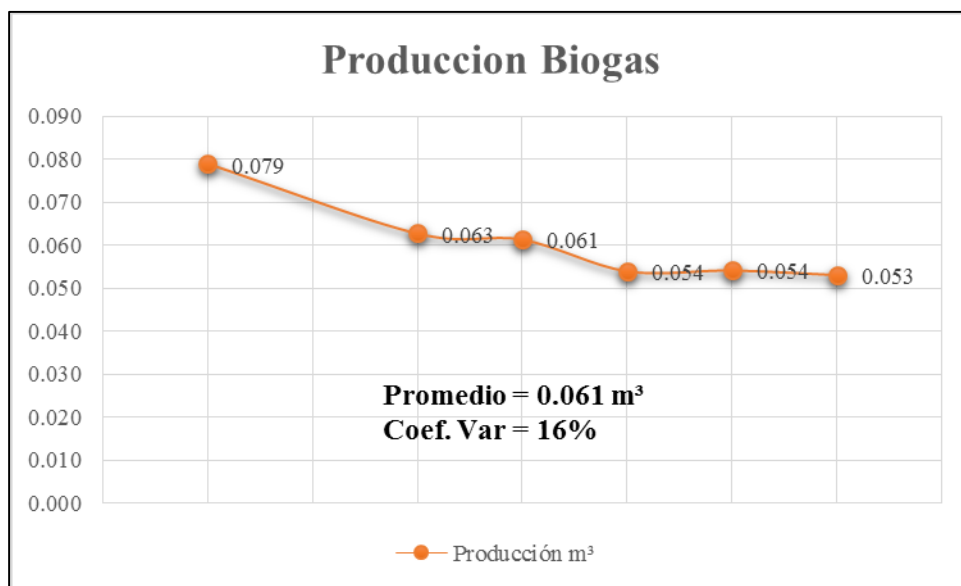


Figura 28. Producción de biogas en primera semana (08-08-2020-14-08-2020). Autores, 2020.

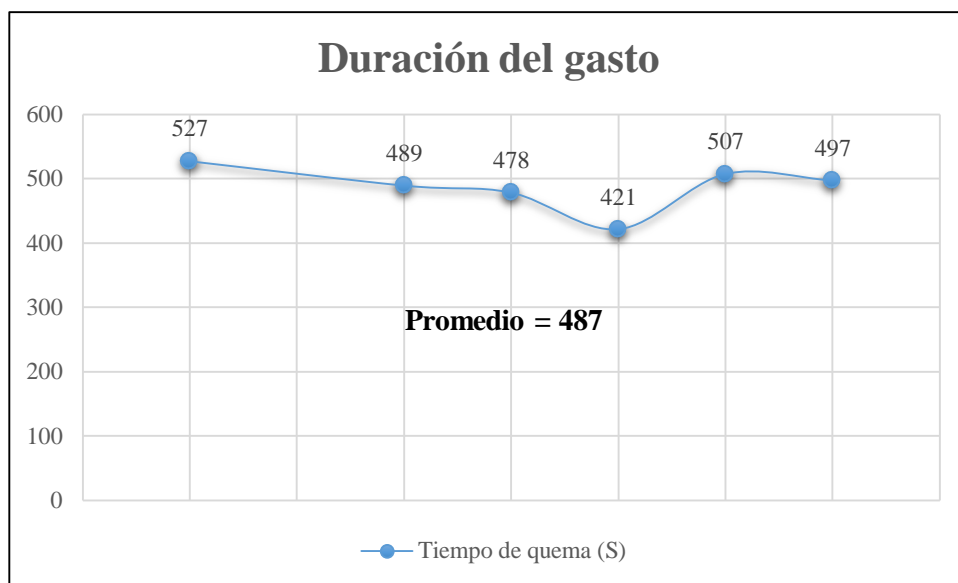


Figura 29. Duración del gasto de biogas en primera semana (08-08-2020-14-08-2020). Autores, 2020.

Tabla 9

Registro de la producción del Biogás del sistema piloto (17-08-2020-22-08-2020)

Fecha	Tiempo de quema (S)	Producción m ³	Promedio	D.E	C.V
17/08/2020	516	0.055			
18/08/2020	547	0.047			
19/08/2020	520	0.044	0.040	0.011	27%
20/08/2020	472	0.040			
21/08/2020	445	0.029			
22/08/2020	432	0.028			

En la segunda semana, la producción disminuyó a 0.040 m³ en promedio, con un coeficiente de variación del 27% y una duración de gasto en promedio de 489 segundos.

Graficamente se puede observar en la figura 30 y la figura 31.

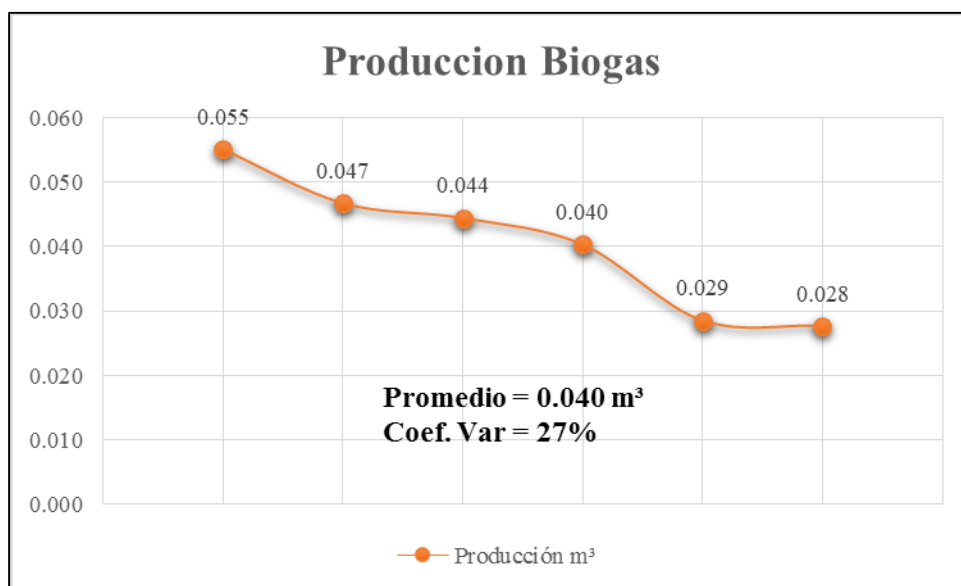


Figura 30. Duración del gasto de biogas en segunda semana (17-08-2020-22-08-2020). Autores, 2020.

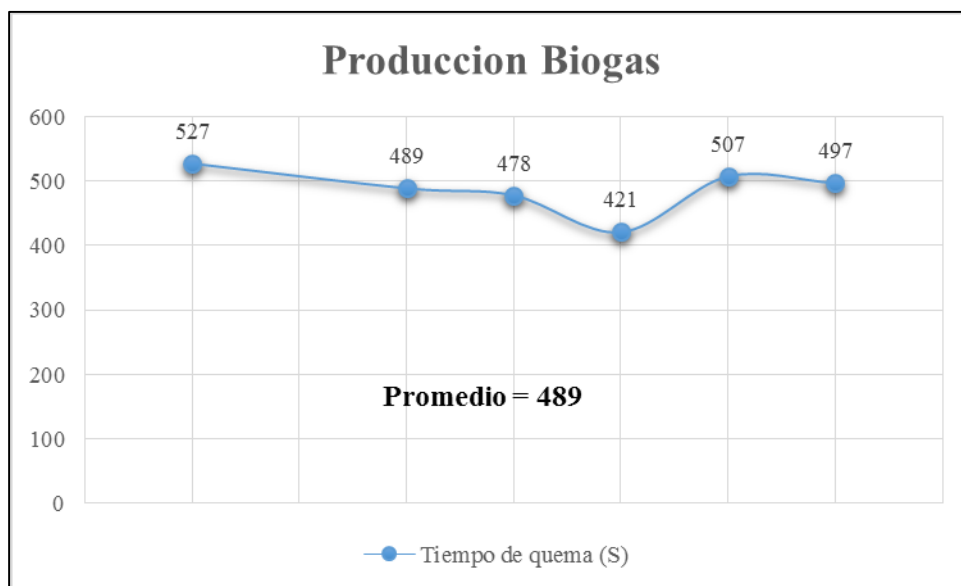


Figura 31. Duración del gasto de biogas en en segunda semana (17-08-2020-22-08-2020). Autores, 2020.

Teniendo en cuenta los registros tomados, se pudo establecer la producción de biogas diaria del sistema propuesto, y se procedio a determinar la cantidad de Biogas que puede ser aprovechado en el sistema.

De acuerdo a los estipulado en el manual del biogas (FAO, 2011) los residuos organicos de los bovinos pueden generar hasta 0.038 m^3 de biogas diario, por lo tanto si en el sistema se considero un tiempo de retención de 30 dias y se cargo en forma discontinua (Toda la carga al inicio de la puesta en marcha) se esperaba que la producción diaria fuera de la capacidad de generación de 1.5 kg de estiercol diario que equivale a 0.057 m^3 .

La primera semana de producción, el sistema diariamente produjo en promedio 0.061 m^3 , una producción superior a la esperada, sin embargo en la segunda semana de producción este rango bajo hasta una promedio diario de biogas de 0.040 m^3 .

Por lo tanto en las dos semanas de producción el promedio fue de 0.051 m^3 diarios, lo que equivale a un aprovechamiento de 0.034 m^3 por kilogramo de estiércol de bovino.

Después de la quema de la producción del prototipo del sistema, se pudo definir que si se aprovechan los 200 kg diarios de estiércol que se generan en el proyecto bovino de la granja de la U.F.P.S.O, se podría generar un total de 6.75 m^3 de biogas.

Este biogas, podría ser aprovechado en los diferentes laboratorios de la universidad o en el restaurante. Teniendo presente que según la (FAO, 2011) la necesidad de una persona por comida es de 0.1 m^3 , con esta capacidad el restaurante podría suplir la necesidad de alrededor de 70 comidas diarias.

Si se considera el aprovechamiento mensual, este asciende a 202 m^3 , y se podría suplir hasta 2100 comidas mensuales.

4.3.2 Determinación de la cantidad de Biogabono.

Al culminar la producción de Biogás, se procedió a retirar todo el material, el cual se pesó y obtuvo un valor de 85 kg, por lo tanto tuvo una pérdida del 5.6%. Tomando en cuenta que inicialmente se cargó el sistema con 90 kg de mezcla de estiércol y agua.



Figura 32. Pesaje de los residuos del digester o Bioabono. Autores, 2020.

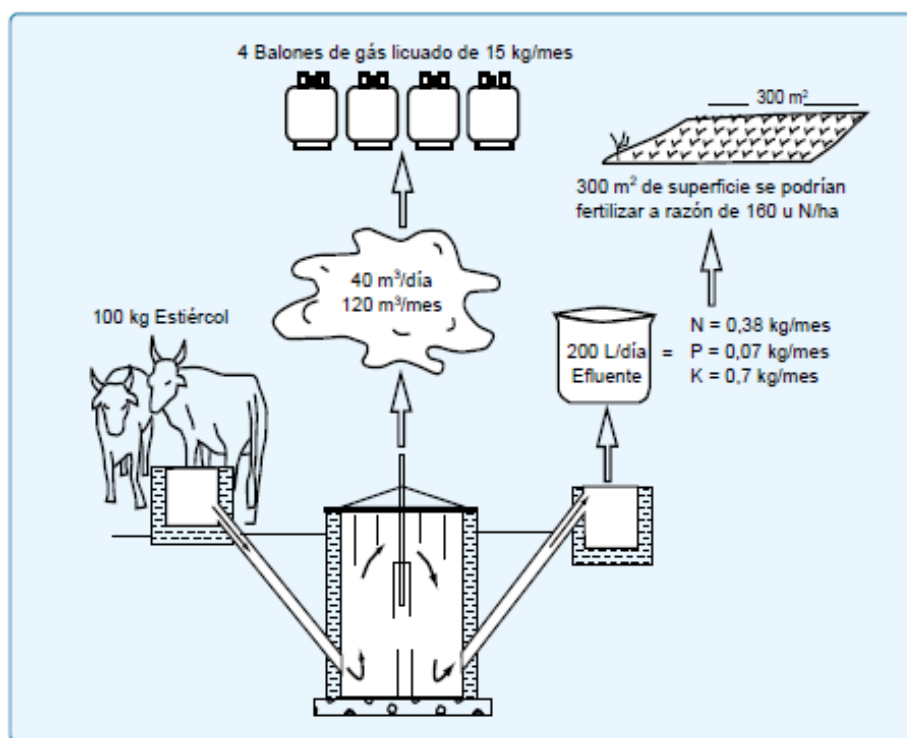


Figura 33. Producción de Biogas y Bioabono. Manual del Biogas. FAO, 2011. Obtenido de: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

El proceso fermentativo y de producción de biogás, viene acompañado de la producción de residuos denominado bioabono. De acuerdo a la figura 32, podemos deducir que 200 litros de efluentes tienen la capacidad de producir 0.38 kg/mes de nitrógeno, 0.07 kg/ mes de fósforo y 0.7 kg/ mes de potasio.



Figura 34. Prototipo del digester luego de la producción. Autores, 2020.

Si consideramos que 160 u N/Ha, los 85 litros de efluentes generados por el prototipo serian capaz de cubrir un área de 4.25 metros cuadrados de aprovechamiento.

La viscosidad del efluente se ve reducida de manera abrupta, debido a la mezcla de estiércol con agua a un 50%. Esto hace al efluente sea mucho más manejable para su utilización.

El efluente carece prácticamente de olor debido a que los compuestos que producen los olores ofensivos son reducidas casi en su totalidad en función al tiempo de retención, en el caso del sistema piloto fue de 30 días.

Todos los nutrientes utilizados por los vegetales en forma importante (nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio) al igual que los elementos menores son preservados durante la fermentación. En el caso del fósforo su porción directamente asimilable no se ve afectada conteniendo los efluentes un 50% en esta forma.



Figura 35. Aprovechamiento del bioabono, Area de impacto (4.25 m²). Autores, 2020.

Si se aprovechan todos los residuos orgánicos del proyecto bovino de la granja de la U.F.P.S.O considerando que se generan 200 kg diarios, mensualmente se podría suplir de fertilizante un área estimada de 600 m² considerando los valores del manual del biogás de la FAO, 2011, presentados en la Figura 33.

Por otro lado es importante considerar otros aspectos tales como el efecto del efluente sobre el suelo: Debido a su rápida descomposición el efluente brinda rápidamente nutrientes disponibles. Los ácidos húmicos presentes en este material contribuyen a mejorar la estructura del suelo y su porosidad aumentando al mismo tiempo la capacidad de intercambio. La cantidad

de humus estable duplica generalmente al que se consigue mediante la utilización de estiércoles incrementando al mismo tiempo en forma significativa la actividad biológica del suelo. Hilbert, J. (2003).

También se debe considerar el aspecto sanitario ya que, A pesar que este aspecto no puede ser ubicado estrictamente como un uso, aporta indudables beneficios al reemplazar otros costosos sistemas para obtener el mismo grado de descontaminación.

El tratamiento de los desechos por vía anaeróbica elimina la acumulación de estos a la intemperie evitando la proliferación de moscas, mosquitos, otros insectos y roedores portadores de peligrosas enfermedades.

El proceso en sí mismo produce una reducción del 90% al 99% de los principales patógenos animales (estafilococos, salmonella, pseudo-monas). Esta reducción muy importante desde el punto de vista del saneamiento está regulado por la temperatura de fermentación y la cantidad de días que permanece la biomasa dentro del digestor (tiempo de retención). Hilbert, J. (2003).

El proceso fermentativo también tiene un efecto beneficioso si se lo emplea como biofertilizante ya que un gran porcentaje de semillas de las malezas se tornan inviables.

Capítulo 5. Conclusiones

En el diseño del sistema se consideró todos los aspectos indicados en el manual del Biogás y otras literaturas, para cálculos como volumen de digestor, tiempo de retención, proporciones de mezclas, sin embargo otros aspectos no se consideraron, por ser de aspecto constructivo, de acuerdo a los elementos y materiales disponibles, para la construcción del sistema. El desarrollo del prototipo es de rápida construcción, se diseñó el tanque de digestión y la cámara de fermentación, de tal manera que el sistema tuviera una capacidad de 120 litros, por ser la capacidad del tambor industrial que se halló en el mercado con los recursos disponibles.

El biogás generado en la primera semana fue del orden de 0.04046 m^3 por kilogramo de estiércol digerido, en la segunda semana de producción fue del orden de 0.027 m^3 por kilogramo de estiércol digerido, en promedio la producción del sistema fue de 0.034 m^3 por kilogramo de estiércol digerido, valor similar pero menor al planteado por el manual del biogás que está en el orden de 0.038 m^3 por kilogramo de estiércol de bovino digerido. En el proyecto Bovino de La universidad se podrían aprovechar hasta 200 kg de residuos orgánicos, con capacidad de generar hasta 6.13 m^3 de biogás diarios, si se mantienen las condiciones de Biogás generado por el sistema en relación de metros cúbicos de biogás por kilogramo de residuo orgánico digerido.

Por otro lado, es importante mencionar que los residuos orgánicos ya digeridos en el prototipo tienen una capacidad de fertilizar suelos hasta por 4,25 metros cuadrados, cabe mencionar que si se aprovechan los 400 litros de mezcla orgánica, se tendría la capacidad de fertilizar con nitrógeno, fosforo y potasio un área estimada de 600 m^2 .

Capítulo 6. Recomendaciones

Se recomienda que en la universidad se implemente un sistema completo con capacidad de 12000 litros, de flujo continuo, en donde se puedan aprovechar a diario los 200 kg de residuos orgánicos generados en el proyecto bovino de la granja de la U.F.P.S.O.

Se recomienda llevar una programación adecuada al evaluar la construcción del digestor, considerando los elementos de diseño, como volumen de residuos orgánicos, volumen de cúpula de gas, almacenamiento, entrada y salida de residuos orgánicos, entre otros elementos.

A la hora de construir un sistema piloto, es importante considerar el almacenamiento de gas, la agitación diaria y lo más importante el hermetismo del sistema, se debe considerar también la eliminación de oxígeno, para dar buena operatividad.

El sistema puede ser usado en pequeñas fincas, para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, ya que es de bajo costo y fácil construcción y operatividad.

Dependiendo de las condiciones del sistema, la cantidad de biogás producido por kilogramo de residuo orgánico aprovechado puede ser mayor, por lo tanto se pueden obtener mejores producciones si se llevan a cabo todas las especificaciones necesarias.

Referencias

- Campos Cuní, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 20(2), 37-41.
- Cevallos Ayamacaña, Alex Eduardo. Ramos Ortíz, Rómulo Vicente (2009). Diseño y construcción de un biodigestor de campana flotante a partir de desechos orgánicos de ganado porcino con capacidad de 12m³ para la obtención de biogas el cual va a ser utilizado en la cocción de alimentos y climatización de la Granja el Descanzo. Facultad de Ingeniería Mecánica. ESPE. Sede Sangolquí.
- Corena, M., (2008). *Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en Rellenos sanitarios* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.
- Corona, I., (2007) *Biodigestores*. (Tesis pregrado). Universidad autónoma del estado de Hidalgo. Hidalgo.
- FAO (Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. Manual de biogás. ISBN 978-95-306892-0
- Hilbert, J. (2003). Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural, INTA Castelar, Morón, Argentina. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp_manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf
- Olaya, Y. & González, L. (2009) *Fundamentos para el diseño de biodigestores módulo para la asignatura de construcciones agrícolas*. Universidad Nacional De Colombia Sede Palmira.
- Pérez, J. (2010) *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.
- Rodrigo, J., Cañellas, N., Meneses, M., Castells, F., y Solé, C. (2008). El consumo de energía y el medio ambiente en la vivienda en España. Un análisis de ciclo de vida (ACV). Editorial Fundación Gas Natural. ISBN: 978-84-612-2604-7.
- Rodríguez, L. (2014) *Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos – forsu*. (Tesis de especialización). Universidad EAN, Bogotá.