

**EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA TECNOLOGÍA MÁS ADECUADA
PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS
SÓLIDOS**

PRESENTADO POR:

**ANLLY LICET BARONA BALANTA
YESID TORRES ÁLVAREZ**



**PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI
JUNIO 2016**

**EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA TECNOLOGÍA MÁS ADECUADA
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LOS RESIDUOS
SÓLIDOS**

**ANLLY LICET BARONA BALANTA
YESID TORRES ÁLVAREZ**

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Director:

Ing. Juan Carlos Osorio



**PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI
JUNIO 2016**

NOTA
DE ACEPTACIÓN

JUAN CARLOS OSORIO
Director de Investigación

Evaluator

Evaluator

AGRADECIMIENTOS

De antemano le agradecemos a Dios por habernos dado la vida y la salud para poder culminar este maravilloso proceso. A nuestros padres Ana, Luis, Maryori y Ángelo por su apoyo incondicional tanto económico como emocional, y por creer en nosotros. A nuestros profesores por habernos compartido sus conocimientos, experiencias y profesionalismo durante esta experiencia. A nuestros compañeros por haber caminado junto a nosotros por el sendero del aprendizaje. Por supuesto a nuestro director de trabajo de grado Juan Carlos Osorio por la guía y el acompañamiento en el proceso de investigación.

Anlly Licet Barona Balanta
Yesid Torres Álvarez

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	12
3. OBJETIVOS	15
Objetivos específicos.....	15
4. CONTEXTUALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN	16
4.1 Digestión Anaerobia	16
4.2 Biogás y Bioabono	18
4.3 Factores que afectan el proceso de digestión anaerobia.	19
a) Temperatura.	19
b) Aprovechamiento de la materia orgánica.....	21
c) Método y tiempo de carga y descarga.	21
4.5 Tipos de digestores	22
4.5.1 Digestor cúpula fija (Modelo chino)	25
4.5.2 Digestor campana flotante (Modelo Hindú)	26
4.5.3 Digestor Tubular	27
4.5.4 Digestor Olade Guatemala	29
5. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA MULTICRITERIO	33
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS MULTICRITERIO 34	
5.1.1 AHP	34
5.1.2 ANP	35
5.1.3 MAUT	36
5.1.4 PROMETHEE.....	36
5.1.5 ELECTRE	36
5.1.6 TOPSIS	37
5.2 COMPARACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS MULTICRITERIO PRESENTADAS	37

6	APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA MULTICRITERIO AHP-TOPSIS.	40
6.1	Supuestos operacionales y financieros.....	40
6.2	Descripción de los criterios	40
6.2.1	C1: Vida útil	41
6.2.2	C2: Costos de inversión	41
6.2.3	C3: Costos de operación	43
6.2.4	C4: Aprovechamiento de la materia orgánica.....	43
6.2.5	C5: Conductividad térmica	44
6.2.6	C6: Método de carga y descarga	44
6.3	Valoración de alternativas	45
6.4	Elaboración de las matrices	47
6.4.1	Normalización matriz de decisión.....	48
6.4.2	Ponderación matriz normalizada	49
6.4.3	Determinación de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)	49
6.4.4	Calculo de las medidas de distancias.....	50
6.4.5	Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal	52
6.5	Resultado	52
7	CONCLUSIONES.....	54
8	REFERENCIAS.....	56
9	ANEXOS	58
9.1	Anexo 1: Información Expertos.....	58
9.2	Anexo 2: Modelo de la encuesta realizada a los Expertos:	60
9.3	Anexo 3: Materiales construcción Campana flotante (Modelo Hindú) .	76
9.4	Anexo 4: Materiales construcción Digestor tubular	76
9.5	Anexo 5: Obtención del costo de inversión del Digestor de cúpula fija	78
9.6	Anexo 6: Cotización Digestor Olade de Guatemala.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico proceso de digestión anaerobia	18
Figura 2. Producción total de gas bajo diferentes temperaturas a lo largo del tiempo de retención	20
Figura 3. Tipos de digestores según su forma y frecuencia de cargado.	24
Figura 4. Digestor de cúpula fija (Modelo Chino).	26
Figura 5. Digestor de campana flotante (Modelo Hindú).	27
Figura 6. Digestor Tubular (Modelo Taiwanés).	29
Figura 7. Digestor Olade Guatemala	30
Figura 8. Estructura modelo AHP	35
Figura 9. Porcentaje de artículos ambientales según herramienta utilizada .	38
Figura 10. Modelo TOPSIS según caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escalas y tipos de procesos térmicos.	20
Tabla 2. Resumen ventajas y desventajas de digestores domésticos.	31
Tabla 3. Revisión de estudios similares y pertinentes a la investigación	42
Tabla 4. Costos de Operación por digestor.	43
Tabla 5. Conductividad térmica de los materiales para construcción de digestores	44
Tabla 6. Tiempo entre carga y descarga (días)	44
Tabla 7. Valoración de Alternativas	45
Tabla 8. Escala de Saaty	47
Tabla 9. Matriz de criterios consolidada.....	48
Tabla 10. Matriz de decisión	48
Tabla 11. Matriz de decisión normalizada.....	49
Tabla 12. Matriz normalizada ponderada.....	49
Tabla 13. Soluciones ideales Positiva - Negativa	50
Tabla 14. Medida de distancia a la PIS.....	50
Tabla 15. Medida de distancia a la NIS	51
Tabla 16. PIS - NIS por alternativa	52
Tabla 17. Proximidad relativa de las alternativas.....	52

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las centrales termoeléctricas que trabajan con combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) son responsables de aproximadamente el 80% de la producción mundial de electricidad, estos combustibles se caracterizan por ser recursos no renovables, fuertemente contaminantes y utilizados de forma ineficiente (WWDR, 2014). Muchas veces los efectos generados por la utilización de los combustibles fósiles son ignorados y prevalece el interés de producir energía frente al interés de conservar el medio ambiente.

No obstante existe la generación de energía a partir de la digestión de los residuos sólidos, proceso mediante el cual se obtiene el biogás, que resulta ser amigable con el medio ambiente y además constituye una alternativa diferente para el tratamiento de los residuos sólidos.

El biogás generado en los rellenos sanitarios es una mezcla de gases que contienen aproximadamente 50% de metano, 45% de bióxido de carbono y 5% de: oxígeno, nitrógeno, vapor de agua y ácido sulfhídrico, así como una gran variedad de gases en cantidades traza. (Fernández, 2010).

El problema abordado en este trabajo de investigación plantea la necesidad de encontrar la tecnología más adecuada para la generación del biogás a partir de la digestión anaerobia de los residuos orgánicos. Para esto se realiza, como primera medida, una descripción de los tipos de digestores más mencionados según la bibliografía consultada, con el fin de lograr caracterizarlos y definirlos dentro de la problemática planteada.

Como segunda medida se realiza la descripción de las herramientas multicriterio más utilizadas según la bibliografía: Proceso analítico jerárquico (AHP¹), Técnica para ordenar preferencias según su cercanía con la solución ideal (TOPSIS²), Proceso analítico en red (ANP³), Teoría de Utilidad

¹ Analytical Hierarchy Process

² Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.

³ Analytical Network Process

Multiatributo (MAUT⁴), Método de clasificación de preferencias y organización para una evaluación enriquecedora (PROMETHEE⁵), Eliminación y selección expresando la realidad (ELECTRE⁶), se realiza además un análisis de estas alternativas de lo que resulta que para el tema abordado y la información recolectada es factible aplicar la herramienta AHP-TOPSIS.

Finalmente, se lleva a cabo la aplicación de la metodología AHP-TOPSIS, teniendo en cuenta los criterios seleccionados durante la investigación realizada consultando diferentes fuentes, estos son vida útil, costo de inversión, costos de operación, aprovechamiento de la materia orgánica, conductividad térmica y método de carga y descarga, a partir de esto se considera la metodología a utilizar para la asignación de los juicios sobre las alternativas a través de la escala proporcionada por tres expertos consultados durante la realización del trabajo de investigación.

Los resultados son consignados y analizados en las diferentes tablas de las matrices correspondientes a la aplicación de la herramienta seleccionada, para finalmente obtener la alternativa más adecuada para este trabajo de investigación.

⁴ Multi-attribute Utility Theory.

⁵ Preference Ranking Organisation Methods for Enrichment Evaluations

⁶ ELimination Et Choix Traduisant la REalité

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La energía se puede considerar como un factor ineludible para lograr satisfacer las necesidades de la sociedad. El 80% de la electricidad que se consume a nivel mundial es producida por las centrales termoeléctricas que trabajan con combustibles fósiles como carbón, gas natural y petróleo, que son extinguidos, fuertemente contaminantes y utilizados de forma ineficiente (WWDR, 2014).

El consumo de energía en el mundo ha aumentado significativamente desde 1992 y se prevé que aumentará a un índice del 2% anual hasta 2020. (Cumbre de Johannesburgo, 2012). Las emisiones de CO₂ crecen de forma paralela al consumo energético, ya que este es casi totalmente dependiente de los combustibles fósiles (Catedra BP, 2014).

Por otro lado, el tema de residuos sólidos es de gran interés y preocupación para las autoridades, instituciones y comunidad en general, quienes identifican en ellos una verdadera amenaza contra la salud humana y el ambiente. La preocupación por la conservación del medio ambiente a nivel mundial ha tomado fuerza, los países más desarrollados presentan mayores avances relacionados con el cuidado del medio ambiente y la generación de energía renovable y algunos países suramericanos han logrado avances significativos en el tema. Según estudio elaborado para el Banco Mundial sobre la gestión de los RSU⁷ hacia 2025, cerca de 4.300 millones de ciudadanos producirán 1,42 kilos de residuos por persona y día (2.200 millones de toneladas anuales).

Cabe resaltar que en el 2013 se generaron 26.726 ton/día de residuos presentados al servicio público de aseo en Colombia, cifra que aumentó en un 8.4% con respecto al año 2012 lo que se atribuye a un aumento de la población servida y, probablemente, a mejoras en los procesos de medición por parte de los prestadores del servicio (Aseo, 2013).

Las energías renovables han empezado a representar una clara alternativa sustentable debido a que se obtiene de fuentes naturales que a diferencia de

⁷ Residuos Sólidos Urbanos

los combustibles fósiles son duraderas y amigables con el medio ambiente. De aquí, la eliminación de residuos mediante la digestión se ha convertido en uno de los mejores métodos para obtener energía más limpia ya que se considera amigable con el medio ambiente y como un proceso de conversión biológica de los residuos orgánicos en energía, por otro lado están los procesos de conversión térmica los cuales no son recomendados debido a que generan contaminación ambiental mediante la emisión de gases tóxicos (Greenpeace, 2011).

Existen diferentes tecnologías por las cuales se puede generar biogás mediante el proceso de digestión, a estas estructuras se les conoce como digestores, los cuales son definidos como un tanque cerrado o reactor que favorece, en un proceso natural anaeróbico, la estabilización de la materia orgánica contenida en los residuos y la generación del biogás (Vinasco, 2004). El aumento de la demanda energética alrededor del mundo ha conllevado a que se desarrollen diferentes tipos de estos digestores, todos ellos con ventajas y desventajas relacionadas con el costo, el aprovechamiento de la biomasa, la facilidad de construcción, el escape de gases y muchos otros factores.

Mientras en Colombia el 72% de los residuos sólidos son llevados a rellenos sanitarios, en países como Dinamarca sólo el 9% de sus residuos sólidos llegan a estos sitios de disposición, es decir que se está prácticamente enterrando más de nueve millones de toneladas de residuos por año, sin conocer claramente cuánto de esto podría aprovecharse (UNAL, 2013).

Actualmente Colombia ha empezado a incursionar en el entorno de las energías renovables no convencionales, el Presidente de la República, Juan Manuel Santos Calderón, y el Ministro de Minas y Energía, Amylkar Acosta Medina, anunciaron desde Cartagena la sanción de la Ley 1715 de 2014 que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional (Minminas, 2014).

Con esta norma, Colombia continúa dando pasos importantes en procura de un sistema energético más limpio, que involucre a las administraciones públicas, a la empresa privada y a las autoridades locales, e incentive la penetración de las fuentes no convencionales de energía con criterios de

sostenibilidad medioambiental, social y económica, además teniendo en cuenta que las perspectivas de la energía en el mundo hasta el año 2035 dependen decisivamente de cuál sea la actuación de los gobiernos y de cómo las políticas que se implanten puedan afectar a la tecnología, el precio de los servicios energéticos y la conducta del usuario final (International Energy Agency, 2010).

El potencial resultado de este proyecto será aplicable a la ciudad de Cali, ya que se generan alrededor de 1.800 toneladas/día de residuos que son conducidas en su mayoría al municipio de Yotoco en el cual se encuentra el relleno sanitario de Colomba- Guabal. La ciudad de Cali se ubica dentro del promedio de generación de residuos sólidos de Latinoamérica y ocupa el segundo puesto a nivel nacional después de Bogotá con un 8%. Los residuos sólidos que se producen en el municipio y que son objeto de la prestación del servicio de aseo provienen de los sectores residencial, comercial, industrial e institucional, se suman a estos los originados en las plazas de mercado, los materiales de barrido manual y mecánico, así como residuos de poda y corte de césped. A demás 279 toneladas de residuos, diariamente pierden su potencial de aprovechamiento al ser enterrados en Yotoco (Alcaldia Santiago de Cali, 2009).

Es aquí donde la aplicación de una correcta herramienta multicriterio, podría ser la clave para la escogencia de la tecnología más conveniente que se debería usar para la generación de biogás mediante la eliminación de residuos sólidos.

A partir del problema anteriormente descrito, este trabajo de investigación pretende contestar la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la mejor tecnología para la generación de Biogás a partir de los residuos sólidos orgánicos?

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Definir una tecnología para la generación de biogás obtenido durante el proceso de digestión anaerobia de la parte orgánica de los residuos sólidos aplicando una herramienta multicriterio.

Objetivos específicos

- Caracterizar las principales tecnologías existentes para el proceso de digestión anaerobia de la parte orgánica de los residuos sólidos.
- Seleccionar una herramienta multicriterio adecuada para la selección de la mejor tecnología aplicable al proceso de digestión anaerobia de la parte orgánica de los residuos sólidos.
- Aplicar la herramienta multicriterio escogida para seleccionar la tecnología más adecuada aplicable a la digestión de la parte orgánica de los residuos sólidos.

4. CONTEXTUALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN

4.1 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es el proceso mediante el cual el material orgánico biodegradable se descompone para transformarse en Biogás en la ausencia de oxígeno. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura define en su manual del Biogás la digestión anaerobia como un proceso biológico complejo y degradativo, en el que participa un consorcio de bacterias que son sensibles, completamente inhibidas o susceptibles al oxígeno o a sus precursores (e.g. H_2 , O_2). Mediante el proceso de digestión anaerobia es posible convertir residuos tales como, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles (FAO, 2010).

En el proceso de 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. (Delgado Montero, 2012)

Algunos investigadores afirman que todos los compuestos orgánicos se pueden procesar por medio de la digestión anaerobia. Sin embargo, la digestión anaerobia es un proceso muy complejo y que depende del valor de pH del digestato⁸, la relación C / N, la temperatura, tipo de entrada, y el nivel de degradación, etc. (Raheem, Yusri Hassan, & Shaakor, 2016).

Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso. Debido a esto, la biotecnología anaeróbica requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales. Algunas de estas condiciones ambientales son: temperatura (mesofílica o

⁸ Material orgánico semi-líquido resultante de la digestión anaerobia.

termofílica)⁹, tipo de materias primas, nutrientes y concentración de minerales, pH (generalmente cercano a la neutralidad), toxicidad (FAO, 2010).

Los beneficios asociados a la digestión anaerobia son:

- Reducción significativa de malos olores
- Mineralización
- Producción de energía renovable si el gas se aprovecha energéticamente y sustituye a una fuente de energía fósil.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la reducción de emisiones incontroladas de CH₄, (que produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO₂), y reducción del CO₂ ahorrado por sustitución de energía fósil (Mcit, 2007).

En la ilustración 1 se presenta el esquema básico del proceso de digestión anaerobia que consiste en la recolección, selección y correcta disposición de los residuos en el reactor para que allí suceda el proceso biológico anteriormente mencionado, el cual se desarrolla de forma natural en el tracto intestinal de los animales, en los pozos negros y en los rellenos sanitarios, pero para lograr un proceso controlado y con objetivos específicos se han creado diferentes tipos de digestores que permiten obtener el proceso deseado.

⁹ Intervalos de temperatura establecidos para definir organismos (Ver tabla 1)

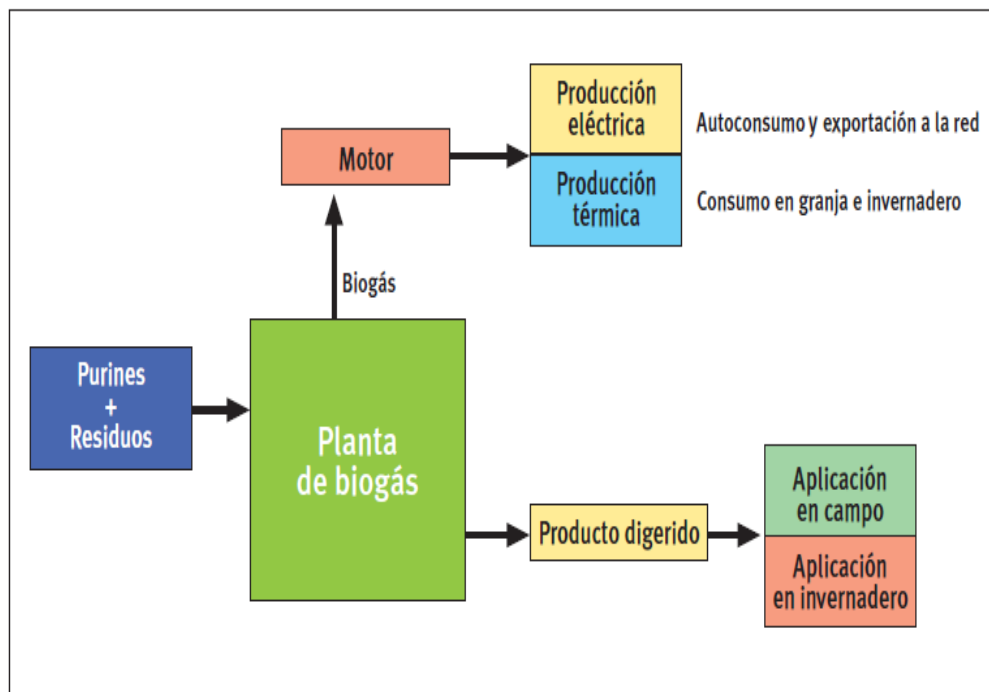


Figura 1. Esquema básico proceso de digestión anaerobia

Fuente: (Centro de energías renovables, 2011)

4.2 Biogás y Bioabono

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.

El biogás es producido por microorganismos cuando las materias orgánicas son fermentadas dentro de determinados límites de temperatura, humedad y ácidos en un ambiente impermeable del aire. El metano, principal componente del biogás no tiene olor, color, sabor, pero los otros gases presentes le confieren un ligero olor de ajo o de huevo podrido (Bogota Torres, Diaz Ricardo, & Ramos Ocampo, 2008).

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, 2010).

4.3 Factores que afectan el proceso de digestión anaerobia.

a) Temperatura.

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. (FAO, 2010)

La temperatura es uno de los principales factores que afectan el crecimiento de las bacterias responsables de la producción de biogás. La producción de biogás puede ocurrir en cualquier sitio que se encuentre en el rango de temperatura de 4 °C a 68 °C. A medida que la temperatura aumenta, la tasa de producción de gas también se incrementa, y por ende disminuye el tiempo de retención de la materia orgánica dentro del digestor. En algunos casos se hace necesario implementar un sistema de calor suplementario para mejorar el rendimiento del proceso. (Paterson, M. 2010)

Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden desencadenar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema

adecuado de agitación y un controlador de temperatura. (FAO, 2010) Según investigaciones realizadas existen 3 intervalos diferentes de temperaturas en las cuales las bacterias pueden operar para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, estas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Escalas y tipos de procesos térmicos.

Intervalo	Tipo proceso
Mayores a 35°C	Termofílico
15°C – 35°C	Mesofílico
0° - 15°C	Psicrofílico

Una forma de aumentar la eficiencia del sistema es calentando el efluente, para ello se hace circular agua caliente por un serpentín colocado dentro de la cámara de fermentación. Finalmente el ciclo digestivo al ser más rápido a altas temperaturas, determina que la capacidad del digestor debe ser mayor a menores temperaturas (Guevara, 1996). Tal como se ve en la Ilustración 2.

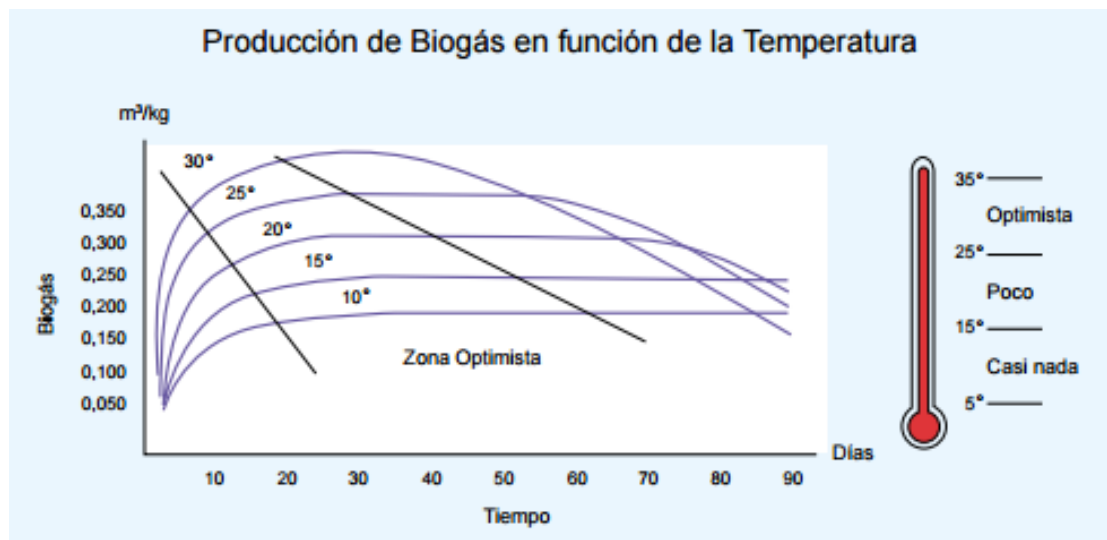


Figura 2. Producción total de gas bajo diferentes temperaturas a lo largo del tiempo de retención

Fuente Varnero (1991), Citado por FAO, O (2011)

b) Aprovechamiento de la materia orgánica.

En lo referente al digestor, los que producen más gas son los reactores batch, luego los semicontinuos y por último los continuos, dependiendo también del material de carga y de los volúmenes de desechos que se va a tratar (Guevara, 1996).

Para lograr una buena producción de gas es conveniente contar con un adecuado material de carga, con una relación Carbono/Nitrógeno conveniente, pudiéndose estimar casi la producción de gas que se origina; en general los materiales de origen vegetal tienen una producción mayor que las de origen animal, se estima que los pastos rinden un promedio de 0,4 m³/ Kg S.T¹⁰ y las excretas rinden un promedio de 0,25 m³/kg S.T (Guevara, 1996).

c) Método y tiempo de carga y descarga.

El hecho de no cargar un digestor por una semana puede conducir a una pérdida en la producción de biogás. Más importante aún es que el cargar el digestor en intervalos irregulares puede interrumpir el proceso biológico y causar que el sistema trabaje ineficientemente o hasta detenerlo completamente. Por lo tanto, muchos digestores son diseñados para ser cargados diariamente. Con cargas continuas y descargas de material del sistema, las bacterias trabajan eficientemente y se procesan grandes cantidades de residuos. La recolección diaria de residuos es también eficiente en términos de conservar los valores de nutrientes del residuo y preservar su potencial producción de gas.

Cualquier descomposición de material orgánico fuera del digestor reducirá la producción de biogás, por lo tanto, es mejor cargar residuos frescos al digestor. Si no se recolectan diariamente residuos, debe considerarse la opción de convertirse a esta práctica (Paterson, M. 2010).

Para los digestores tipo Batch la producción de gas aumenta al inicio del proceso, hasta alcanzar un máximo y finalmente decrece, cuando gran parte

¹⁰ Siglas para Sólidos Totales.

del material ha sido descompuesto; el ciclo dura 1 a 2 meses. Para los digestores semi-continuos se agregan nuevas materias primas cada 5-6 días, en un volumen que equivale al 4 o 5% del volumen total (Guevara, 1996).

4.5 Tipos de digestores

Actualmente existen diferentes tecnologías para el proceso de digestión de los residuos orgánicos, las cuales presentan diversas características inherentes a factores como costos, transporte, vida útil, tiempo de construcción, aprovechamiento de la materia orgánica, además de otros factores decisivos como los que nombra la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “Es esencial seleccionar una configuración de bioreactor que desacople el tiempo de retención hidráulico (TRH) del tiempo de retención de sólidos (TRS). Tal desacoplamiento contribuye a mantener de forma significativa una alta relación TRS/TRH que previene el lavado de microorganismos anaeróbicos de lento crecimiento. Otras consideraciones incluyen el tipo de materias primas (sólido, líquido o gaseoso), inhibidores, recuperación de bioenergía y limitaciones de transferencia de masa.”(FAO, 2010)

A lo largo del tiempo se han realizado investigaciones sobre los distintos tipos de digestores y se ha enfatizado en aquellos que son empleados con mayor frecuencia a nivel mundial. Basándose en esto se ha revisado la literatura correspondiente a estas investigaciones, seleccionando así, los tipos de digestores que predominan y por ende se tendrán en cuenta en el desarrollo de este documento.

La clasificación más común que se realiza para los tipos de digestor se basa en su frecuencia de cargado, o sea la frecuencia con la que se introduce materia a descomponer, cada grupo de esta clasificación posee ventajas y desventajas las cuales se describen a continuación:

Sistema Batch o Discontinuo: Este tipo de digestores se cargan una sola vez en su totalidad y se descargan completamente cuando se ha dejado de producir el biogás o cuando finaliza el proceso de fermentación, solo hasta entonces se renueva la materia orgánica. Este tipo de sistemas se usa

cuando la materia orgánica se almacena de manera intermitente. Tiene un solo orificio para la carga y descarga. La duración de la fermentación varía entre 2 a 4 meses, dependiendo del clima ya sea este cálido, templado, frío, etc; ya que la temperatura afecta directamente la velocidad de reacción dentro del reactor.

Como este sistema de digestor tiene a la materia de principio a fin confinada, no hay sostenibilidad en la producción de biogás. En este tipo de sistemas se usa una batería de digestores que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de biogás sea constante. Este tipo de digestor es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas.

De los sistemas Batch, el más usado es el OLADE-GUATEMALA, por la facilidad de construcción del sistema, la sencillez en el proceso de digestión, la alimentación del digestor puede ser con residuos vegetales o también mezclando residuos vegetales con pecuarios. (Solari, 2004)

Sistemas Continuos: Estos sistemas se cargan continuamente, y principalmente tienen la finalidad de tratamiento de aguas negras, así como de producción a gran escala y el uso de alta tecnología para el control, es sobre todo de corte industrial. Requieren el manejo de mayor tecnología para el calentamiento del sustrato, control de la calidad del gas resultante, plantas enteras de desulfuración, grandes compresores, cadenas de distribución, plantas de almacenamiento, antorcha de desfogue, etc. Así como un suministro muy constante de materia orgánica.

Sistemas Semi-Continuos: Estos sistemas se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día, o cada dos días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante. Los principales, son el hindú, el chino, y el Taiwanés, cada uno con ventajas y desventajas tales como mayor aprovechamiento del gas, o el biol (Bioabono), o dependiendo de si se quiere usar para fines sanitarios, de producción o de ahorro energético.

En la ilustración 3 se resume la clasificación de los tipos de tecnologías existentes según su forma y frecuencia de cargado. El presente trabajo se

centrará en los digestores de sistema Semi-Continuo, al ser los más conocidos y extendidos en los países en desarrollo y su medio rural.

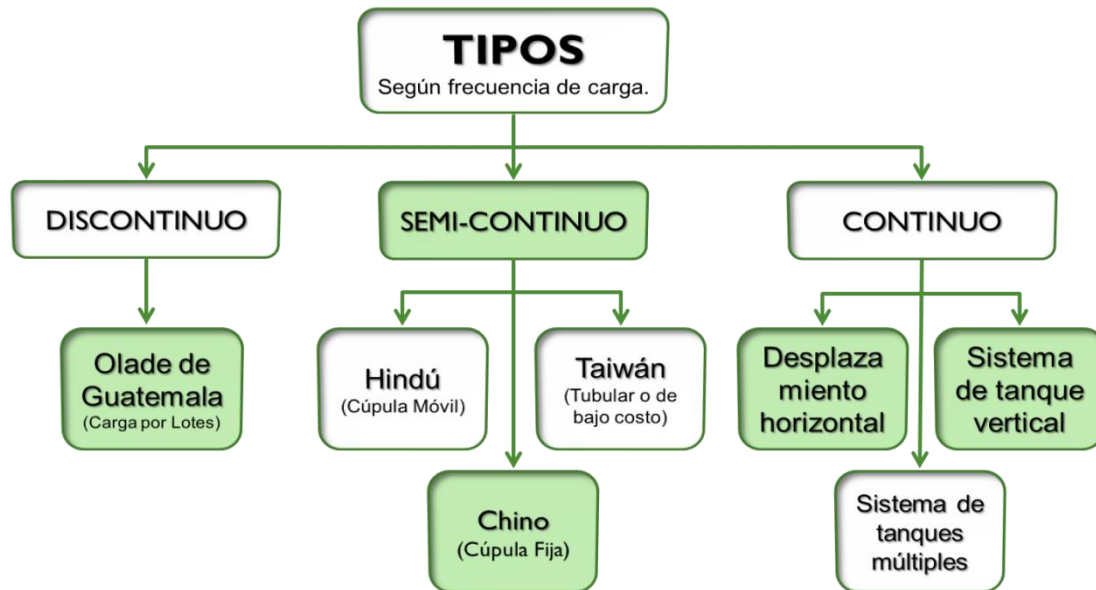


Figura 3. Tipos de digestores según su forma y frecuencia de cargado.

Los países en desarrollo utilizan principalmente 3 tipos de digestores Semi-Continuos o Domésticos (DBD's), dentro de los cuales están el digestor cúpula fija (Modelo Chino), el digestor de campana flotante (también llamado digestor telescópico o Modelo Hindú) y el digestor tapón de flujo (también llamado salchicha bolsa o digestor canal)(Cheng et al., 2014) El sistema de construcción y los materiales empleados para el digestor puede variar teniendo en cuenta las necesidades y requerimientos de cada proyecto.

Existen también los digestores Prefabricados, PBD's, los cuales se derivan de los DBD's, representan un sistema de construcción que ha sido desarrollado e implementado debido a su bajo costo, alta movilidad, alta durabilidad, alto aislamiento, y alta resistencia a la corrosión. Las dos líneas principales dentro de este sistema están representadas por digestores de materiales compuestos (CMDs) y digestores de bolsa (BD). (Cheng et al., 2014)

Evidentemente los digestores prefabricados se muestran como una buena alternativa para la generación de energía, sin embargo no se puede dejar de lado el hecho de que existen desventajas asociadas a la implementación de los mismos. En primer lugar, los procesos de producción de los PBD's no están totalmente estandarizados, por lo tanto no hay una garantía de calidad que brinde seguridad a los clientes. En segundo lugar, la inversión en materiales compuestos, sigue siendo inaccesible para los usuarios de las zonas rurales, debido a la escasez de materia prima. Estos digestores están limitados por su tamaño de construcción por tanto no se tendrán en cuenta en este trabajo.

El digestor producido por AGAMA, empresa sudafricana perteneciente al sector de las energías renovables, se vende a un precio de 2.800 USD (Cheng et al., 2014) Lo cual podría resultar como un factor en contra de la parte financiera de un proyecto que busque la generación de energía a partir de Biogás por medio de este producto.

A continuación se describen los tres tipos de digestores Semi-Continuos Domésticos y de sistema Batch mencionados anteriormente:

4.5.1 Digestor cúpula fija (Modelo chino)

La forma del digestor de cúpula fija, de origen chino, se asemeja a una esfera como se puede observar en la ilustración 4 y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene al desplazar el líquido en digestión hacia una cámara llamada de hidropresión; los materiales de construcción son bloques y/o ladrillos, cemento y acero, principalmente cemento. Estos digestores se cargan en forma semicontinua: se realiza una primera carga con material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70% de la capacidad (Hilbert, 2003) luego se sigue cargando como un digestor continuo; a los 120-180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Según Cuní, (2011), generalmente fuera de China, se manejan estos digestores en forma continua.

Una de las principales características de este digestor, según la FAO, es que 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 digestores tipo chino son de 30 a 60 días. (FAO, 2010)

Esta instalación tiene como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático. (Habitat, 2005)

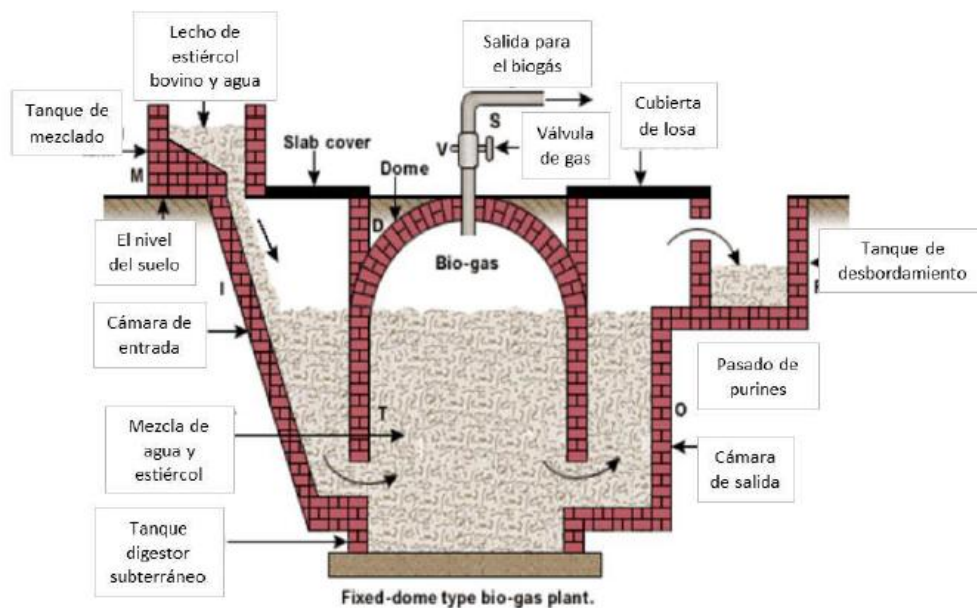


Figura 4. Digestor de cúpula fija (Modelo Chino).

Fuente: (Rodríguez Perdigón, 2014)

4.5.2 Digestor campana flotante (Modelo Hindú)

Es un digestor construido en mampostería o estructura de concreto de forma similar al reactor de cúpula fija, pero además cuenta con un depósito de gas móvil en forma de campana, la cual puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás. La campana debe tener una guía la cual permita el movimiento vertical, además de esto, la altura a la que sea elevada la campana dependerá del volumen del gas a almacenar (Vargas, 1992 citado por Garcés, Gutiérrez, Reyes 2014, p.13). Este tipo de digestores es el único que

tienen un depósito de biogás interior, por tanto puede ser utilizado cuando se necesita de un abastecimiento continuo de biogás ya producido y fertilizante (Olaya 2006 citado por Garcés et al., 2014, p.13). En la ilustración 5 se observa con mayor detalle las partes que componen este tipo de digestor.

La presión del gas disponible depende del peso de la campana de gas por el área de la unidad y normalmente varía entre 4 a 8 cm de presión de agua. Este reactor se alimenta semi-continuamente a través de una tubería de entrada (Guzmán, 2005), aunque este sistema necesita mayor cuidado y constancia en su mantenimiento su tiempo de vida útil es similar al del sistema de cúpula fija.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura afirma que este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, lo que se refleja en una producción de entre 0.5 y 1,0 volumen de gas por volumen de digestor por día (FAO, 2010).

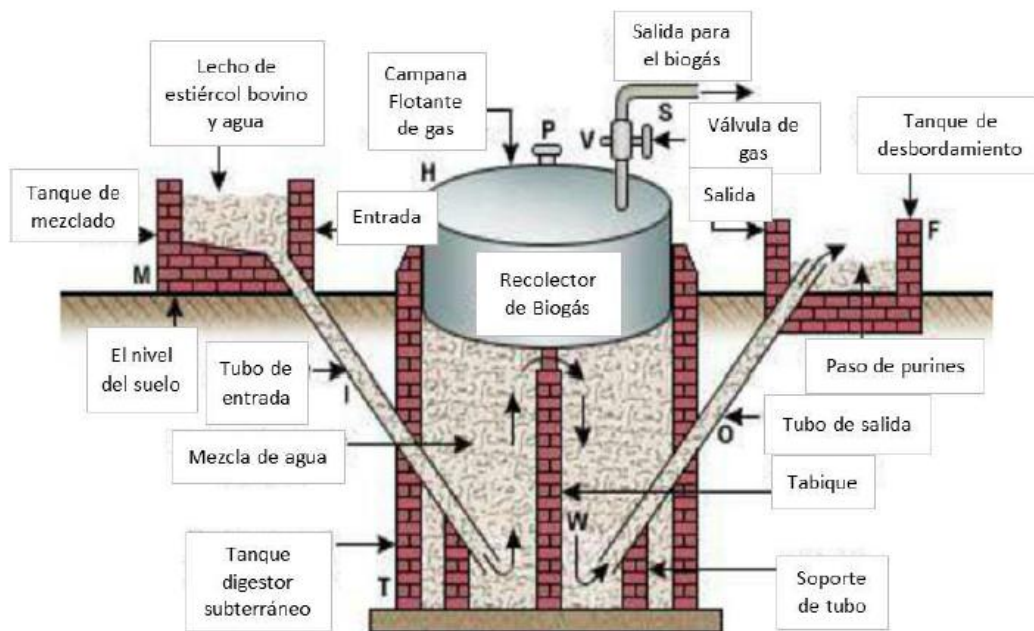


Figura 5. Digestor de campana flotante (Modelo Hindú).

Fuente: (Rodríguez Perdigón, 2014)

4.5.3 Digestor Tubular

En la ilustración 6 se presenta el digestor tubular o planta de balón, se compone de un tubo en material plástico (polietileno, PVC, plastilina, entre otros, o una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la planta. La parte inferior de la planta, en un 75% del volumen y constituye la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante, se almacena el biogás. Este tipo de planta se recomienda para aquellos sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes (Vargas 1992 citado por Garcés et al., 2014, p.15). Ya que en el verano el proceso de fermentación se hace más rápido y más lento en invierno.

Ocupa menor volumen de digestor por volumen de biogás producido, debido a la alta concentración de materia seca en el sustrato (40 – 60%). Ocupa de 60 – 80% menos de agua que los digestores continuos y semi-continuos. No forma costra ni necesita agitación diaria. (FAO, 2010)

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con Biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma. Su tiempo de vida útil es bajo, lo que hace necesario considerar una nueva instalación cada cinco años. También es muy vulnerable a sufrir roturas por condiciones climáticas adversas, por las acciones del hombre y los animales. (Guzmán, 2005)

El costo del digestor de plástico es relativamente bajo y varía según el tamaño y situación. En Colombia el costo por m³ de volumen líquido es bajo y tiene en cuenta que esto incluye el recipiente y su conexión, las cajas de cemento para las entradas y tomas de corriente, depósito de gas de plástico, estufa, la labor para preparar la trinchera y la instalación del digestor. (Guzmán, 2005) Se puede esperar una producción diaria de biogás equivalente al 35% del volumen de la fase líquida. (Botero Botero & Preston, 1987)

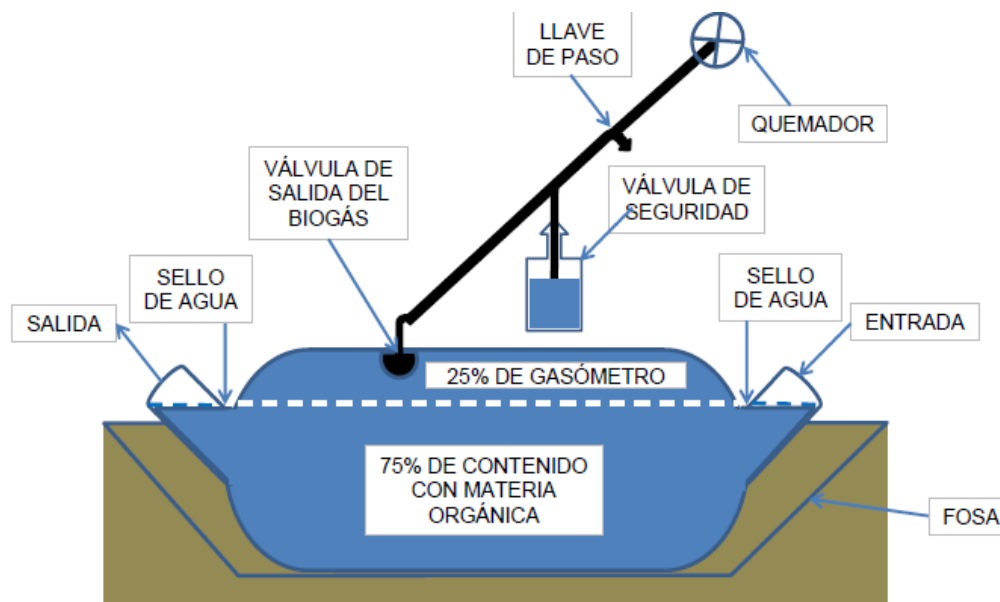


Figura 6. Digestor Tubular (Modelo Taiwanés).

Fuente: (Rodríguez Perdigón, 2014)

4.5.4 Digestor Olade Guatemala

El digestor Olade Guatemala es el más usado entre los digestores de sistemas Batch, por la facilidad de construcción del sistema, la sencillez en el proceso de digestión, la alimentación del digestor puede ser con residuos vegetales o también mezclando residuos vegetales con pecuarios y por su mayor producción de biogás, en comparación con el modelo chino e hindú. La producción de biogás en este tipo de digestores se mueve en un rango de 0,5 a 1,0 m³ biogas/m³ digestor. (Solari, 2004)

Como ya se vio esta clase de digestor, se carga (o se llena) una vez, y se descarga el contenido cuando se finaliza el proceso de digestión. Tiene un solo orificio para la carga y descarga. La duración de la fermentación varía entre 2 a 4 meses, dependiendo del clima ya sea este cálido, templado, frío, etc; ya que la temperatura afecta directamente la velocidad de reacción dentro del reactor. Como este sistema de digestor tiene a la materia de principio a fin confinada, no hay sostenibilidad en la producción de biogás.

Como se puede ver en la ilustración 7 este digestor consta de un tanque hermético con una salida de gas en su parte superior conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás para su posterior uso, un problema que tiene este digestor, muchos tiempos muertos, debido a lo esporádico de los desperdicios que lo alimentan (Rios Cerón, 2012).

Esta estructura se construye con bloques de concreto reforzado; la desventaja es que se debe construir obligatoriamente un gasómetro y al ser aéreos están afectados por la temperatura ambiental, se utiliza para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales, desechos sólidos orgánicos, el requisito básico es utilizar una buena inoculación. La vida útil de este sistema se considera cercana a la de los digestores de cúpula fija y cúpula móvil ya que cuenta con materiales similares, se calcula que la vida útil del Olade Guatemala está por encima de 15 años.

Cuando se utilizan digestores tipo Batch, se debe reunir material suficiente 20 o 30 días antes de empezar el proceso, los tallos y otros residuos agrícolas deben picarse en trozos de 2 a 9 cm, antes de alimentar el digestor, si es posible se debe machacar, moler o licuar; estos materiales almacenados por un tiempo, al sacarlos y tratarlos térmicamente favorecen ampliamente la fermentación (Guevara, 1996).

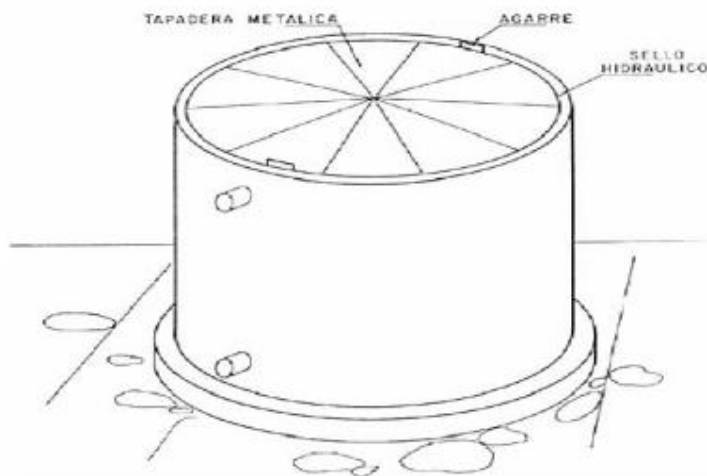


Figura 7. Digestor Olade Guatemala
Fuente: (Rios, 2012)

Los digestores y sus diferentes tecnologías hacen que la elección de uno de ellos y su puesta en funcionamiento no sea fácil, ya que no solo tiene que ver la generación de energía verde, además de un importante impacto de difícil evaluación en conservación del medio ambiente, mejoramiento de suelos, alimentación de animales, generación de lixiviados y mejoramiento en general de las condiciones de vida (Hilbert, 2007).

Al momento de realizar la evaluación económica de implementación de algún tipo de digestor se deben tener en cuenta diferentes factores y limitantes, como lo menciona la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura:

- Recolección de las materias primas, transporte y acondicionamiento.
- Almacenamiento del biogás, transporte y uso.
- Almacenamiento del efluente, transporte y uso (FAO, 2010).

A manera de resumen la tabla 2 presenta de forma comparativa las ventajas y las desventajas de cada uno de los digestores mencionados.

Tabla 2. Resumen ventajas y desventajas de digestores domésticos.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Digestor Hindú de Tambor o Campana Flotante	• Permite medir nivel del Biogás. • El manejo sencillo. • Presión constante. • Vida útil alrededor de 20 años	• Puede afectar alguna capa freática. • Variable capacidad de soportar cargas estáticas y dinámicas. • Uso de contrapesos sobre acampana para mantener presión constante. • Mantenimiento sistemático.

**Tabla 2. Resumen ventajas y desventajas digestores domésticos
(Continuación).**

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Digestor Chino de Domo o Cúpula Fija	• Menos mantenimiento. • Vida útil alrededor de 20 años. • Protegida contra bajas temperaturas. • No posee partes móviles • No posee partes metálicas oxidables.	• Presión no es constante. • Alto riesgo de daño la estructura. • Es necesario mano de obra calificada.
Digestor Olade Guatemala	• Facilidad de construcción • Sencillez en el proceso de digestión, • Se carga una sola vez y se descarga cuando ha finalizado el proceso totalmente.	• La duración de la fermentación es una variable que depende del clima; ya que la temperatura afecta directamente la velocidad de reacción dentro del reactor. • No hay sostenibilidad en la producción de biogás.
Digestor Taiwanés o Balón Flexible	• Resistente a eventos telúricos. • Hermético y flexible • Reducen pérdidas. • Permite medir el volumen del Biogás • Contiene el 75% de su volumen total en materia orgánica. • Muy compacto.	• Susceptible a perforaciones. Tiempo de vida de 3 años, sin protección. • Requiere instalaciones de seguridad. • Requiere inversión en infraestructura de protección. • Lo afecta las bajas temperaturas.

Fuente: (Rodriguez Perdigón, 2014)

5. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA MULTICRITERIO

“La evaluación y la toma de decisiones es un proceso habitual en el ser humano. En muchas ocasiones se presentan diferentes alternativas entre las que se debe seleccionar la que, según el juicio de expertos, sea la mejor o satisfaga el mayor número de necesidades” (Gómez, 2010).

El proceso de la toma de decisiones en los proyectos de investigación que son desarrollados en el campo ambiental, requiere un análisis de los impactos sociopolíticos, ambientales y económicos para lograr contrastar los diferentes puntos de vista, motivo por el cual es necesario aplicar una metodología que permita compactar dicha información y así obtener un resultado (Huang et al., 2011).

El análisis de decisión multicriterio surge como una metodología formal para hacer frente a la diversidad de dicha información, de tal manera que se logre levantar valores técnicos disponibles y posteriormente generar un resultado para apoyar las decisiones en el campo ambiental; busca seleccionar la mejor opción dentro de un conjunto de alternativas posibles. Se basa en juicios sobre comparaciones por pares, lo cual permite calcular prioridades globales para ordenar las alternativas bajo estudio, a partir de la representación de un problema (Rao et al., 2014).

Cada uno de los tipos de análisis multicriterio presenta ciertas ventajas, desventajas, oportunidades y/o debilidades frente al tipo de problema que se esté manejando, por lo tanto la decisión sobre cuál herramienta utilizar se debe ejecutar teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente. Dentro de estos tipos de modelos está el AHP (Siglas del inglés *Analytic Hierarchy Process*), el ANP (Siglas del inglés *Analytic Network Process*), y el TOPSIS (Siglas en inglés *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), entre otros, los cuales según (Huang et al., 2011) y (Gómez, 2010) están entre los más aplicados a nivel mundial.

La variedad de digestores con la que se cuenta actualmente permite tener una amplia lista de opciones a la hora de elegir qué tipo de digestor se puede instalar en determinado lugar, sin embargo es imprescindible aplicar un

método que permita realizar una elección adecuada que logre generar una combinación de factores que hagan de dicha alternativa la mejor opción.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS MULTICRITERIO

5.1.1 AHP

Es una técnica bien conocida que descompone un problema de toma de decisiones en varios niveles, de tal manera que forman una jerarquía con relaciones unidireccionales entre los niveles. El nivel superior de la jerarquía es el objetivo principal del problema de decisión. Los niveles más bajos son los criterios y subcriterios tangibles y / o intangibles que contribuyen a la meta. El nivel inferior está formado por las alternativas de evaluar en términos de los criterios. AHP usa comparación por pares para asignar pesos a los elementos de cada nivel, midiendo su importancia relativa con la escala de Saaty 1-9, y finalmente calcula pesos globales para la evaluación en el nivel inferior. (Aragónés, Chaparro, Pastor, & Rodríguez, 2009)

Este es un procedimiento que se enfoca en la cuantificación de aquellos juicios u opiniones que hayan sido plasmados desde el punto de vista de los implicados en el proceso, teniendo en cuenta la importancia que ejerce cada uno de los criterios durante el proceso de decisión.

Su estructura se basa en el ordenamiento de las alternativas con respecto a un objetivo o meta, ponderando los pesos de las mismas en la medida que se hace el recorrido ascendente de la jerarquía (Cendales & Castañeda, 2009), como se observa en la ilustración 9.

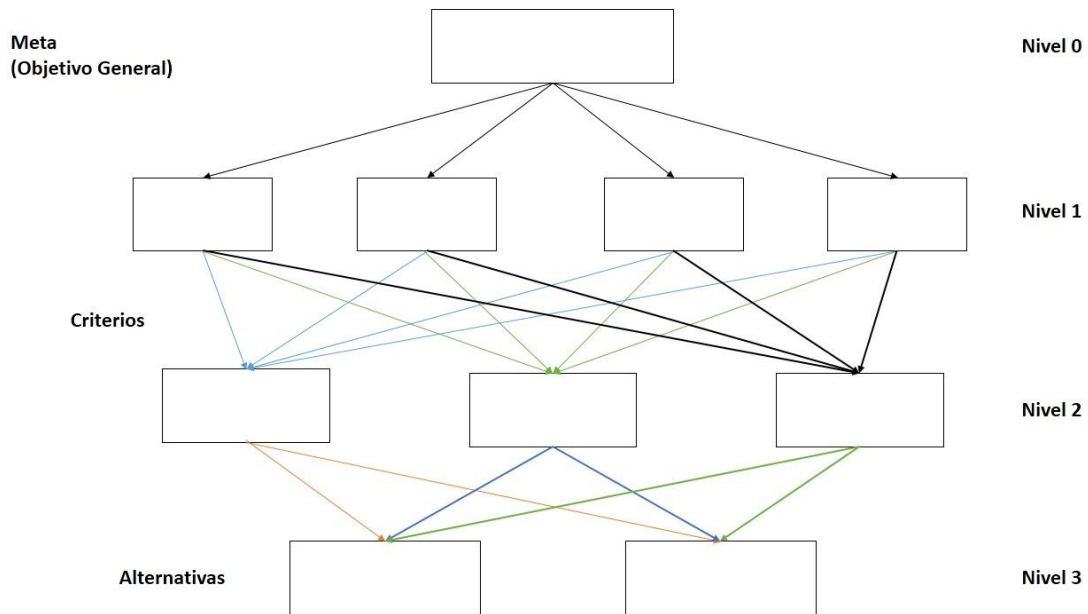


Figura 8. Estructura modelo AHP-TOPSIS

Fuente: (Cendales & Castañeda, 2009)

5.1.2 ANP

El modelo ANP es una herramienta matemática, que a través de una estructura de red, permite evaluar diferentes alternativas en escenarios en los que se deben tener en cuenta múltiples criterios para su elección, tanto cualitativos como cuantitativos, con el fin, de darle solución a un problema representado (Garavito, 2009). Además se puede decir que es el sucesor del modelo AHP por lo tanto incluye sus ventajas y minimiza sus desventajas frente a la aplicación que se le pueda dar a problemas con un mayor nivel de complejidad.

El modelo ANP está compuesto por jerarquías de control, conglomerados o como Saaty los llama “Clusters”, nodos interrelaciones entre nodos e interrelaciones entre conglomerados, en su tesis doctoral Pedro García Gómez menciona que es posible descomponer este proceso en cuatro etapas principales (Gómez, 2010).

5.1.3 MAUT

Este método consiste en determinar para cada atributo la función de utilidad (parcial), se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Posteriormente, al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas. El método de utilidad multiatributo supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, utiliza “escalas de intervalo”, y acepta el principio de “preservación de orden” (rank preservation) (Mazorra, 2012).

5.1.4 PROMETHEE

Su propósito es el de ayudar al decisor en los problemas de selección o de ordenamiento de alternativas posibles sometidas a una evaluación multicriterio, donde además los criterios se encuentran generalmente en conflicto entre sí. Inicialmente, se ofrecen dos posibilidades para resolver el problema de ordenamiento: obtener un pre orden parcial (PROMETHEE I) u obtener un pre orden completo (PROMETHEE II) ambos sobre el conjunto de alternativas factibles. Este análisis se complementa con la técnica de modelización visual GAIA (Geometrical Analisis for Interactive Aid), poderosa herramienta de decisión cualitativa, que asiste al decisor en la comprensión de los aspectos conflictivos entre los criterios y en la determinación de las ponderaciones asociadas a los mismos (Fernandez, 2002).

5.1.5 ELECTRE

El método ELECTRE (en francés: ELimination Et Choix Traduisant la Realité, en inglés: ELimination and Choice Expressing the Reality). Fue desarrollado por Benayoun, Roy y Sussman, en 1966. Básicamente, pretende reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes, realizando una partición del conjunto eficiente en alternativas más favorables (*núcleo*) y menos favorables. Esta partición se lleva a cabo mediante una *relación de sobreclasificación* entre las alternativas. Una relación de sobre clasificación se basa en la siguiente relación entre alternativas: Una alternativa E_i *sobreclasifica* (*outranks*) a otra E_k si para los atributos considerados el

enunciado "la alternativa E_i es al menos tan buena como la alternativa E_k " es válido (Vitoriano, 2007).

5.1.6 TOPSIS

El método de Programación por Compromiso, también llamado TOPSIS, es una Técnica de programación matemática utilizada originalmente en contextos continuos y que ha sido modificada para el análisis de problemas multicriterio de tipo discretos (Mellinas, 2012).

Su metodología consiste en identificar las soluciones que logren estar más cerca de una solución ideal positiva, aplicando el concepto de distancias como la euclidiana; identificando así, los pesos para cada criterio y normalizando las puntuaciones en cada uno de ellos para encontrar la distancia de cada alternativa hasta la solución ideal positiva y negativa (Huang et al., 2011).

Esta técnica está basada en el concepto de que una alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal positiva y estar lo más lejos posible respecto a la solución ideal negativa. Fue desarrollada por Hwang y Yoon, recibiendo posteriormente aportes de Zeleny. Fue mejorada por los propios autores en 1987 y más tarde por Lai en 1993 (Mellinas, 2012).

5.2 COMPARACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS MULTICRITERIO PRESENTADAS

Dentro de la dinámica de la aplicación de herramientas en investigaciones ambientales, se ha venido recopilando información sobre las herramientas multicriterio utilizadas en 312 artículos consultados en bases de datos por (Huang et al., 2011), los resultados son mostrados en la ilustración 8.

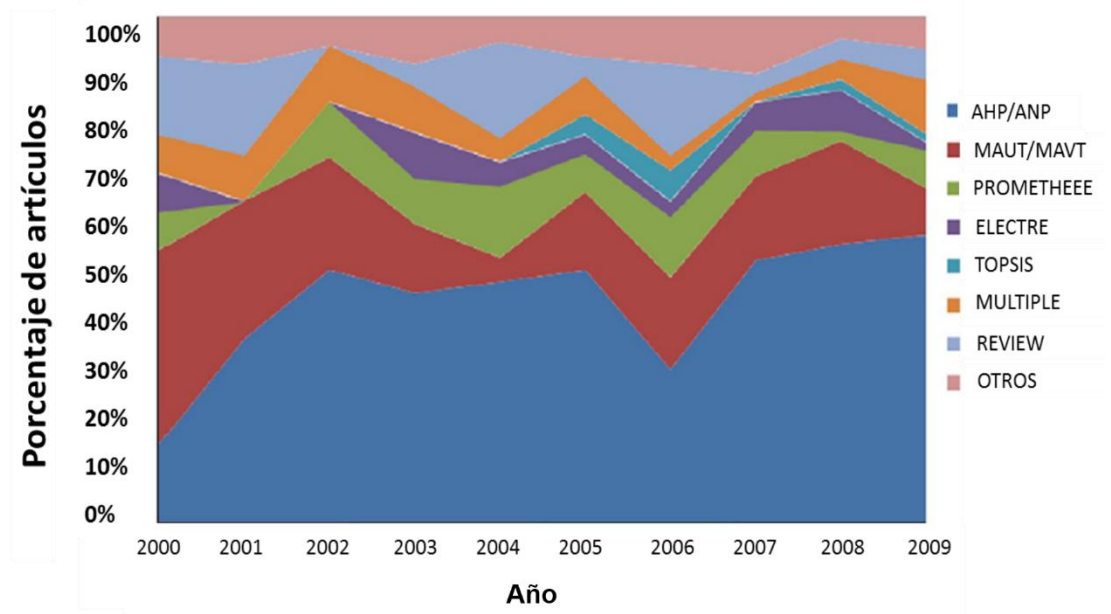


Figura 9. Porcentaje de artículos ambientales según herramienta utilizada

Fuente: (Huang et al., 2011)

Según los resultados de la investigación mencionada anteriormente, la metodología AHP es una de las más aplicadas en el campo ambiental, en adición a esto, (Rao et al., 2014) utiliza esta herramienta para la selección de tecnología de generación de Biogás; sin embargo a medida que se evalúa la aplicación de esta herramienta, algunos investigadores han venido planteando su preocupación por las bases teóricas del AHP específicamente en la Conferencia Internacional de Ingeniería Industrial y Operaciones Gestión de Bali, Indonesia (Banwet y Majumdar, 2014).

Con el fin de complementar el AHP, han surgido algunas combinaciones entre herramientas multicriterio, tales como la AHP-TOPSIS, donde el AHP se aplica para obtener los pesos de criterios según la opinión de los expertos y la clasificación final de las soluciones se obtiene a través del TOPSIS (Prakash y Barua, 2015), según (Informaria, 2016) la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA) ha otorgado el VI Premio al Mejor trabajo científico sobre residuos sólidos urbanos a Beñat Prieto Saralegui, por el trabajo Optimización de la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

en la Mancomunidad de San Markos mediante herramientas multicriterio, donde se realiza la aplicación de la herramienta AHP-TOPSIS (Prieto, 2015).

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, se escoge la herramienta AHP-TOPSIS para el proceso de selección de la tecnología de digestión anaerobia adecuada para el desarrollo de este trabajo de investigación.

6 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA MULTICRITERIO AHP-TOPSIS.

6.1 Supuestos operacionales y financieros

- a) La recolección de los residuos sólidos en Colombia actualmente no cuentan con un sistema que permita la separación de los mismos entre biodegradables y no biodegradables, para la generación del Biogás es necesario que ambos estén totalmente separado, por ende se trabajará bajo el supuesto de que los biodegradables están totalmente separados de los no biodegradables por lo tanto el proceso no se verá afectado por materiales como papel, metales, plástico etc.
- b) Los costos son presentados en dólares estadounidenses teniendo en cuenta que las cotizaciones se tomaron de diferentes países, por lo cual fue necesario llevarlas a una base común, se escogió la estadounidense debido a que es la principal moneda de referencia a nivel mundial según el Fondo Monetario Internacional FMI.
- c) No se consideran el pago de aranceles ni impuestos contemplados fuera de las cotizaciones realizadas en los diferentes artículos y trabajos de grado, debido a que el interés se basa en la teoría investigativa y no en la implementación práctica.

Considerando la metodología, se aplicó la herramienta AHP- TOPSIS al problema planteado en el trabajo de investigación teniendo en cuenta los aspectos claves para que la recopilación de los datos utilizados.

6.2 Descripción de los criterios

Los criterios considerados para la aplicación de la herramienta, se seleccionaron a partir de la revisión de 10 estudios similares y pertinentes (Ver *tabla 3*), seleccionados de la bibliografía consultada durante la estructuración de este documento, teniendo en cuenta solamente aquellos en los que se mencionaban factores y criterios relacionados directamente con la

selección de algún tipo de digestor, y publicados dentro del intervalo de tiempo del año 2010 a la fecha; durante dicha revisión se obtuvieron 6 criterios principales los cuales al realizar la sumatoria lograron una puntuación igual o superior a 5 puntos, teniendo en cuenta la asignación del valor “1” para los criterios relacionados con cada artículo, y “0” en el caso contrario.

6.2.1 C1: Vida útil

Las tecnologías en estudio presentan entre 5 y 20 años de durabilidad, para cada tipo de digestor se debe considerar la vida útil teniendo en cuenta la calidad de los materiales utilizados para la construcción del mismo. La tecnología que dura menos es la del digestor tubular puesto que el tipo de material utilizado para la realización del mismo es plástico mientras que los otros se construyen con cemento, ladrillos, metal y otros materiales que presentan mayor durabilidad (Lugones. B, 2003).

6.2.2 C2: Costos de inversión

Para este criterio se considera que la alternativa ideal es aquella que haga referencia al costo de inversión más bajo, y por ende, el no ideal corresponde al digestor que requiera mayor inversión inicial para su funcionamiento. Para cada uno de los digestores, se encontraron valores en diferentes monedas, fueron tomados aquellos que se obtuvieron en dólares a través de la bibliografía consultada (Ríos Cerón, J.A, 2012). El digestor que requiere mayor inversión es el modelo Hindú, teniendo en cuenta información obtenida durante la consulta de la bibliografía, y el que requiere menor inversión es el tubular debido a que su construcción se realiza con un material poco costos frente a los materiales de los demás digestores (plástico) (Botero & Preston, 1987). Los datos son resumidos en la tabla 4 valoraciones de alternativas. Una descripción más detallada de los costos y materiales de construcción de cada uno de los reactores se encuentra en los anexos 6.7 al 6.10.

Tabla 3. Revisión de estudios similares y pertinentes a la investigación

Artículo	Vida útil	Costo de inversión	Costos de Mantenimiento	Aprovechamiento M.O	Método de carga y descarga	Materiales utilizados	Tiempo de retención	Conductividad térmica	Periodo de retorno
1. A review on industrial scale anaerobic digestion systems deployment in Malaysia: Opportunities and challenges.	0	0	0	1	0	0	0	1	0
2. Diseño, construcción puesta en operación de un digestor anaerobio continuo para el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana.	1	1	1	0	1	0	1	1	0
3. Experimental Factors Affecting the Production of Biogas during Anaerobic Digestion of Biodegradable Waste.	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás.	1	1	1	1	1	0	0	1	0
5. Manual del Biogás.	0	0	0	1	1	0	1	1	0
6. Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de digestores para el sector cooperativo campesino.	0	1	0	0	1	0	1	0	0
7. Montaje puesta en marcha de dos digestores anaerobios con residuos orgánicos generados en la central de mercado “Plaza central Kennedy” en Bogotá.	1	1	1	1	1	1	0	1	0
8. Multi-criteria analysis of alternative biogas technologies.	1	1	1	1	0	0	0	1	1
9. Sistema digestor para el tratamiento de desechos orgánicos.	0	0	0	1	1	0	1	1	0
10. Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos FORSU.	1	0	1	1	1	0	0	1	0
Total	5	5	5	7	7	1	4	9	1

6.2.3 C3: Costos de operación

Es necesario examinar detenidamente los nuevos digestores, para comprobar que no tienen fugas ni filtraciones, deben verificarse y probarse antes de ponerse en marcha. Cuando un digestor ya tiene más de un año de uso, se le debe hacer mantenimiento verificando su impermeabilidad y sellado. (Guevara, 1996). El lodo que se sedimenta en el fondo del digestor debe ser removido cada dos años, la tubería sirve para evacuar estos lodos por mecanismos como bombeo.

Los costos de operación más altos son los del digestor de cúpula móvil, esto debido a que la parte metálica está siempre en contacto con sustancias corrosivas, lo que hace necesario que este mecanismo sea cubierto con pintura anticorrosiva como mínimo una vez al año. El digestor de bolsa es de los más propensos a sufrir daños externos, por eso se encuentra como uno de los más costosos en lo que a mantenimiento se refiere, por último se encuentran el digestor de cúpula fija y el Olade Guatemala que su construcción en concreto hace que los costos de operación sean de los más bajos del grupo.

En la tabla 4 se presenta una comparación de costos encontrada en la literatura.

Tabla 4. Costos de Operación por digestor.

Alternativa	Costos de operación (US\$/año)
Chino (Cúpula Fija)	19
Hindú (Campana Flotante)	38
Taiwán (Tubular)	23
Olade (Batch)	11

Fuente: (Lasso, 2008)

6.2.4 C4: Aprovechamiento de la materia orgánica

En lo referente al digestor, los que producen más gas son los reactores batch, luego los semicontinuos y por último los continuos, dependiendo también del material de carga y de los volúmenes de desechos que se va a

tratar (Guevara, 1996). En este caso los digestores que más producen son el Olade de Guatemala y el tubular, ambos con un valor de $1\text{m}^3.\text{Kg}^{-1}$.

6.2.5 C5: Conductividad térmica

Este factor afecta directamente la temperatura interna del biodigestor, la cual es importante para la efectividad del proceso y la calidad del producto resultante, es importante tener en cuenta que entre más alta sea la temperatura del digestor más efectivo es el proceso (Lopez & Lopez, 2009), esto se debe a la alta susceptibilidad que tienen los microorganismos a los cambios bruscos de temperatura. La conductividad térmica de los materiales que participan en los sistemas de digestión, son mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Conductividad térmica de los materiales para construcción de digestores

MATERIAL (digestor)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/(m*k))
Cemento (Chino e Hindú)	1,047
Ladrillo (Olade)	0.658
Poliestireno (Taiwán)	0,157

Fuente: Boletín Informático de la Construcción.

6.2.6 C6: Método de carga y descarga

Para este criterio se considera que entre mayor sea el número de días para la carga y descarga el sistema es más eficiente debido a que las interrupciones durante el proceso de digestión son menores, por ende el sistema logra avanzar de manera más eficiente (Masood, 2013). En la tabla 6 se presenta el tiempo en días para cada tipo de digestor.

Tabla 6. Tiempo entre carga y descarga (días)

Alternativa	Tiempo entre carga y descarga (días)
Chino	90
Hindú	60
Taiwán	60
Olade	120

Fuente: (Solari, 2004)

6.3 Valoración de alternativas

Durante el diseño del digestor es necesario tener en cuenta tanto las condiciones del lugar donde se instalará el mismo como a la finalidad de la tecnología con los diferentes enfoques socioeconómicos, técnicos y ambientales, de donde se desprenden los criterios seleccionados. Conociendo entonces la región, la localidad, y el lugar donde se va a ubicar el digestor, y en función a la materia orgánica que se dispone que se va a tratar, o de acuerdo a las necesidades de producción, se seleccionará la tecnología más adecuada, teniendo presente una secuencia o flujo que permita tener una idea clara de cada uno de los parámetros requeridos para la correcta funcionalidad del sistema, los factores asociados a cada uno de los digestores evaluados en el proceso de selección de este trabajo de investigación se observan en la (Ver tabla 7).

Tabla 7. Valoración de Alternativas

Criterio/ Alternativa	C1 (Años)	C2 (US\$)	C3 (US\$/Año)	C4 (M³/Kg)	C5 W/(m*k)	C6 (Días)
A1_Chino	20	180	19	0.4	1.047	90
A2_Hindú	20	290	38	0.6	1.047	60
A3_Taiwán	5	66	23	1	0.157	60
A4_Olade	15	156	11	1	0.658	120

La ilustración 10 resume el planteamiento del modelo de la herramienta AHP-TOPSIS, aplicado en el caso de estudio.

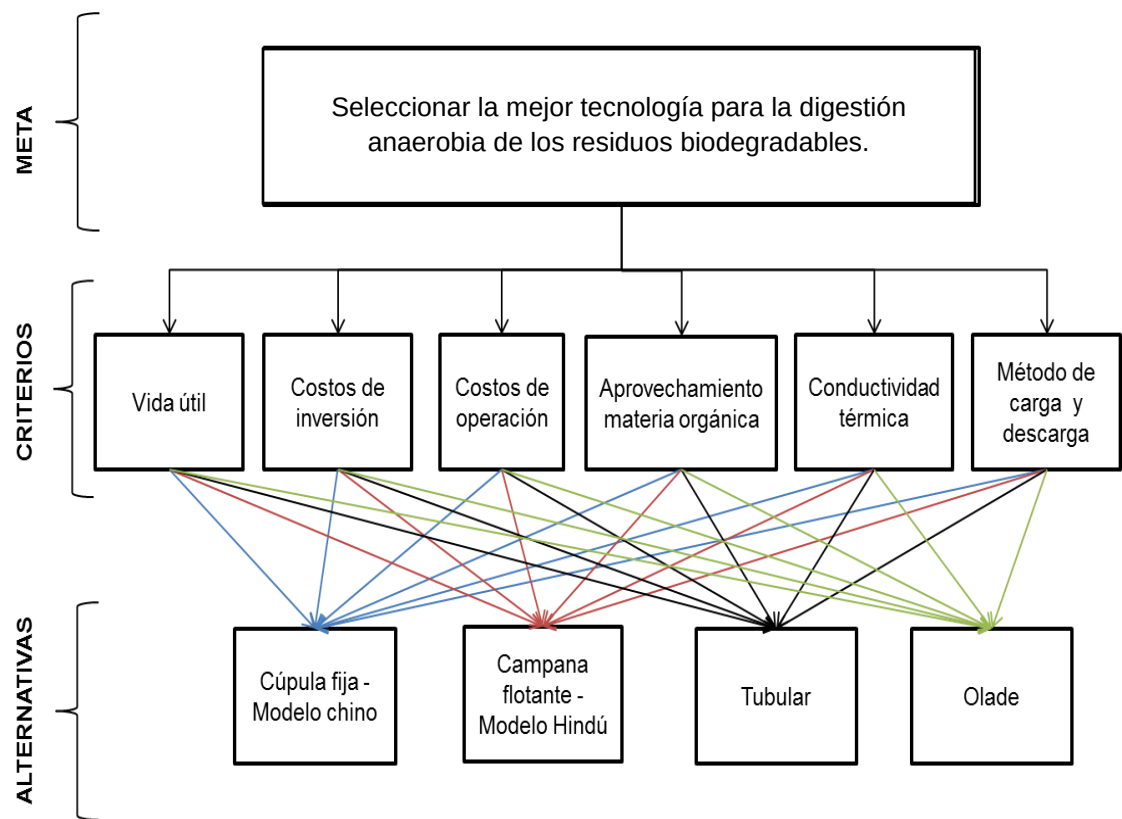


Figura 10. Modelo TOPSIS según caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Basado en: (Cendales & Castañeda, 2009)

Para la ponderación de los criterios, fue necesario contar con el juicio de expertos en temas ambientales y de desarrollo de tecnologías para el manejo de residuos sólidos.

Se consultó a expertos en el campo, los cuales fueron escogidos teniendo en cuenta el registro de investigaciones y estudios realizados sobre el tema en cuestión, para este caso se tuvo la participación de 3 expertos. La metodología consistió, en que cada uno de los expertos realizó la comparación por pares de cada uno de los criterios presentados, la descripción de los expertos y la encuesta realizada se presentan en el anexo 3, las respuestas de las encuestas son utilizadas en el primer paso de la aplicación de la herramienta seleccionada.

6.4 Elaboración de las matrices

Inicialmente se realiza la calificación de criterios por pares con la herramienta AHP, utilizando los valores otorgados por los expertos para cada uno de ellos, según la escala propuesta por (Saaty, 1980) (*Ver tabla 8*). En la tabla 9 se consignan los datos de la comparación por pares elaborada por el primer experto, la cual es normalizada en la tabla 10 y posteriormente se obtiene el vector prioridad en la tabla 13, el cual da a conocer los pesos de cada uno de los criterios según este experto.

Tabla 8. Escala de Saaty

ESCALA DE SAATY PARA MODELOS AHP (1)	
Valor	Definición
1	Si A y B son igual de importantes
3	Si A es ligeramente más importante que B
5	Si A es fuertemente más importante que B
7	Si A es muy fuertemente más importante que B
9	Si A tiene una extrema importancia sobre B
Los números 2,6,4,8 y sus recíprocos son valores intermedios para facilitar la comparación cuando dos juicios difieren ligeramente	

Fuente: <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2008/amr/Proceso%20de%20Análisis%20Jerarquico.htm>

Se utilizó la media geométrica para calcular una matriz de criterios consolidada teniendo en cuenta la calificación de cada uno de los expertos, adicionalmente se evaluó el coeficiente de consistencia de la matriz, esto debido a la posibilidad de que exista cierto nivel de inconsistencia en el juicio de los expertos, como se puede ver en el archivo adjunto de Excel, esta matriz tuvo un coeficiente de consistencia de 8.63%, lo cual se considera aceptable dentro de la metodología AHP, de dicha matriz consolidada se obtuvieron los pesos para cada uno de los criterios y de esta manera ser utilizados adecuadamente en la parte correspondiente al TOPSIS (*Ver tabla 9*).

Tabla 9. Matriz de criterios consolidada.

Matriz de criterios (EXPERTOS 1-2-3)		
	Criterios	Peso
C1	Vida Útil	14.71%
C2	Costo de Inversión	24.15%
C3	Costo de Operación	10.10%
C4	Aprovechamiento de la Materia Orgánica	37.52%
C5	Conductividad Térmica	6.04%
C6	Método de carga y descarga	7.49%

6.4.1 Normalización matriz de decisión

El primer paso para la aplicación de TOPSIS es normalizar la matriz de decisión consignada en la tabla 10, elevando cada uno de los valores al cuadrado, sumando los cuadrados obtenidos por cada criterio y sacando la raíz cuadrada a dicha sumatoria (*Ver ecuación 1*), es importante mencionar que existen diversas maneras de normalizar este tipo de matrices, para este caso se usará el procedimiento anteriormente descrito, los resultados de la operación son mostrados en la tabla 11.

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}$$

Ecuación 1. Normalización

Tabla 10. Matriz de decisión

Criterio/ Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Alt 1	20	180	19	0.4	1.047	90
Alt 2	20	290	38	0.6	1.047	60
Alt 3	5	66	23	1	0.157	60
Alt 4	15	156	11	1	0.658	120

Tabla 11. Matriz de decisión normalizada

Criterio i/ Alternativa j	n_{ij}					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Alt. 1	0.62	0.47	0.38	0.25	0.64	0.52
Alt. 2	0.62	0.76	0.77	0.38	0.64	0.35
Alt. 3	0.15	0.17	0.46	0.63	0.10	0.35
Alt. 4	0.46	0.41	0.22	0.63	0.40	0.70

6.4.2 Ponderación matriz normalizada

Para la realización del paso 2, se multiplica cada valor n_{ij} obtenido en el paso anterior, por el peso del criterio correspondiente (Ver ecuación 2) donde se obtiene el valor ponderado consignado en la tabla 12.

$$\bar{v}_{ij} = w_j * \bar{n}_{ij}$$

Ecuación 2. Normalización ponderada

Tabla 12. Matriz normalizada ponderada

Criterio i/ Alternativa j	$\bar{v}_{ij}$					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Alt. 1	0.09	0.11	0.04	0.09	0.04	0.04
Alt. 2	0.09	0.18	0.08	0.14	0.04	0.03
Alt. 3	0.02	0.04	0.05	0.24	0.01	0.03
Alt. 4	0.07	0.10	0.02	0.24	0.02	0.05

6.4.3 Determinación de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

El objetivo de este paso es encontrar la solución ideal positiva y la solución ideal negativa a partir de todas las alternativas para cada criterio, dichos valores aparecen en la tabla 13 (Ver ecuaciones 3 y 4).

$$\bar{A}^+ = \{(max \bar{v}_{ij})(min \bar{v}_{ij})\}$$

Ecuación 3. Solución ideal positiva

$$\bar{A}^- = |\{(min \bar{v}_{ij})(max \bar{v}_{ij})\}|$$

Ecuación 4. Solución ideal negativa

Donde A+ es el conjunto de valores ideales positivos y A- es el conjunto de valores ideales negativos (Mellinas, 2012).

Tabla 13. Soluciones ideales Positiva - Negativa

	C1: MAX	C2: MIN	C3: MIN	C4: MAX	C5: MAX	C6: MAX
Ideal positiva	0.09	0.04	0.02	0.24	0.04	0.05
Ideal negativa	0.02	0.18	0.08	0.09	0.01	0.03

6.4.4 Calculo de las medidas de distancias

La separación de cada alternativa de la solución ideal positiva A+ y negativa A- son las que aparecen en la tablas 14 y 15 respectivamente, aplicando las ecuaciones 4 y 5 para calcular ambas distancias.

Tabla 14. Medida de distancia a la PIS

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Σ
Alt. 1	0.0000	0.0052	0.0003	0.0201	0.0000	0.0002	0.0258
Alt. 2	0.0000	0.0201	0.0030	0.0089	0.0000	0.0007	0.0328
Alt. 3	0.0046	0.0000	0.0006	0.0000	0.0011	0.0007	0.0070
Alt. 4	0.0005	0.0033	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0040

De esta manera se calculan las distancias de cada una de las alternativas planteadas hacia las soluciones ideales positivas y negativas, en este caso utilizando la distancia métrica euclídea (Prakash y Barua, 2015).

$$\bar{d}_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_{i+})^2}$$

Ecuación 5. Distancia a la solución ideal positiva

$$\bar{d}_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_{i-})^2}$$

*Ecuación 6. Distancia a la solución ideal negativa
(Prakash y Barua, 2015)*

Tabla 15. Medida de distancia a la NIS

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Σ
Alt. 1	0.0046	0.0049	0.0015	0.0000	0.0011	0.0002	0.0123
Alt. 2	0.0046	0.0000	0.0000	0.0022	0.0011	0.0000	0.0080
Alt. 3	0.0000	0.0201	0.0009	0.0201	0.0000	0.0000	0.0412
Alt. 4	0.0021	0.0072	0.0030	0.0201	0.0003	0.0007	0.0334

Se calcula la raíz cuadrada de las sumatorias obtenidas en cada alternativa, obsérvese los resultados obtenidos en la tabla 16.

Tabla 16. PIS - NIS por alternativa

	Distancias	
	Positiva	Negativa
Alt. 1	0.1605	0.1107
Alt. 2	0.1811	0.0892
Alt. 3	0.0837	0.2030
Alt. 4	0.0631	0.1829

6.4.5 Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

Finalmente, se calcula el índice de similaridad, aplicando la ecuación 7 ya que algunas alternativas disponen de una distancia más corta respecto de la solución ideal positiva pero otras se encuentran más lejos de la solución ideal negativa, los resultados finales se encuentran en la tabla 17.

$$Ri = \frac{\bar{d}_i^-}{(\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-)}$$

Ecuación 7. Índice de similaridad.

Tabla 17. Proximidad relativa de las alternativas

	Ri	Clasificación
Alt. 1	0.408201	3
Alt. 2	0.330084	4
Alt. 3	0.708014	2
Alt. 4	0.743578	1

6.5 Resultado

Mediante la aplicación de la herramienta multicriterio escogida, se obtiene que la mejor alternativa de todas las evaluadas, es la del digestor Olade de Guatemala, esta decisión logra ser obtenida teniendo en cuenta que esta

tecnología es 46,20% más económica que la tecnología del modelo Hindu, el más costoso, por otro lado su aprovechamiento de la materia prima, comparte con el modelo taiwanés, el valor más alto en la matriz de decisión, por otro lado, el tipo de material requerido para su construcción aporta una conductividad térmica adecuada para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia. Frente a los otros criterios que tienen menor impacto en la metodología pero también influyen sobre la decisión final, está relativamente bien posicionado como se ve puede observar en la tabla 10.

Los resultados presentados muestran que para el estudio presentado la mejor alternativa está dada por el tipo de digestor Olade de Guatemala, aunque las tecnologías con modelos chinos e hindúes son las más antiguas utilizadas, en este caso particular se observó que considerando los criterios valorados por los expertos que participaron en el proceso de investigación actualmente han venido siendo despojadas de los sitios más altos en el escalafón de mejores tecnologías para el proceso de digestión, algunas causas se pueden analizar con la relación costo – beneficio puesto que son tecnologías caras pero no son las más eficientes y productivas.

7 CONCLUSIONES

En la actualidad los biocombustibles han ido adquiriendo cada vez más importancia, a diario se ven los esfuerzos de los países por reducir la emisión de gases invernadero que conllevan al calentamiento global, a pesar de esto la gran influencia que tienen los digestores en el mejoramiento de las condiciones sanitarias de la población, la preservación de medio ambiente y la producción de biogás, en el país muy poco se conoce de ellos.

El biogás puede tener diferentes usos, desde enviarse directamente a las tuberías de gas doméstico para ser usado por las comunidades en la cocción de los alimentos, puede ser utilizado igualmente como combustible en quemadores para la calefacción de los hogares, para la iluminación mediante lámparas incandescentes, puede ser usado también como combustible único para refrigeradores, calentadores de agua y secadores de granos.

A nivel global existen diferentes tipos de digestores anaerobios, no solo los trabajados en este documento, lo cual indica que los resultados aquí obtenidos no son definitivos pero podrían ser utilizados para mejorar procedimientos futuros y contribuir en la implementación de posibles sistemas para el tratamiento de residuos en la región.

Los métodos de decisión multicriterio son herramientas de importancia que procuran generar consenso en contextos complejos de decisión. Se pueden aplicar este tipo de técnicas a casos en los que sea necesaria la convergencia de intereses, opiniones y puntos de vista de diferentes grupos o personas como lo fue en este trabajo de investigación. Esto permite que todas las partes posiblemente interesadas participen en el proceso de toma de decisión.

Como resultado de la unión entre la metodología multicriterio escogida y las alternativas presentadas en este trabajo de investigación se obtuvo que la cantidad y calidad del biogás es un factor con alta relevancia en la decisión a considerar, sin dejarse nunca de lado el factor económico.

El resultado de este trabajo de grado, según los criterios seleccionados por los expertos, presenta que la mejor alternativa es la del digestor Olade Guatemala, a pesar de esto, si se analiza la puntuación de dicho resultado con respecto a la de los demás digestores se puede observar que la brecha no es demasiado amplia, por lo cual se podría considerar la existencia de otra opción factible que satisfaga casi completamente cada uno de los criterios. Por lo anterior es prudente considerar que para trabajos futuros se utilice un mayor número de expertos, además de aplicar diferentes escenarios teniendo en cuenta los puntos de vista de la comunidad, inversionistas e investigadores parciales con el fin de diversificar los resultados a obtener.

8 REFERENCIAS

- Alcaldia Santiago de Cali. (2009). *Evaluación y ajuste del plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS 200 -2009*.
- Aragónés, P., Chaparro, F., Pastor, J., & Rodríguez, F. (2009). Selección de proyectos de energía solar fotovoltaica mediante proceso analítico en red.
- Aseo, S. d. (2013). *Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- Atmacaa, E., & Basarb, H. B. (2012). Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP).
- Ayala, M., & Murcia, D. (2006). Indicadores de gestión ambiental para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica en el Salvador.
- Catedra BP. (2014).
- Cumbre de Johannesburgo. (2012).
- Fernández, J. L. (2010). La basura como recursos energético. Situación actual y prospectiva en México. *Revista de Ingeniería Civil*, 4.
- Garavito, S. C. (2009). VALIDACION MODELO PROCESO ANALÍTICO DE REDES PAR.
- Garavito, S. C. (2009). *Validación proceso analítico de redes*. Bogota, D.C.
- Garavito, S. C. (2009). Validación proceso analítico de redes.
- Gómez, P. G. (2010). Una propuesta metodológica para la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico en la selección de aerogeneradores.
- Greenpeace. (2011). Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución. *Campaña contra la contaminación*.
- Informaria. (9 de Mayo de 2016). La UNIA concede el VI Premio al Mejor trabajo científico sobre RSU al ingeniero Beñat Prieto. *Informaria Digital*.
- International Energy Agency. (2010). Resumen ejecutivo. *World Energy Outlook*, 4.
- Lopez, C., & Lopez, O. (2009). Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Veracruzana de .
- Masood, F. (2013). *Solid Wastes Use as an Alternate Energy Source in Pakistan*.

- Mellinas, M. J. (2012). Análisis Comparativo de Técnicas de generación eléctrica; AHP y TOPSIS Fuzzificado. 301.
- Nixona, J., Deyb, P., Ghoshc, S., & Daviesa, P. (2013). Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process.
- Pablo Aragonés-Beltrán, F. C.-G.-P.-F. (2014). An ANP-based approach for the selection of photovoltaic solar power plant. *Elsevier*.
- Pablo Cesar Manyoma Velásquez, M. A. (28 de Febrero de 2013). *Localización de depósitos internos para residuos sólidos hospitalarios utilizando técnicas multicriterio*. Santiago de Cali.
- Paterson, M. (2010). *Guía sobre el Biogás desde la producción hasta el uso*. Obtenido de biogasportal.info: biogasportal.info
- Raheem, A., Mohammad, Y. H., & Shaakor, R. (2016). Bioenergy from anaerobic digestion in Pakistan: Potential,.
- Rojas, E. (2009). Evaluación tecnológica y diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento del potencial energético de los residuos del café.
- Ulutaş, B. H. (2004). Determination of the appropriate energy policy for Turkey.
- UNAL. (15 de Agosto de 2013). *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/rellenos-sanitarios-urgen-de-gestion-integral-de-residuos.html>
- Velásquez, P. C., Colorado, M. L., & Lozada, P. T. (2013). Localización de depositos internos para residuos sólidos hospitalarios utilizando técnicas mult tricriterio. *Revistas científicas*.
- Vinasco, J. P. (2004). TECNOLOGÍA DEL BIOGAS. *Universidad del Valle- Facultad de Ingeniería*, 7-10.
- WWDR. (2014). Informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hidricos en el mundo. *Water and Energy*, 1.

9 ANEXOS

9.1 Anexo 1: Información Expertos

Experto 1.

Funcionaria actual en la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria CIPAV

- **Formación Académica**

Doctorado Universidad Tecnológica De Pereira – Utp en Ciencias Ambientales

Maestría/Magister Pontificia Universidad Javeriana - Puj - Sede Bogotá en Desarrollo Sostenible de Sistemas Agra

Pregrado/Universitario Universidad del Valle – Univalle Bióloga genética

- **Líneas de investigación**

Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria

Sistema de descontaminación productiva

Producción de organismos acuáticos (caracoles, plantas, microalga)

Impacto de la ganadería y otros usos del suelo

- **Estudios Relacionados con el Tema**

Evaluación de un sistema de descontaminación basado en biodigestores y plantas acuáticas.

Producción de bioabono a partir de Buchón de agua de la Reserva Natural Poso Verde usando hongos Basidiomycetes.

Aspectos importantes al introducir biodigestores en explotaciones lecheras a pequeña escala.

Evaluación de biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino.

Experto 2.

Funcionaria actual en el ICONTEC.

- **Formación Académica**

Ingeniera Química - Universidad del Valle

- **Líneas de Especialización e Investigación.**

Procesos Ambientales

Tratamiento biológico de Gases

Biodegradación

Tratamiento biológico

- **Estudios Relacionados con el tema**

Apoyo técnico en estudio realizado en la empresa PAVCO de Occidente para evaluar la viabilidad de la construcción de plantas de digestión a partir de los residuos de resina producidos en la planta.

Experto 3.

Funcionario actual de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.

- **Formación Académica**

Ingeniera Sanitaria y Ambiental - Universidad del Valle

- **Líneas de Especialización e Investigación.**

Procesos Ambientales

Tratamiento biológico de Gases

Biodegradación

Tratamiento biológico

- **Estudios Relacionados con el tema**

Estudio cinético de la biodegradación de vapores BTXs en reactores "BATCH" fundamento para la mejora de los procesos en un biofiltro percolado SM Lozano Caicedo. Universidad del Valle, Biblioteca digital, Ingeniería Sanitaria y Ambiental: [39]

9.2 Anexo 2: Modelo de la encuesta realizada a los Expertos:



UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero(a) Industrial
Anlly Licet Barona Balanta – Yesid Torres Álvarez

TEMA: SELECCIÓN DE LA MEJOR TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN RELLENO SANITARIO

Introducción: El trabajo consiste en seleccionar la mejor tecnología para generar biogás mediante un proceso de digestión anaeróbica, existen ciertas características de los digestores que son claves a la hora de generar el Biogás, por lo tanto se consideran seis (6) criterios mostrados en la tabla 1, previamente seleccionados por el grupo de trabajo para la aplicación de la herramienta multicriterio con lo que se seleccionará la mejor alternativa. El grupo de trabajo desea conocer la opinión de los expertos, sobre la importancia que debe tener cada criterio dentro del proceso de selección, dicha opinión se considera como una guía para la asignación de las puntuaciones del grupo de trabajo.

Para lo anterior, se solicita comedidamente a los expertos que responda el siguiente cuestionario teniendo en cuenta las indicaciones presentadas.

NOMBRE COMPLETO:

PROFESIÓN:

EXPERIENCIA:

CRITERIOS DE DECISIÓN TECNOLOGÍAS DIGESTIÓN ANAEROBIA	
Variable asignada	Descripción
C1	Vida útil
C2	Costo de inversión
C3	Costos de operación
C4	Aprovechamiento de la MO
C5	Conductividad térmica
C6	Método de carga descarga

Tabla 1: Criterios decisión tecnologías digestión anaerobia

Durante la asignación de los valores por parte de cada uno de los expertos se debe tener en cuenta la escala de Saaty mostrada en la tabla 2.

ESCALA DE SAATY PARA MODELOS AHP (1)	
Valor	Definición
1	Si A y B son igual de importantes
3	Si A es ligeramente más importante que B
5	Si A es fuertemente más importante que B
7	Si A es muy fuertemente más importante que B
9	Si A tiene una extrema importancia sobre B
Los números 2,6,4,8 y sus recíprocos son valores intermedios para facilitar la comparación cuando dos juicios difieren ligeramente	

(1) <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2008/amr/Proceso%20de%20Análisis%20Jerarquico.htm>

Tabla 2: Escala de Saaty

Los valores considerados deben ser consignados en la tabla 3, respondiendo al cuestionario 1.

Matriz de criterios						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1					
C2		1				
C3			1			
C4				1		
C5					1	
C6						1
Σ						

Tabla 3: Matriz de criterios

CUESTIONARIO 1

1. VIDA ÚTIL

1.1 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “vida útil” frente al criterio costo de inversión?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La vida útil es ligeramente más importante que la inversión
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La vida útil es fuertemente más importante que la inversión
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La vida útil es muy fuertemente más importante que la inversión
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La vida útil tiene una extrema importancia sobre la inversión

1.2 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “vida útil” frente al criterio costos de operación?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La vida útil es ligeramente más importante que los costos de operación

- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La vida útil es fuertemente más importante que los costos de inversión
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La vida útil es muy fuertemente más importante que los costos de inversión
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La vida útil tiene una extrema importancia sobre los costos de inversión

1.3 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “vida útil” frente al criterio aprovechamiento de la materia orgánica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La vida útil es ligeramente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La vida útil es fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La vida útil es muy fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La vida útil tiene una extrema importancia sobre el aprovechamiento de la materia orgánica.

1.4 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “vida útil” frente al criterio conductividad térmica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La vida útil es ligeramente más importante que la conductividad térmica
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La vida útil es fuertemente más importante que la conductividad térmica
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La vida útil es muy fuertemente más importante que la conductividad térmica

- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La vida útil tiene una extrema importancia sobre la conductividad térmica

1.5 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “vida útil” frente al criterio método de carga y descarga?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La vida útil es ligeramente más importante que el método de carga y descarga.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La vida útil es fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La vida útil es muy fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La vida útil tiene una extrema importancia sobre el método de carga y descarga

2. COSTO DE INVERSIÓN

2.1 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costo de inversión” frente al criterio vida útil?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El costo de inversión es ligeramente más importante que la vida útil
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El costo de inversión es fuertemente más importante que la vida útil
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El costo de inversión es muy fuertemente más importante que la vida útil
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El costo de inversión tiene una extrema importancia sobre la vida útil

2.2 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costo de inversión” frente al criterio costos de operación?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El costo de inversión es ligeramente más importante que los costos de operación
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5 El costo de inversión es fuertemente más importante que los costos de operación
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El costo de inversión es muy fuertemente más importante que los costos de operación
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9 El costo de inversión tiene una extrema importancia sobre los costos de operación

2.3 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costo de inversión” frente al criterio aprovechamiento de la materia orgánica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de inversión es ligeramente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El criterio costos de inversión es fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El criterio costos de inversión es muy fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El criterio costos de inversión tiene una extrema importancia sobre el aprovechamiento de la materia orgánica.

2.4 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costos de inversión” frente al criterio conductividad térmica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3

- c) 3- El criterio costos de inversión es ligeramente más importante que la conductividad térmica
- d) 4- Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El criterio costos de inversión es fuertemente más importante que la conductividad térmica
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El criterio costos de inversión es muy fuertemente más importante que la conductividad térmica
- h) 8- Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El criterio costos de inversión tiene una extrema importancia sobre la conductividad térmica

2.5 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costos de inversión” frente al criterio método de carga y descarga?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de inversión es ligeramente más importante que el método de carga y descarga.
- d) 4- Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El criterio costos de inversión es fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7 El criterio costos de inversión es muy fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- h) 8- Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El criterio costos de inversión tiene una extrema importancia sobre el método de carga y descarga

3. COSTOS DE OPERACIÓN

3.1 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costos de operación” frente al criterio vida útil?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de operación ligeramente más importante que la vida útil
- d) 4- Difieren ligeramente entre 3 y 5

- e) 5- El criterio costos de operación fuertemente más importante que la vida útil
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El criterio costos de operación muy fuertemente más importante que la vida útil
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El criterio costos de operación tiene una extrema importancia sobre la vida útil

3.2 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costo de operación” frente al criterio costos de operación?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de operación ligeramente más importante que los costos de operación
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5 El criterio costos de operación fuertemente más importante que los costos de operación
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El criterio costos de operación es muy fuertemente más importante que los costos de operación
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9 El criterio costos de operación tiene una extrema importancia sobre los costos de operación

3.3 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costos de operación” frente al criterio aprovechamiento de la materia orgánica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de operación es ligeramente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El criterio costos de operación es fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7

- g) 7- El criterio costos de operación es muy fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica.
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El criterio costos de operación tiene una extrema importancia sobre el aprovechamiento de la materia orgánica.

3.4 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costos de operación” frente al criterio conductividad térmica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de operación es ligeramente más importante que la conductividad térmica
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El criterio costos de operación es fuertemente más importante que la conductividad térmica
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El criterio costos de operación es muy fuertemente más importante que la conductividad térmica
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El criterio costos de operación tiene una extrema importancia sobre la conductividad térmica

3.5 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “costos de operación” frente al criterio método de carga y descarga?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El criterio costos de operación es ligeramente más importante que el método de carga y descarga.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El criterio costos de operación es fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7 El criterio costos de operación es muy fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9

- i) 9- El criterio costos de operación tiene una extrema importancia sobre el método de carga y descarga

4. APROVECHAMIENTO DE LA MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE

4.1 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “aprovechamiento de la materia orgánica” frente al criterio vida útil?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El aprovechamiento de la materia orgánica es ligeramente más importante que la vida útil
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El aprovechamiento de la materia orgánica es fuertemente más importante que la vida útil
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El aprovechamiento de la materia orgánica es muy fuertemente más importante que la vida útil
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El aprovechamiento de la materia orgánica tiene una extrema importancia sobre la vida útil

4.2 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “aprovechamiento de la materia orgánica” frente al criterio costos de operación?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El aprovechamiento de la materia orgánica es ligeramente más importante que los costos de operación
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5 El aprovechamiento de la materia orgánica es fuertemente más importante que los costos de operación
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El aprovechamiento de la materia orgánica es muy fuertemente más importante que los costos de operación
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9 El aprovechamiento de la materia orgánica tiene una extrema importancia sobre los costos de operación

4.3 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “aprovechamiento de la materia orgánica” frente al criterio costos de operación?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El aprovechamiento de la materia orgánica es ligeramente más importante que los costos de operación
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5 El aprovechamiento de la materia orgánica es fuertemente más importante que los costos de operación
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El aprovechamiento de la materia orgánica es muy fuertemente más importante que los costos de operación
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9 – El aprovechamiento de la materia orgánica tiene una extrema importancia sobre los costos de operación

4.4 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “aprovechamiento de la materia orgánica” frente al criterio conductividad térmica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El aprovechamiento de la materia orgánica es ligeramente más importante que la conductividad térmica
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El aprovechamiento de la materia orgánica es fuertemente más importante que la conductividad térmica
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El aprovechamiento de la materia orgánica es muy fuertemente más importante que la conductividad térmica
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El aprovechamiento de la materia orgánica tiene una extrema importancia sobre la conductividad térmica

4.5 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “aprovechamiento de la materia orgánica” frente al criterio método de carga y descarga?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3

- c) 3- El aprovechamiento de la materia orgánica es ligeramente más importante que el método de carga y descarga.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El aprovechamiento de la materia orgánica es fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7 El aprovechamiento de la materia orgánica es muy fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El aprovechamiento de la materia orgánica tiene una extrema importancia sobre el método de carga y descarga

5. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

5.1 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “conductividad térmica” frente al criterio vida útil?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La conductividad térmica es ligeramente más importante que la vida útil
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La conductividad térmica es fuertemente más importante que la vida útil
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La conductividad térmica es muy fuertemente más importante que la vida útil
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La conductividad térmica tiene una extrema importancia sobre la vida útil

5.2 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “conductividad térmica” frente al criterio costo de inversión?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3

- c) 3- La conductividad térmica es ligeramente más importante que el costo de inversión
- d) 4- Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La conductividad térmica es fuertemente más importante que el costo de inversión
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La conductividad térmica es muy fuertemente más importante que el costo de inversión
- h) 8- Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La conductividad térmica tiene una extrema importancia sobre los costos de inversión

5.3 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “conductividad térmica” frente al criterio costos de operación?

- a) -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La conductividad térmica es ligeramente más importante que los costos de operación
- d) 4- Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La conductividad térmica es fuertemente más importante que los costos de operación
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La conductividad térmica es muy fuertemente más importante que los costos de operación
- h) 8- Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La conductividad térmica tiene una extrema importancia sobre los costos de operación

5.4 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “conductividad térmica” frente al criterio aprovechamiento de la materia orgánica?

- a) 1- Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La conductividad térmica es ligeramente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica
- d) 4- Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La conductividad térmica es fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica

- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- La conductividad térmica es muy fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La conductividad térmica tiene una extrema importancia sobre el aprovechamiento de la materia orgánica

5.5 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “conductividad térmica” frente al criterio método de carga y descarga?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- La conductividad térmica es ligeramente más importante que el método de carga y descarga.
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- La conductividad térmica es fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7 La conductividad térmica es muy fuertemente más importante que el método de carga y descarga
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- La conductividad térmica tiene una extrema importancia sobre el método de carga y descarga

6. MÉTODO DE CARGA - DESCARGA

6.1 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “método de carga y descarga” frente al criterio vida útil?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El método de carga y descarga es ligeramente más importante que la vida útil
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El método de carga y descarga es fuertemente más importante que la vida útil
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El método de carga y descarga es muy fuertemente más importante que la vida útil

- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El método de carga y descarga tiene una extrema importancia sobre la vida útil

6.2 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “método de carga y descarga” frente al criterio costo de inversión?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3 El método de carga y descarga es ligeramente más importante que el costo de inversión
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5 El método de carga y descarga es fuertemente más importante que el costo de inversión
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El método de carga y descarga es muy fuertemente más importante que el costo de inversión
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9 El método de carga y descarga tiene una extrema importancia sobre los costos de inversión

6.3 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “método de carga y descarga” frente al criterio costos de operación?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El método de carga y descarga es ligeramente más importante que los costos de operación
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5 El método de carga y descarga es fuertemente más importante que los costos de operación
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El método de carga y descarga es muy fuertemente más importante que los costos de operación
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9 El método de carga y descarga tiene una extrema importancia sobre los costos de operación

6.4 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “método de carga y descarga” frente al criterio conductividad térmica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El método de carga y descarga es ligeramente más importante que la conductividad térmica
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El método de carga y descarga es fuertemente más importante que la conductividad térmica
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El método de carga y descarga es muy fuertemente más importante que la conductividad térmica
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El método de carga y descarga tiene una extrema importancia sobre la conductividad térmica

6.5 ¿Qué tipo de preferencia tiene usted para el criterio “método de carga y descarga” frente al criterio aprovechamiento de la materia orgánica?

- a) 1 -Son igual de importantes
- b) 2- Difieren ligeramente entre 1 y 3
- c) 3- El método de carga y descarga es ligeramente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica
- d) 4. Difieren ligeramente entre 3 y 5
- e) 5- El método de carga y descarga es fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica
- f) 6- Difieren ligeramente entre 5 y 7
- g) 7- El método de carga y descarga es muy fuertemente más importante que el aprovechamiento de la materia orgánica
- h) 8-Difieren ligeramente entre 7 y 9
- i) 9- El método de carga y descarga tiene una extrema importancia sobre el aprovechamiento de la materia orgánica

Muchas gracias por su participación, su respuesta será incluida en el documento final del trabajo de grado.

9.3 Anexo 3: Materiales construcción Campana flotante (Modelo Hindú)

Materiales de Construcción	Cantidad
Cemento	14 quintales
Malla electro Soldada 5*150	1 u
Tubo de PVC 6" * 3 metros	1 u
Tubo de PVC 4" * 3 metros	1 u
Campana superior flotante	1 u
Arena y ripio para encofrado	5.5 m3
Excavación en roca	2.45 m3
Accesorios para tubería de gas	1 u

Costo y material requerido para la construcción de digestor hindú

Altura= 2.65 metros

Diámetro= 1.30 metros

Volumen = 2.4 metros cúbicos

9.4 Anexo 4: Materiales construcción Digestor tubular

- 32 metros de tubular en polietileno transparente, calibre 6 u 8 milésimas de pulgada, de dos metros de ancho (4 metros de circunferencia).
- 6 a 8 baldes circulares plásticos usados, con capacidad para 5 galones o 2 canecas o estaños circulares plásticos de 15 galones, a los cuales se les quitan completamente las tapas superior e inferior (quedando a manera de tubos), o en su reemplazo, 2 tubos en concreto o en greses de 12 a 18 pulgadas de diámetro por un metro de longitud.
- 3 metros de manguera plástica flexible de jardín en vinilo transparente de 1 ¼ pulgadas de diámetro.
- 1 adaptador macho en PVC de media pulgada de diámetro.
- 1 adaptador macho en PVC de una pulgada de diámetro.

- 1 adaptador hembra en PVC de una pulgada de diámetro.
- 1 tee en PVC de una pulgada de diámetro.
- 2 reducciones no roscadas (bujes), en PVC de una media pulgada de diámetro.
- 3 codos de 90 grados en tubería gris de PVC de una pulgada de diámetro.
- 1 tapón cementado (liso) en PVC para una pulgada.
- 50 cm de tubería gris (de presión) en PVC de media pulgada de diámetro.
- 60 cm (o seis niples de 10cm c/u) de tubería gris (de presión) en PVC de una pulgada de diámetro.
- Tubería en PVC para instalaciones eléctricas de una pulgada de diámetro, o en su reemplazo manguera negra en polietileno de 1 ¼ pulgadas de diámetro, en longitud suficiente para llegar desde el sitio del digestor hasta el sitio de colocación del quemador para el biogás (cocina).
- 1 frasco de limpiador y un frasco de pegante (soldadura) para PVC.
- 50 cm de tubería galvanizada de media pulgada de diámetro, roscada en ambos extremos.
- 1 codo de tubería galvanizada de media pulgada de diámetro.
- 1 niple de 10 a 12 cm en tubería galvanizada de media pulgada de diámetro, roscado en ambos extremos.
- 4 abrazaderas metálicas de cremallera con ajustes desde 1 hasta 1 ½ pulgadas.
- 1 llave de paso en bronce o de balín de media pulgada.
- 2 arandelas, preferiblemente en acrílico, madera fibra de vidrio, material sintético firme o en último caso metálicas, cuyo agujero central permita el ingreso de toda su longitud de la rosca macho en PVC de una pulgada, su diámetro total no sea menor de 10 cm y su grosor individual no sea mayor de 4 milímetros.
- 1 lápiz marcador de tinta en color oscuro (marcador indeleble industrial a gasolina) o lápiz vidriograf.
- 1 frasco en plástico transparente, sin tapa, de 3 a 4 litros de capacidad (de aceite de cocina desocupado).
- 1 lata redonda, sin el fondo, de medio galón de capacidad.

- 2 empaques de neumático, de 20x20 cm, ambos con agujero central que permita la entrada ajustada de rosca del macho en PVC de una pulgada.
- 6 correas en neumático, de aproximadamente 5 cm de ancho por 2 metros de largo cada una.
- 8 sacos usados de 40kg de capacidad, en polipropileno.

El costo total de los jornales para las obras de adecuación y de los materiales necesarios para su instalación equivale a US\$ 200. Las dimensiones pueden ser incrementadas hasta un nivel industrial, dependiendo de la cantidad de residuos disponibles y del volumen diario de biogás y de abono orgánico requeridos. (Botero Botero & Preston, 1987).

9.5 Anexo 5: Obtención del costo de inversión del Digestor de cúpula fija

Estos sistemas poseen como desventaja el alto costo de la inversión inicial; por ejemplo, una instalación de 5 m³, que permite la elaboración de alimentos para familias de cuatro personas, tiene una inversión inicial de \$700 a \$900 USD, lo que ha impedido su generalización en América Latina. (Bárbaro Lugones López)

Con estos datos se toma el costo como **180 US\$/m³**.

9.6 Anexo 6: Cotización Digestor Olade de Guatemala

Anll.barona@correounivalle.edu.co: 22/11/15

Buen día,

La presente es para solicitar de manera comedida la realización de una cotización para conocer el costo de la fabricación de un digestor Olade de Guatemala, tenemos conocimiento que su empresa fábrica esta variedad de digestores. Le agradeceríamos su ayuda, esta consulta es académica, realizada con el fin de realizar nuestro trabajo de grado.

Adjunto envío documento con información sobre el trabajo de grado.

Gracias,

Atentamente

Anlly Licet Barona Balanta

biodigestor.bioalfa@gmail.com> 26/11/15

Buena tarde, te envié las respuestas.

C1	35 -45 Años	1
C2	\$780 USD para 5 metros cúbicos	1
C3	Aproximadamente \$ 11 USD anuales	1
C4	composta, metano, agua para riego	1
C5	sin medición	
C6	carga por gravedad, descarga manual con pipeta anexa	