

VIABILIDAD TÉCNICA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA  
FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS – FORSU

Elaborado por  
Luis Alejandro Rodríguez Perdigón  
Administrador de Empresas Agropecuarias

Documento elaborado para optar al título de  
Especialista en Gestión de Residuos Sólidos

Tutor  
Ing. MSc. José Alejandro Martínez S.

Universidad EAN  
Facultad de Postgrados  
Especialización en Gestión de Residuos Sólidos  
Bogotá – Septiembre de 2014

## Contenido

| Cap.                                                                         | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| Resumen Ejecutivo.                                                           | 6    |
| 1. Antecedentes.                                                             | 7    |
| 2. Formulación del Problema.                                                 | 9    |
| 3. Justificación.                                                            | 9    |
| 4. Objetivos.                                                                | 10   |
| 4.1. Objetivo General.                                                       | 10   |
| 4.2. Objetivos Específicos.                                                  | 10   |
| 5. Marco Teórico.                                                            | 10   |
| 6. Diseño Metodológico.                                                      | 12   |
| 7. Identificación de métodos para el aprovechamiento de los residuos.        | 13   |
| 7.1 Termoquímicos.                                                           | 13   |
| 7.1.1 Combustión o Incineración.                                             | 13   |
| 7.1.2 Sistema de Incineración en Parrilla.                                   | 14   |
| 7.1.3 Sistema de Incineración en Lecho Fluidizado.                           | 15   |
| 7.1.4 Sistema de Incineración Circulante.                                    | 16   |
| 7.1.5 Sistema con Horno Rotativo.                                            | 17   |
| 7.1.6 Sistema de Pirólisis.                                                  | 18   |
| 7.2 Sistema de gasificación.                                                 | 19   |
| 7.3 Sistema de licuefacción.                                                 | 19   |
| 7.3.1 Sistema con Disociación Molecular.                                     | 21   |
| 7.3.2 Sistema con Plasma.                                                    | 21   |
| 7.3.3 Oxidación o Combustión sin llama.                                      | 22   |
| 8. Fisicoquímicos.                                                           | 23   |
| 8.1 Fermentación.                                                            | 23   |
| 8.2 Aprovechamiento de aceites vegetales.                                    | 23   |
| 8.3 Materias Primas para Alimentación Animal.                                | 24   |
| 8.4 Lombricultura y humus                                                    | 24   |
| 8.5 Compostaje                                                               | 25   |
| 8.6 Digestión Anaeróbica de FORSU                                            | 27   |
| 9. Características de la fracción orgánica de los residuos sólidos FORSU     | 31   |
| 10. Selección de Tecnología para la Obtención de Biogás a partir de la FORSU | 34   |
| 10.1. Biodigestores de Flujo Continuo                                        | 35   |
| 10.2. Biodigestores de Flujo Discontinuo                                     | 35   |
| 10.3. Biodigestor Semi-Continuo                                              | 35   |
| 10.4. Componentes Generales de una Planta de Biogás                          | 36   |
| 10.5. Modelos o Tipos de Biodigestores                                       | 36   |
| 10.5.1. Biodigestor Hindú de Tambor o Campana Flotante                       | 36   |

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10.5.2. Biodigestor Chino de Domo o Cúpula Fija                                                                                                      | 38 |
| 10.5.3. Biodigestor de alta velocidad.                                                                                                               | 40 |
| 10.5.4. Biodigestor Taiwanés o de Estructura Flexible.                                                                                               | 41 |
| 11. Selección de Tecnologías para Obtención de Biogás a Partir de Residuos Orgánicos.                                                                | 48 |
| 11.1. Análisis de ventajas operativas y técnicas de las tecnologías.                                                                                 | 48 |
| 11.2. Algunas ventajas y desventajas específicas de cada tecnología                                                                                  | 49 |
| 11.3. Selección de la alternativa tecnológica.                                                                                                       | 51 |
| 12. Análisis (Costo - Beneficio) de las tecnologías seleccionadas evidenciando la viabilidad y la sustentabilidad ambiental, económica y financiera. | 56 |
| 12.1. Inversión Inicial.                                                                                                                             | 56 |
| 12.2. Beneficio Económico                                                                                                                            | 58 |
| 13. Conclusiones.                                                                                                                                    | 60 |

## Bibliografía

## Listado de Tablas

| <b>Tabla N°.</b>                                                                                        | <b>Pág.</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1. Características Generales del Biogás                                                                 | 12          |
| 2. Reacción Química en el Sistema de Pirólisis.                                                         | 19          |
| 3. Reacciones Bioquímicas en la Digestión Anaerobia de la Materia Orgánica.                             | 30          |
| 4. Posible composición y caracterización físico-química iniciales del residuo sólido urbano y del lodo. | 33          |
| 5. Posible potencial de producción de Biogás de determinados residuos.                                  | 34          |
| 6. Ventajas y Desventajas Técnicas y Operativas de los modelos de Biodigestores.                        | 50          |
| 7. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor Hindú.                              | 51          |
| 8. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor Chino.                              | 52          |
| 9. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor de Alta Velocidad.                  | 53          |
| 10. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor Taiwán.                            | 55          |
| 11. Costos para la construcción de un biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                         | 59          |

## Listado de Figuras

| Figura N°.                                                                                                             | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. Sistema de Incineración en Parrilla.                                                                                | 15   |
| 2. Sistema de Incineración en Lecho Fluidizado.                                                                        | 16   |
| 3. Sistema de Incineración Circulante.                                                                                 | 17   |
| 4. Sistema con Horno Rotativo.                                                                                         | 18   |
| 5. Sistema de Licuefacción.                                                                                            | 19   |
| 6. Sistema con Plasma.                                                                                                 | 21   |
| 7. Producción de gas por Plasma.                                                                                       | 22   |
| 8. Sistema de Aprovechamiento de Aceites Vegetales.                                                                    | 24   |
| 9. Cultivo de lombrices en sistema de camas.                                                                           | 25   |
| 10. Compuestos y volteo del compost.                                                                                   | 26   |
| 11. Reacción Bioquímica de la digestión anaeróbica.                                                                    | 27   |
| 12. Etapas de la Digestión Anaerobia.                                                                                  | 28   |
| 13. Tipos de Biodigestores.                                                                                            | 36   |
| 14. Gráfica Planta de Biogás tipo Campana Flotante de Gas.                                                             | 37   |
| 15. Planta de Biogás tipo Campana Flotante de Gas.                                                                     | 37   |
| 16. Planta de Biogás Deenbandho.                                                                                       | 38   |
| 17. Gráfica Planta de Biogás de Domo Fijo.                                                                             | 39   |
| 18. Planta de Biogás de Domo Fijo.                                                                                     | 39   |
| 19. Digestor de Tercera Generación.                                                                                    | 41   |
| 20. Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                                                          | 42   |
| 21. Ejemplo de cárcava para Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                                  | 42   |
| 22. Cárcava conexas al Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                                       | 43   |
| 23. Instalación válvula de salida del Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                        | 44   |
| 24. Instalación de canecas plásticas de 15 galones al polietileno tubular del Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible | 44   |
| 25. Inserción de la esponjilla metálica en válvula de seguridad para el Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.      | 45   |
| 26. Válvula de seguridad para el Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                             | 45   |
| 27. Válvula de seguridad instalada para el Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                   | 46   |
| 28. Extremo del polietileno tubular amarrado con correas la caneca plástica.                                           | 47   |
| 29. Partes del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.                                                               | 47   |

## **Resumen Ejecutivo**

Este informe presenta tecnologías empleadas mundialmente para la gestión de los residuos sólidos urbanos y la fracción orgánica, haciendo uso de procesos termoquímicos, biológicos, bioquímicos y físicos, para la cogeneración de energía térmica con: Incineración en Parilla, Lecho Fluidizado, Circulante, Horno Rotativo, y otro sistema como la Fermentación. Así mismo se expone como la FORSU puede ser degradada por métodos aeróbicos o anaeróbicos como el Compostaje.

Para el aprovechamiento del Biogás se presentan alternativas como los biodigestores desarrollados en India, China y Taiwán.

Observamos las ventajas y desventajas de cada sistema, estableciendo un criterio cualitativo calificado, determinando el sistema de producción de Biogás que más se ajusta al contexto colombiano.

Se determina el costo-beneficio argumentando el factor ambiental, social y económico.

## **Executive Abstract**

This report presents technologies used worldwide for the management of municipal solid wastes and the organic fraction, using thermochemical, biological, biochemical and physical processes, for cogeneration of thermal energy: Incineration in Parilla, Fluidized Bed, Circulating, Rotary Kiln and other systems such as fermentation. Also exposed as MSW can be degraded by aerobic or anaerobic methods such as composting.

For the utilization of biogas alternatives are presented and developed digesters in India, China and Taiwan.

We note the advantages and disadvantages of each system, establishing a qualitative criterion described, determining the biogas production system that best fits the Colombian context.

The cost-benefit is determined by arguing the environmental, social and economic factors.

## **Palabras Claves**

FORSU - Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos  
BIODIGESTORES  
COSTO-BENEFICIO

## **Keywords**

OFMSW - Organic Fraction of Municipal Solid Waste  
BIODIGESTERS  
COST-BENEFIT

## 1. Antecedentes

Se puede decir que desde antes de Cristo ya se puede encontrar un histórico en lo que respecta a los residuos sólidos, pues un estudio arqueológico reveló que alrededor del año 1600 a. C. ya se hablaba que una tribu nativa americana de Colorado, producía 5.3Kg. de desechos/día, derivados de huesos de animales cazados. También podemos mencionar que para el año 500 a. C. en Atenas – Grecia, ya se había creado el primer vertedero municipal reglamentado, exigiendo que los residuos debían verse al menos a 1,5 Km. de los límites de la ciudad. Para el año de 1388 d. C. en Inglaterra se venía eliminando los residuos en cauces y zanjas, hacia los años de 1400, las montañas de basura en París – Francia, eran tan altas que interferían con la defensa de la ciudad.

En Philadelphia – EEUU en el año de 1690 ya realizaban prácticas de reciclaje, con la fabricación de papel a partir de fibras (papel usado y trapos). En 1842 inicia la “Edad del Saneamiento” en Inglaterra y durante los siguientes 10 años a partir del año 1874 en Nottingham – Inglaterra se crea una de las primeras tecnologías llamada “El Destructor” que era un incinerador, método que se usó igualmente en EEUU que 10 años después se cerraron debido a emisiones nocivas, pero dos años después se crea la primera planta de clasificación de reciclaje y para 1914 ya existían 300 incineradores. Luego para el año 1965 se promulgan las primeras leyes federales para el manejo de desechos sólidos.

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) más conocido como basura se compone de objetos de uso cotidiano que usamos y luego son tirados o arrojados, tales como los envases y empaques de diversos materiales para el almacenamiento de productos, corte de césped, muebles, ropa, restos de comida, periódicos, electrodomésticos, pintura y baterías, residuos sanitarios y de calles, embalajes entre otros; provenientes principalmente de tres fuentes:

1. Los residuos sólidos domésticos, procedentes de hogares y espacios públicos, incluidos los desechos recogidos de los edificios residenciales, papeleras, calles, áreas marinas y parques nacionales.
2. Los residuos comerciales sólidos, que viene de tiendas, restaurantes, hoteles, oficinas y tiendas en urbanizaciones privadas.
3. Los residuos sólidos industriales, que se genera por todas las industrias, pero no incluye los residuos de construcción y demolición, residuos químicos o residuos especiales.

Actualmente en Colombia no se sabe con certeza cuántos municipios la conforman; según el DANE la base cuenta con 1.115 pero algunos carecen de total información, sin embargo con la información de 1.086 municipios y con una población que se

estima en más de 47 millones de habitantes al año 2.012, quienes con un promedio de generación calculado en 700g/día de RSU, se están originando más de 33 millones de Kg/día de RSU, solo en Colombia.

- 5 ciudades con más de 1 millón de habitantes producen el 30.2% equivalentes a más de 10 millones de Kg/día de RSU
- 6 ciudades con más de 500 mil de habitantes producen el 7.4% lo que equivale alrededor de 2,5 millones Kg/día de RSU
- 50 ciudades con más de 100 mil de habitantes producen el 21.4% representando más de 7 millones Kg/día de RSU ciudades
- 1086 ciudades con menos de 100 mil de habitantes producen el 41% incorporando 14 millones Kg/día de RSU ciudades

Estos altísimos volúmenes de RSU, a pesar de no ser exactos, vienen siendo muy preocupantes para el gobierno, para la población civil y por el alto impacto negativo al ambiente. En la actualidad solo una fracción, que no está claramente estimada, de los RSU se dispone en rellenos sanitarios y plantas integrales, y en su mayoría se disponen inadecuadamente en botaderos a cielo abierto, enterramiento, quemas y cuerpos de agua, sin embargo en Colombia solo una fracción estimada en más de 1 millón de Ton/año, se recupera y se valoriza de diversas maneras, entre otras la recuperación, selección, clasificación, beneficio, compactación y comercialización a la industria nacional o internacional, o en el mejor de los casos estos materiales recuperados se pre-transforman en materias primas o en productos terminados. Por otra parte de los RSU actualmente se vienen aprovechando sus cualidades para la producción de Biogás, y más específicamente a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos – FORSU, que como su nombre lo indica y como se mencionó anteriormente, una parte, porcentaje o fracción que a nivel mundial oscila entre el 40-55% del total de los RSU, son materiales, desechos o residuos orgánicos o biomasa. Estos desechos, compuestos por corte de césped, desechos de jardines, poda de árboles, hojas caídas, restos de comida y todo desecho vegetal y animal; tienen como característica que en su proceso de biodegradación natural, mediante microorganismos, se fermentan generando gas metano (CH<sub>4</sub>) que al contenerlo y aprovecharlo adecuadamente se utiliza para proporcionar energía renovable limpia, por ende la FORSU es valorizable.

El Biogás es el producto gaseoso de la digestión anaeróbica (descomposición sin oxígeno) de la materia orgánica o de la FORSU, que mediante su aprovechamiento además de generar electricidad, calor o calefacción y refrigeración, es útil como combustible para vehículos. En caso de transformación de las normas de pureza, el Biogás se llama gas natural renovable y puede sustituir al gas natural como combustible alternativo para vehículos de gas natural, ayudando a reducir el uso de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El Biogás es generalmente 50% a 80% de CH<sub>4</sub> y 20% a 50% de CO<sub>2</sub> con restos de gases tales como H, CO, y N. En contraste, el gas natural generalmente contiene más del 70% de CH<sub>4</sub> y la mayor parte del restante 30% son otros hidrocarburos (tales como C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), trazas de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes.

En Suecia, más de la mitad del gas utilizado en 11.500 vehículos de gas natural, es el Biogás. Alemania y Austria utilizan el 20% de Biogás como combustible de gas natural vehicular. En los Estados Unidos, el uso de Biogás en vehículos ha sido en una escala más pequeña.

## **2. Formulación Del Problema**

Donde está presente la población humana, día a día se incrementa la generación de residuos urbanos, de los cuales están compuestos tanto por residuos sólidos orgánicos e inorgánicos, encontrando que su contenido, para países en vías de desarrollo, lo conforma la fracción orgánica con un promedio del 60%, porcentaje del cual solo una pequeña parte es aprovechada por entidades que colectan estos desechos en centrales de abasto o industrias de alimentos, para incorporarlos a sistemas de producción de abonos para uso agrícola o como componente suplementario en la dieta de especies pecuarias. A pesar de esto, son altos los volúmenes que aún están llegando, en el mejor de los casos, a rellenos sanitarios, y en los peores casos, a botaderos a cielo abierto, ríos, caminos o zonas verdes, lo que conlleva, en este sentido a una afectación de los recursos suelo, fuentes hídricas y aire.

## **3. Justificación**

Se están desaprovechando las cualidades fisicoquímicas y microbiológicas inherentes a la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos FORSU, lo que directamente viene afectando la capacidad instalada y el tiempo de uso de rellenos sanitarios, a la población civil y al ambiente (aire, suelo y agua) por la generación y emisión de gases de efecto invernadero, por el vertimiento constante de lixiviados que deterioran la calidad de los suelos para el establecimiento de cualquier tipo de cultivo y la calidad de agua para consumo, adicionalmente son focos que permiten la generación de vectores que afectan la salud humana.

Entre las cualidades de FORSU, objeto de este documento, se enfoca en el posible aprovechamiento y aplicación de tecnologías ambientalmente amigables aplicables en

las industrias para su autoconsumo o autoabastecimiento de energía, permitiendo aminorar los costos de producción, disponer de presupuestos más solventes para la gestión ambiental empresarial y mitigar el impacto ambiental negativo que genera este tipo de residuos.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo General**

Evaluar las alternativas tecnológicas para la generación de Biogás a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos – FORSU

### **4.2. Objetivos Específicos**

- 4.2.1. Identificar las tecnologías disponibles en el entorno Colombiano para la obtención de Biogás a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos – FORSU
- 4.2.2. Seleccionar la alternativa que, según criterios de índole ambiental y técnica, son aplicables en el contexto Colombiano.
- 4.2.3. Realizar un análisis Costo-Beneficio para la implementación la tecnología aplicable en el contexto Colombiano.

## **5. Marco teórico**

Residuos sólidos urbanos (RSU): son aquellas sustancias u objetos abandonados o descartados en forma permanente por quien los produce, por considerarlos sin utilidad en su provecho, en tanto, pueden definirse como los desechos que generados en la comunidad urbana provenientes de los procesos de consumo y desarrollo de las actividades humanas y que normalmente son sólidos a temperatura ambiente. Además de los producidos por los usos residenciales, comerciales e institucionales, y por el aseo del espacio público, los RUS incluyen los residuos originados en las industrias y establecimientos de salud siempre que no contengan características tóxicas ni peligrosas, en cuyo caso constituyen corrientes de residuos de otro tipo que deben ser manejadas según lo establecido en las normativas específicas. (Ordoñez)

Manejo de RSU: Es importante, previo a definir el manejo de los RSU, conocer la legislación o normativa nacional que se debe cumplir y complementariamente establecer los antecedentes y un diagnóstico de base que permita elaborar un plan que defina claramente objetivos, fases, estrategias, actividades, metas, indicadores, resultados y marco metodológico para la implementación de los procesos que permitan el manejo y adecuada gestión de los RSU, propendiendo por el máximo aprovechamiento bien sea mediante la reutilización o el reciclaje, teniendo claro que este último, es la reincorporación a un nuevo ciclo productivo de componentes postproducción o postconsumo que puede ser empleados como materia prima para la fabricación del mismo o de nuevos componentes, evitando al mínimo su disposición final en relleno sanitario.

Aprovechamiento de RSU: Es el proceso mediante el cual, a través de un manejo integral de los residuos sólidos, los materiales recuperados se reincorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio de la reutilización, el reciclaje, el tratamiento térmico con fines de generación de energía y obtención de subproductos, la estabilización de la fracción orgánica o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales y/o económicos (Decreto 1713 de 2002, Decreto 1505 de 2003).

Relleno sanitario: Es una estructura de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos en el suelo, los cuales se depositan, esparcen y compactan al menor volumen práctico posible, construyendo capas delgadas, compactándolas al menor volumen posible y cubriéndolas con tierra al término de cada día de trabajo .

Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU): La fracción orgánica de la mayoría de los RSU, hace referencia a los elementos de características orgánicas que pueden iniciar un proceso de degradación biológica por cuenta de las condiciones naturales de un ambiente: luz solar, aire, agua, microorganismos, entre otros; como lo menciona Gómez (2012), “...La descomposición de las sustancias involucradas se lleva a cabo por la presencia de hongos y bacterias, el proceso de descomposición se puede llevar a cabo a través de medios aeróbicos, es decir, con la presencia de aire y las bacterias lo respiran, o anaeróbicos, en los cuales no hay aire presente y el proceso lo realizan bacterias que no usan oxígeno en su proceso vital...”. La FORSU en términos generales puede considerarse compuesta por proteínas, aminoácidos, lípidos, hidratos de carbono, celulosa, lignina y ceniza; si se someten estos materiales orgánicos a descomposición aeróbica y microbacteriana, el producto final que queda después de cesar casi toda la actividad microbiológica es un material comúnmente conocido como compost (Gómez, 2012), mientras que si se somete a condiciones anaeróbicas, se producirá Biogás y un residuo estabilizado que sirve como enmienda para suelos degradados.

Biogás: El Biogás es el resultado de la interacción entre microorganismos, principalmente por bacterias metanogénicas que crecen o prosperan en la ausencia de oxígeno (O<sub>2</sub>), mediante la descomposición o biodegradan la materia orgánica en un

ambiente anaeróbico. Biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano, con una proporción que oscila entre un 50% y un 70%, y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contiene pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).<sup>1</sup> El Biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 mega julios por metro cúbico (MJ/m<sup>3</sup>). Cuando el Biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. Otros tipo de componente del Biogás son los gases azufrados tales como sulfuro de hidrógeno, metilmercaptano, disulfuro de carbono, sulfuro de metilo y sulfuro de dimetilo (Empresa de acueducto, 2006)

|                            |                                                                                                               |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COMPOSICIÓN                | 55 - 70% METANO (CH <sub>4</sub> )<br>30 - 45% Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )<br>Trazas de otros gases |
| CONTENIDO ENERGETICO       | 6.0 - 6.5 kW h m <sup>-3</sup>                                                                                |
| EQUIVALENTE DE COMBUSTIBLE | 0.60 - 0.65 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás                                                                  |
| LÍMITE DE EXPLOSIÓN        | 6 - 12% de biogás en el aire                                                                                  |
| TEMPERATURA DE IGNICIÓN    | 650 - 750°C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)                                                  |
| PRESIÓN CRÍTICA            | 74 - 88 atm                                                                                                   |
| TEMPERATURA CRÍTICA        | (-82.5°C)                                                                                                     |
| DENSIDAD NORMAL            | 1.2 kg m <sup>-3</sup>                                                                                        |
| OLOR                       | Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es impertectible)                                               |
| MASA MOLAR                 | 16.043 kg kmol <sup>-1</sup>                                                                                  |

Tabla 1. Características Generales del Biogás (FAO, 2011)

## 6. Diseño Metodológico

Este informe final de investigación pretende exponer información documentada en Tesis de Doctorado, Estudio de Casos, Experiencias y casos exitosos en la industria las diferentes metodologías y tecnologías entorno al aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos FORSU, mediante la definición de los criterios técnicos ambientales para la obtención y aprovechamiento del Biogás. Así mismo se seleccionará y evaluará a nivel teórico, una tecnología con base en los procesos y las características de los residuos que se requieren para maximizar su operación.

## **7. Identificación de métodos para el aprovechamiento de los residuos**

Previo a la identificación de tecnologías para obtención de gas o Biogás, es importante primero entender cuáles son las características físicas y químicas de los RSU, disponiendo de propiedades para su aprovechamiento mediante diversos métodos en la generación de energía, y es que los RSU entre su propiedades físicas encontramos su densidad suelta, que es la que se encuentra en los camiones recolectores antes de ser compactados, luego se tiene la densidad compactada, que es medida en los camiones recolectores, de acuerdo con el peso neto transportado y el volumen de la caja transportadora y finalmente se tiene la densidad descompactada, que es medida en el botadero una vez los RSU son descargados por el vehículo (Morales Gilede, 1984). Ahora bien los RSU disponen de unas características o composición química al estar compuestos por cenizas, más contenido inerte, carbono, nitrógeno, humedad, calorías y potasio. Estas características fisicoquímicas proporcionan la capacidad de generar un poder calorífico gracias también al contenido de humedad que se encuentra en un promedio del 50% distribuida entre los materiales que son absorbentes en proporción a su presencia y a su peso. En este sentido y de acuerdo a la anterior generalidad, entenderemos el porqué del tipo de tecnologías que existen para el adecuado tratamiento y aprovechamiento de los RSU y la FORSU, por tanto, a continuación se realizará una breve descripción de las tecnologías disponibles y posteriormente se definirán las dos tecnologías que pueden ser implementadas en el contexto colombiano.

A continuación se presentan las alternativas para el tratamiento de residuos orgánicos no peligrosos, que consiste principalmente en la aplicación de procesos termoquímicos, biológicos y/o bioquímicos y físicos.

### **7.1. Termoquímicos**

#### **7.1.1. Combustión O Incineración**

Proceso que se desarrolla a partir de la oxidación completa de los elementos combustibles de los residuos, principalmente C2 e H2 en presencia de exceso de O2. Este proceso es exotérmico y cede una importante cantidad de energía, constituida por la generación de vapor, Biogás y combustible líquido o gaseoso, según sea la tecnología, que bien cualquiera de estos pueden ser empleados como combustible para la generación de energía térmica (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid - FENERCOM, 2010).

En el proceso de quemar los residuos sólidos combustibles en calderas para producir vapor a altas presiones, lo cual puede ser aprovechado para generar electricidad, energía motriz o térmica. Este proceso destruye gran parte del producto sólido convirtiéndolo en gases y vapor de agua con una limitada cantidad de residuo sólido y gases que se generan dependiendo de la cantidad del valor nominal estequiométrico, en función de la cantidad de carbono e H que tengan los residuos y el exceso de aire que la tecnología necesite para garantizar una mejor combustión.

Entre los diversos sistemas o tecnologías para la gestión de los RSU encontramos:

#### 7.1.2. Sistema de Incineración en Parrilla.

Es la tecnología más y mejor consolidada, con gran número de instalaciones a nivel mundial que, después de más de cien años y con sus continuas mejoras, demuestra una gran fiabilidad y flexibilidad en funcionamiento, con capacidades normales de tratamiento que van de 3 a 50 Ton./hora/línea y la posibilidad de tratar residuos con poder calorífica inferior entre 1.400 y 4.500 Kcal. /Kg. Sin añadir combustible auxiliar.

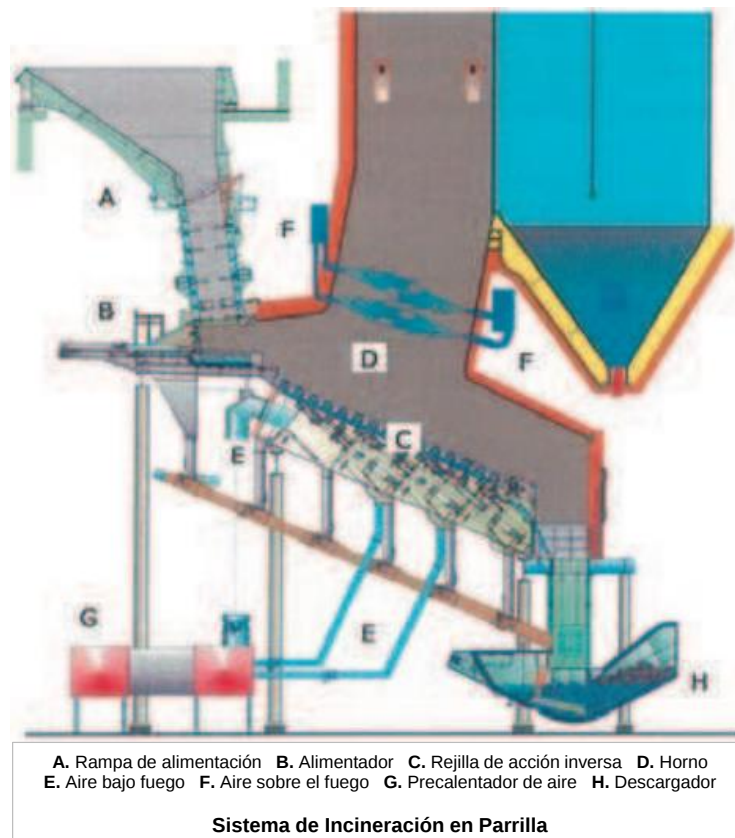


Figura 1. Sistema de Incineración en Parrilla

### 7.1.3. Sistema de Incineración en Lecho Fluidizado.

Su nombre procede del hecho de utilizar como elemento de calentamiento del residuo combustible un material inerte (suele ser arena de sílice) que, siendo un producto sólido, se comporta como un fluido al ser activado por aire dentro de un recipiente cerrado. Evidentemente la arena no es un fluido, pero en esas circunstancias, se comporta como tal, y por eso, se llama al sistema de lecho fluidizado y no lecho fluido.

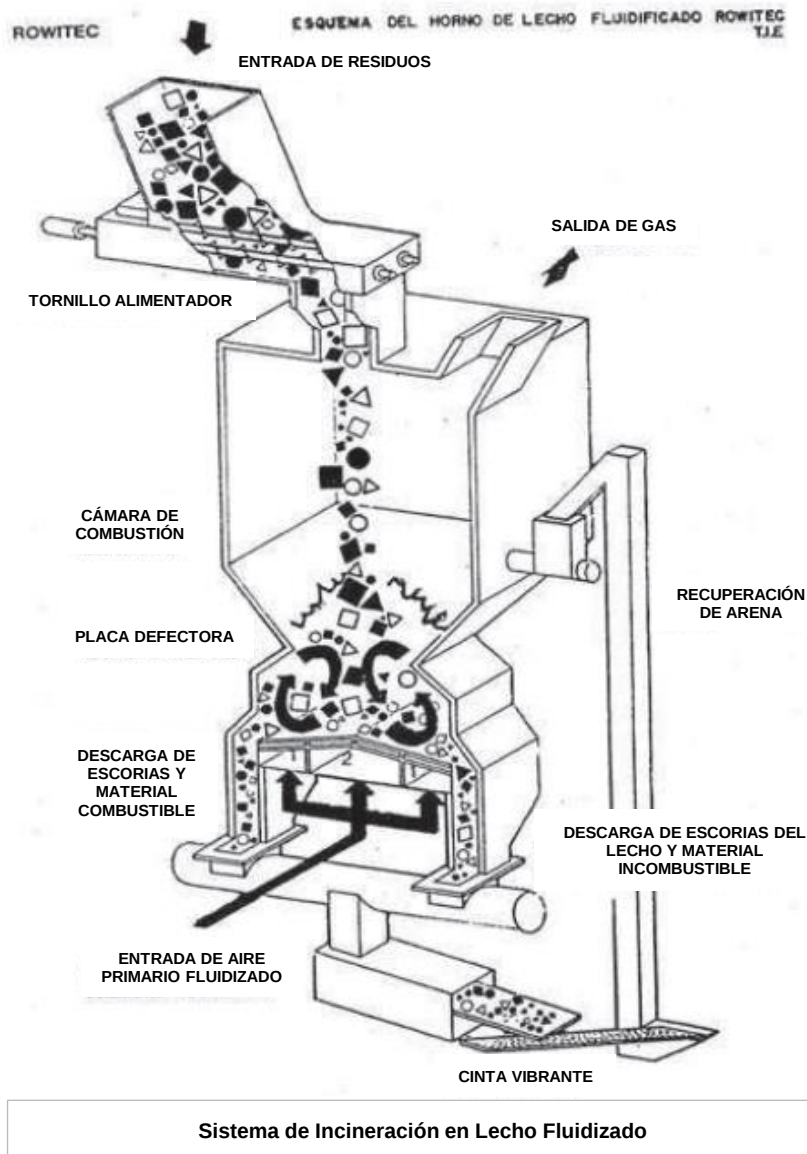
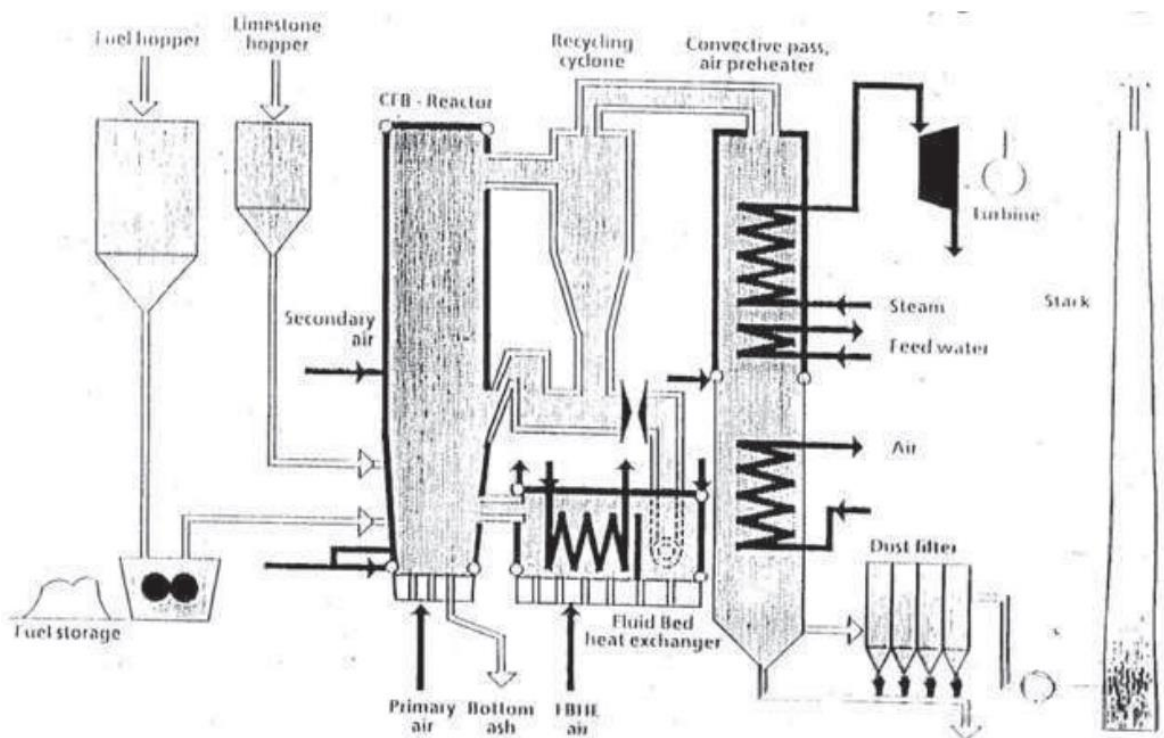


Figura 2. Sistema de Incineración en Lecho Fluidizado.

#### 7.1.4. Sistema de Incineración Circulante

En este sistema la velocidad aumenta hasta 8 a 10 m/s, mientras que el lecho fluidizado alcanza el orden de los 3 m/s, lo cual produce una distribución de la arena como si estuviera flotando en toda la cámara de postcombustión. Los gases de escape de la cámara de postcombustión pasan a un ciclón donde se separan los elementos inertes (arena y cenizas) que vuelan al introducirse en el horno (por eso se llama circulante), mientras que los gases pasan a la caldera donde ceden su calor al agua, recuperándose gran parte de su energía térmica.



**Sistema de Incineración Circulante**

Figura 3. Sistema de Incineración Circulante

#### 7.1.5. Sistema con Horno Rotativo

En estos sistemas residuos sólidos y líquidos son alimentados a un horno cilíndrico recubierto interiormente de material refractario. Estos hornos tienen una longitud que depende de las prestaciones pero que en todos los casos superan los 20 metros. El cilindro está inclinado alrededor de 5° y rota muy lentamente de manera que el tiempo de residencia es alto. El mismo puede variar desde 30 minutos hasta 1 hora y media. Los

productos gaseosos no combustionados pasan a una segunda cámara de combustión. Las temperaturas que se alcanzan en estos sistemas son de alrededor de 1300°C. En la figura. 4 se representa en forma esquemática una unidad de procesamiento que emplea horno rotativo. Nótese que además de la cámara para combustión secundaria, el sistema posee un recuperador de calor para generación de vapor, un secador spray de cenizas, un precipitador electrostático para polvos y una torre lavadora de gases de escape (Petunchi, 2000).

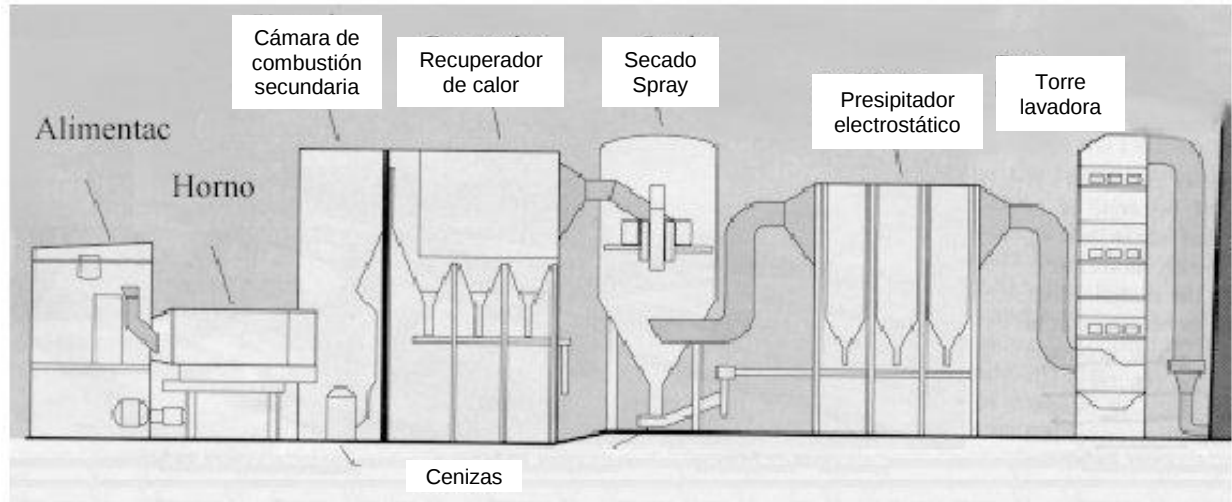


Figura 4. Sistema con Horno Rotativo

Entre otros se encuentran los hornos de inyección de líquidos, hornos de cementeras y los hornos pirolíticos, este nos permite pasar a hacer una descripción generalizada de otro de los sistemas de combustión denominado pirólisis.

#### 7.1.6. Sistema de Pirólisis

La pirólisis es la descomposición térmica incompleta de la materia orgánica, que a diferencia de los sistemas anteriormente mencionados, este actúa en ausencia del oxígeno u otros agentes gasificantes, generándose cantidades variables de gases (gas de síntesis), líquidos (alquitranes y aceites) y residuo carbonoso (Cuevas, 2014).

En la pirolisis el rango de temperatura empleada oscila entre 150° y 900°C, en este sentido, dependiendo el rango de temperatura se obtienen las siguientes reacciones químicas

| <b>T° Rango en °C</b> | <b>Reacción Química</b>                                                                                                                            |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 100 - 120             | Deshidratación                                                                                                                                     |
| 250                   | Desoxigenación y Desulfuración: Liberación de Sulfuro de Hidrógeno                                                                                 |
| 340                   | Rotura de enlaces en compuestos alifáticos: liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros                                             |
| 380                   | Fase de Carbonización                                                                                                                              |
| 400                   | Rotura de enlaces C-O y C-N                                                                                                                        |
| 400 - 600             | Descomposición de los materiales bituminosos: Generación de aceites y alquitranes                                                                  |
| 600                   | Cracking de los materiales bituminosos: Generación de hidrocarburos gaseosos de la cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno) |
| > 600                 | Dimerización de las olefinas (etileno) $\alpha$ -butileno; reacción del etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.      |

Tabla 2. Reacción Química en el Sistema de Pirólisis

## 7.2. Sistema de Gasificación

La gasificación permite la conversión de un residuo en un gas combustible y reductor por medio de la adición de gases reactivos, generalmente, vapor de agua oxígeno o aire.

La gasificación es la continuación a la pirólisis a temperatura por encima de los 600°C, convirtiendo el residuo carbonoso en productos gaseosos, en condiciones por debajo de las estequiométricas para el oxígeno.

## 7.3. Sistema de Licuefacción

La licuefacción es el cambio de una sustancia del estado sólido o gaseoso, al estado líquido, para este cambio se requiere la adición o retirar del calor.

La licuefacción puede estar dividida en dos tipos, la indirecta con la que se produce metanol o hidrocarburos, es una sucesiva a la gasificación, el material tiene un poder calorífico de 500 Kcal/kg.



La licuefacción directa permite obtener líquidos orgánicos oxigenados (aceites pesados). Los aceites que se producen tienen características fuertemente dependientes del material base y de los parámetros característicos del proceso; el poder calorífico está comprendido entre 7.000 kcal/kg y 8.000 kcal/kg; el rendimiento térmico oscila entre 33% y 38%.

#### 7.3.1. Sistema con Disociación Molecular

Entre otros procesos poco comunes y de baja efectividad se encuentra este proceso que igualmente está orientado a la gasificación pero con menos poder calorífico, con muy baja presencia de oxígeno y a baja temperatura, lento y discontinuo, por tanto, de poca capacidad de tratamiento y cuyas características particulares le alejan de ser una solución para los RSU.

#### 7.3.2. Sistema con Plasma

El plasma es también conocido como el cuarto estado de la materia. Es un gas conductor a altas temperaturas que oscilan entre 5.000 y 20.000 K, eléctricamente neutro, por tener igual número de partículas de carga positiva como negativa. Para emplearlo como tecnología en la gestión de los RSU, se hace necesario un convertidor de plasma, que genera un intenso campo de energía radiante que provoca la disociación molecular de sólidos, líquidos y gases. Esto debido a que las moléculas orgánicas, a más de 5.000°C, se desintegran dando lugar a la mezcla de H<sub>2</sub>, CO y materia orgánica vitrificada, por tanto no se forman cenizas.

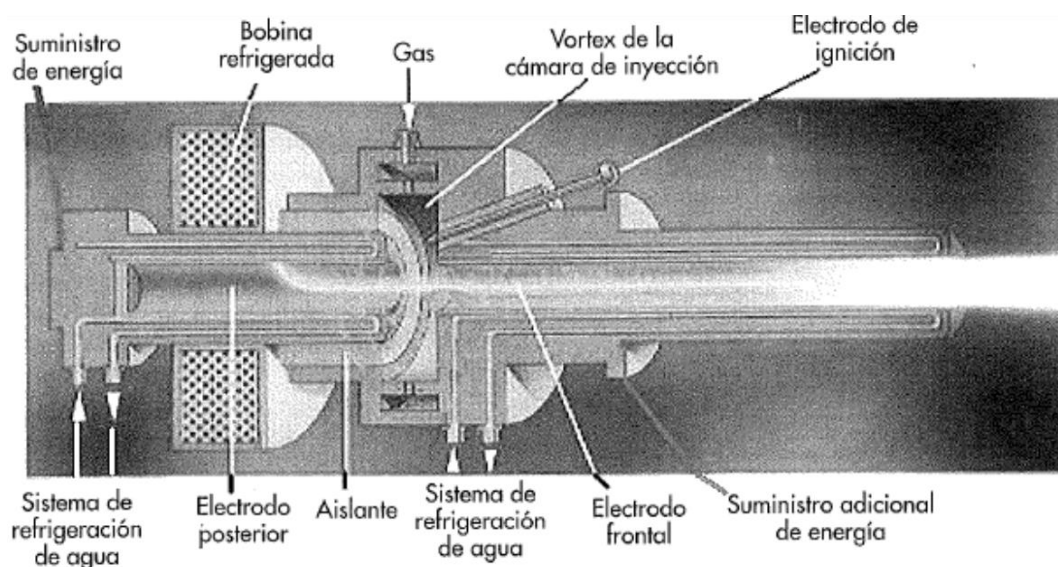


Figura 6. Sistema con Plasma

Esta tecnología permite obtener:

- Gas de síntesis “syngas” a partir de la materia orgánica, contiene mezcla de  $H_2$ ,  $CO$  con trazas de otros elementos.
- Cristal de silicato a partir de materia inorgánica y material inerte vitrificado.
- Metales, si están presentes en cantidades suficientes, se pueden extraer del silicato, caso contrario, quedan encapsulados en el mismo.

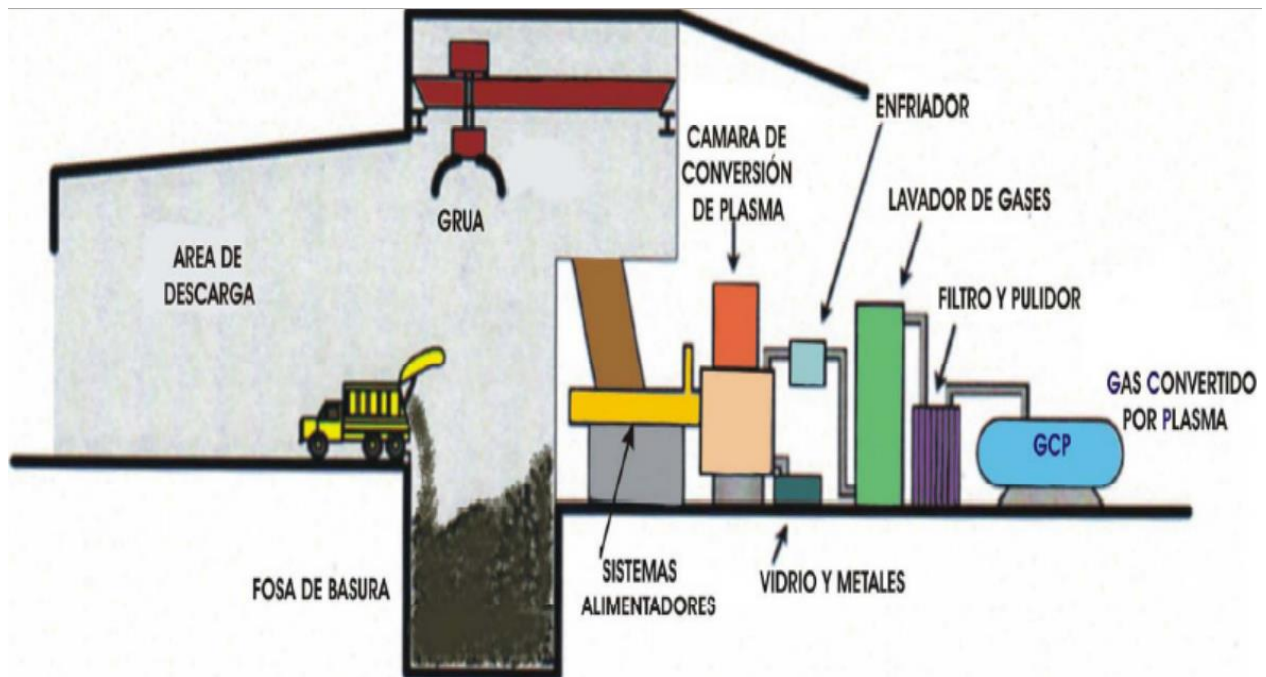


Figura 7. Producción de gas por Plasma (Comillas, 2011)

Sin embargo, las referencias de la utilización de plasma para tratar RSU aun están a nivel de plantas piloto o preindustriales, por tanto es necesario esperar algunos años más hasta comprobar los resultados comerciales debido a que se deben seguir analizando en función del residuo tratado, pues la relación beneficio/costo es muy variable, dependiendo del tipo de residuo como del resultado como del resultado de la operación y del costo de limpieza del *syngas*.

### 7.3.3. Oxidcombustión o Combustión sin llama

Para finalmente este grupo, encontramos la Oxidcombustión, proceso de combustión que podría aplicarse en principio, a combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Desde el punto de vista técnico, los residuos de contener sustancias orgánicas e inorgánicas. Con la primera fracción se lleva el proceso de pirólisis y gasificación que genera gases

y vapores que posteriormente son tratados (oxidados). Con la fracción inorgánica, debido a las altas temperaturas generadas se facilita la fusión.

## **8. Métodos Físicos, químicos y biológicos**

Expuestos los procesos termoquímicos, se presentan los procesos físicos, químicos y biológicos, integrados por:

### **8.1. Fermentación**

Consiste en hacer un aprovechamiento no convencional de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, realizando una conversión del contenido de materiales azucarados, amiláceos y/o lignocelulósicos en alcohol etílico, etanol o bioetanol; la biomasa rica en carbohidratos bajo forma de azúcares, almidón y celulosa, por medio la acción de fermentos que reaccionan en presencia del aire; para obtener este proceso, requiere una etapa de Hidrólisis y solubilización de la FORSU en un medio (que normalmente es agua) y posteriormente los azúcares pasan a una fermentación, si bien previamente puede incluirse pre tratamientos ácidos o básicos que faciliten el desdoblamiento de las moléculas complejas hacia la glucosa y otros azúcares, como lo menciona, (Martínez, J; Montoya,N, 2013). El producto es un líquido en el que aparece el alcohol en porcentajes variables del 5% al 15% según el método y las condiciones de fermentación, con un poder calorífico de 6.400 kcal/kg.

### **8.2. Aprovechamiento de Aceites Vegetales**

En términos generales, los aceites vegetales de semillas oleaginosas y/o cebos animales desechados bien sea por las industrias de alimentos u hogares, son la materia prima utilizada, convencionalmente, en la producción de Biodiesel, como sustrato para el desarrollo de microorganismos lipofílicos, obtención éster, obtención de glicerina o glicerol para uso químico, cosmético o productos de aseo, lodos de perforación, espumas de poliuretano, alcoholes polihídricos, resinas poliacrílicas, tintas para artes gráficas, ceras, velas, masa de vidrio, obtención de aceites de base para lubricación de motores, aceites epoxidizados, aceites para procesos siderúrgicos, para la transferencia de calor en cementeras, como combustible en equipos de cogeneración para producir electricidad y abono orgánico.

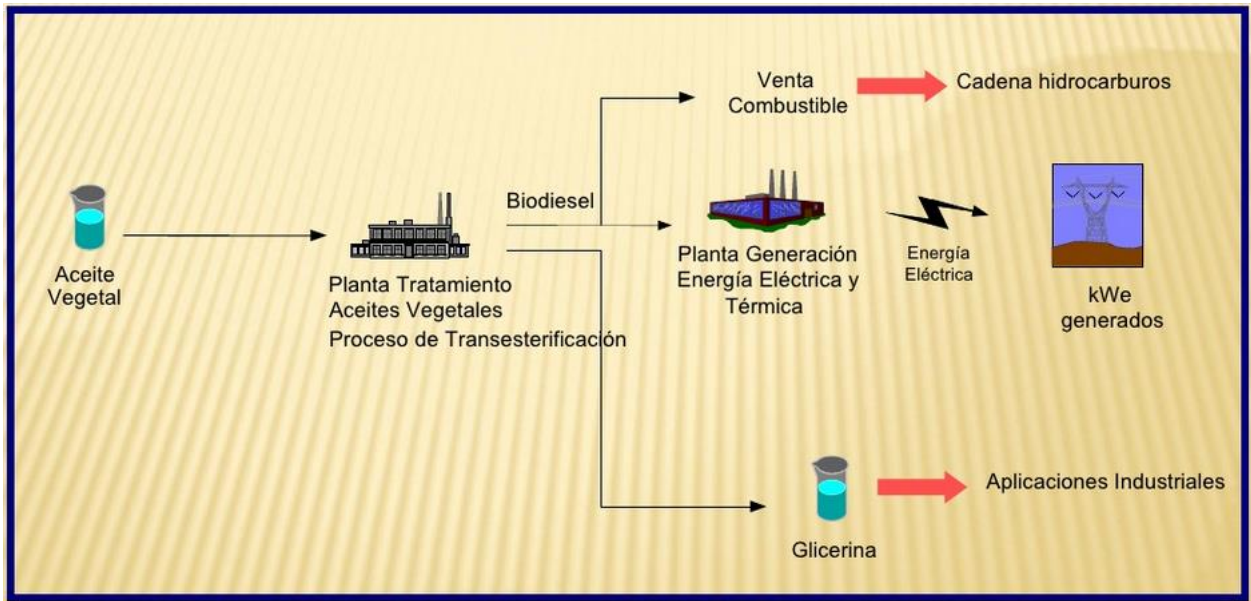


Figura 8. Sistema de Aprovechamiento de Aceites Vegetales

### 8.3. Materias Primas para Alimentación Animal.

Es un método de aprovechamiento ampliamente utilizado, especialmente en el caso de los subproductos derivados de animales y/o vegetales constituidos principalmente por proteína y grasa, tal es el caso para los desechos o residuos de animales, la fabricación de ensilados de pescado para su utilización como fuente principal de suministro de proteína animal en Piscicultura, o Puerta13 enuncia que desde hace varios años las universidades han venido realizando investigaciones para el aprovechamiento de los residuos orgánicos de las excretas de animales en alimentación animal, en especial la porquinaza para la alimentación bovina y se han evaluado ensayos de ganancia de peso en cerdos de levante y ceba alimentados con una mezcla de concentrado y porquinaza tratada con *Lactobacillus*, disminuyendo la saturación de praderas con porquinaza y lixiviados, mejorando la nutrición de los cerdos debido a la baja absorción y asimilación de nutrientes (30-40%) y disminuyendo el uso del concentrado aproximadamente entre un 20 y 30%.

### 8.4. Lombricultura y humus

Este es un sistema cerrado que se desarrolla de manera natural en el ecosistema y que el humano ha aprovechado y potencializado desde hace ya varios años luego de su descubrimiento alrededor de los años 50's. La lombricultura es un ciclo cerrado que está compuesto por dos elementos básicos tales como lombrices y desechos orgánicos

de animales o vegetales. Estos desechos son tomados por la lombriz, como alimento, lo cual, durante su paso por el tracto digestivo, interactúa con células, bacterias e iones de calcio, para luego ser desechados por la lombriz en compuestos más simples, que por su características fisicoquímicas y microbiológicas están dispuestos para ser absorbidos de manera más simple y mejor asimilados por las plantas en general, producto denominado Humus (Dustano, 2014).

Los desechos de la lombriz pueden ser usados a gran escala en sistemas productivos agropecuarios, como zooplancton, humus, bioabono, corrector y acondicionador de suelos y/o fertilizante foliar, en cuanto a los desechos de la lombriz, complementariamente se obtiene directamente de la lombriz: pie de cría, carne bien sea para ser usada en fresco para la alimentación en explotaciones avícolas, porcícolas o piscícolas, o también como proteína en polvo o carne para consumo humano (Gómez, 2012). Es de esta manera como se completa el ciclo.



Figura 9. Cultivo de lombrices en sistema de camas

La lombricultura puede desarrollarse de modo casero o industrial ya que puede establecerse sin ningún tipo de estructura de apoyo o con estructuras muy complejas horizontales o verticales con o sin cobertura pudiendo llegar a ser tan complejo como se quiera, pero el mercado y Costo/Beneficio son factores que definen el alcance de la complejidad.

## 8.5. Compostaje

El compost se puede definir como el resultado de un proceso de conversión, transformación y estabilización de un sin número de residuos orgánicos a través de la acción microbiana. Lográndose la humificación de estos compuestos, bajo condiciones controladas y en ausencia de suelo. La transformación de la materia orgánica se realiza

con base en la disponibilidad de oxígeno libre en el medio (Dustano, 2014); por ello, el compostaje es un proceso biológico aeróbico de la materia orgánica, bajo condiciones controladas y en ausencia de suelo, mediante el cual los micro y macro organismos, tales como bacterias, hongos, actinomicetos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable (restos de cosecha, restos o excrementos de animales y residuos urbanos), permitiendo obtener "compost" que es un abono o mejorador de suelo, excelente para la agricultura ya que aporta nutrientes al mismo, permitiendo mejorar la estructura del mismo, ayuda a reducir la erosión contribuyendo a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.



Figura 10. Compuestos y volteo del compost

Se puede decir que el compostaje es la fase previa, complementaria a la lombricultura ya que el producto derivado del compostaje, el compost, es el sustrato que se emplea para la alimentación de las lombrices debido a sus características fisicoquímicas y microbiológicas, permitiendo mejores resultados en tiempo, aprovechamiento y potencialización de los nutrientes disponibles para su absorción, aseguramiento e incremento de la población de lombrices y en la calidad de los subproductos.

## 8.6. Digestión Anaeróbica de FORSU

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica o biomasa, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o "Biogás" ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable.

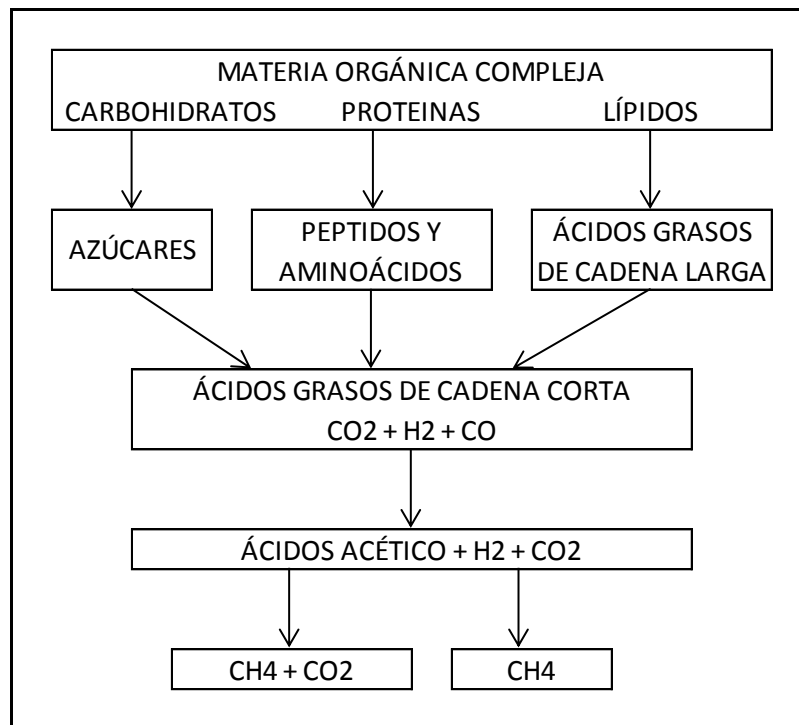


Figura 11. Reacción Bioquímica de la digestión anaeróbica

La digestión anaerobia está caracterizada por la existencia de cinco fases consecutivas diferenciadas:

1. Hidrólisis Grupo I: bacterias hidrolíticas
2. Acidogénesis Grupo I: bacterias fermentativas
3. Acetogénesis Grupo II: bacterias acetogénicas
4. Metanogénesis Grupo III: bacterias metanogénicas

En el proceso de degradación del sustrato o alimento de los microorganismos, interviniendo 5 grandes poblaciones de microorganismos en cada fase:

- 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas, que son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que participan son los miembros de la familia *Enterobacteriaceae*, además los géneros *Bacillus*, *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Bacteroides*, *Micrococcus* y *Clostridium*. Las bacterias con actividad proteolítica son en su mayoría especies de los géneros *Clostridium*, *Peptococcus*, *Bifidobacterium* y *Staphylococcus*. Bacterias como *Anaerovibrio lipolytica* con actividad lipolítica han sido aisladas del rumen; igualmente la *Butyrovibrio fibrisolvens* hidroliza fosfolípidos cuando crece con azúcares fermentables como fuente de carbono. Este grupo de bacterias están presentes en la fase no metanogénica, y son aquellas que hidrolizan la celulosa, solubilizan extracelularmente las moléculas de los polímeros orgánicos de carbohidratos, proteínas y lípidos, formando azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos, lo que corresponde al monómero de cada uno.

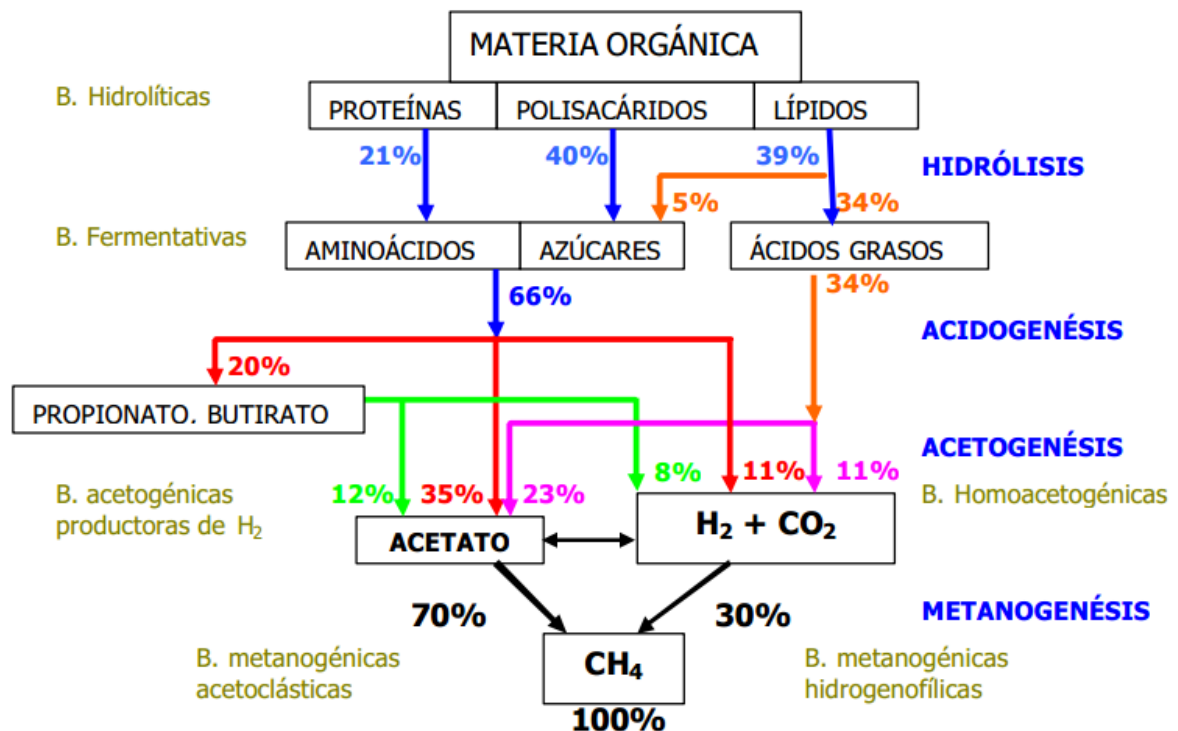


Figura 12. Etapas de la Digestión Anaerobia (Madigan, 1977, van Haandel, 1994)

Las bacterias hidrolíticas tales como *Bacillus*, *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Bacteroides*, *Micrococcus*, *Clostridium*, *Peptococcus*, *Bifidobacterium*, *Staphylococcus* y *Anaerovibriolipolytica*, necesitan generar energía y está la obtiene por medio del catabolismo de la glucosa, el glicerol y aminoácidos. Al catabolismo de la glucosa se le conoce con el nombre de "Glucólisis" de la cual se

obtiene como resultado una molécula de piruvato, compuesto muy importante para la célula ya que es un sustrato clave para la producción de energía y de la síntesis de glucosa, y adicionalmente se obtienen 2 moléculas de adenosina trifosfato – ATP, molécula utilizada por todos los organismos vivos para proporcionar energía en las reacciones químicas.

Las bacterias acidogénicas, también presentes en la fase no metanogénica, son aquellas que utilizan los procesos metabólicos de la fase no metanogénica, los cuales son fermentados intracelularmente, produciendo los ácidos grasos de la cadena corta conocidos como ácidos volátiles, siendo los más importantes de éstos: el acético, propiónico y butírico, y en segundo término el valérico y caproico. En esta fase de fermentación también hay producción de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y la misma actividad bacteriana produce sulfuros y algunos compuestos aromáticos que provienen de los aminoácidos que conforman las moléculas de las proteínas.

Los productos del catabolismo se acidifican por medio de las bacterias acidogénicas, tales como: *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Desulphovibrio*, *Actinomyces* y *Staphylococcus*. Produciendo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y ácidos grasos volátiles - AGV, a mencionar: ácido propiónico, ácido acético y ácido butírico

- 2) Bacterias acetogénicas; estas transforman a los ácidos grasos en ácido acético, éste ácido servirá de sustrato para las bacterias metanogénicas las cuales también requerirán del H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Estas bacterias, en conjunto con las bacterias homoacetogénicas, toman los ácidos grasos volátiles y los convierten a acetato, anhídrido carbónico e H<sub>2</sub>.

Algunas de las bacterias acetogénicas son la *Propionibacterium*, *Clostridium propionicum*, *Clostridium butyricum*, *Syntrophomonas sapovorans*, *Syntrophobacter wolinii*, *Syntromonas wolfei*, *Syntrophospora bryantii* y *Syntrophus buswellii*

Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>

- 3) Bacterias homoacetogénicas; son anaerobias obligadas y utilizan el CO<sub>2</sub>, producido por las bacterias anteriormente mencionadas, como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia.

Aunque este grupo no es un grupo taxonómico definido, en él se incluyen una variedad de bacterias Gram (+) *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus* y Gram (-) Bacteroides formadoras de esporas como: *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii*.

- 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; bacterias tales como *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*, y *Methanobrevibacter*, entre otros, son catalizadoras o consumidoras el H<sub>2</sub> producido por las bacterias acetogénicas para la generar el 28% del metano a partir de acetato y permiten una disminución de la presión parcial de hidrógeno.
- 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas, *Methanosarcina* y *Methanothrix* son capaces de producir el 70% CH<sub>4</sub> o Biogás y dióxido de carbono a partir de acético.

| TIPO DE REACCIÓN                                            | ECUACIÓN                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fermentación de glucosa a acetato                           | Glucosa + 4H <sub>2</sub> O → CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + 4H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub>                                              |
| Fermentación de glucosa a butirato                          | Glucosa + 2H <sub>2</sub> O → C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 3H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub> |
| Fermentación del butirato a acetato e H <sub>2</sub>        | Butirato + 2H <sub>2</sub> O → 2CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub>                                              |
| Fermentación del propionato a acetato                       | Propionato + 3H <sub>2</sub> → CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub>               |
| Acetogénesis a partir de H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>   | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + 4H <sub>2</sub> → CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + 2H <sub>2</sub> O                         |
| Metanogénesis a partir del CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 4H <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub> + 3H <sub>2</sub> O                                                           |
| Metanogénesis a partir acetato                              | Acetato + H <sub>2</sub> O → CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup>                                                   |

Tabla 3. Reacciones Bioquímicas en la Digestión Anaerobia de la Materia Orgánica (Zinder, 1984)

Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por seres de diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a cada compuesto intermedio como inhibidor, esto implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podría producir una bajada del pH.

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 CH<sub>4</sub>, (que produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO<sub>2</sub>), y reducción del CO<sub>2</sub> ahorrado por sustitución de energía fósil.

Se hace necesario controlar parámetros ambientales para asegurar el desarrollo del proceso, tales como:

- pH, cercano a la neutralidad.
- Es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO<sub>3</sub>, para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación. .
- Potencial redox, con valores recomendables inferiores a -350 mV.
- Nutrientes, con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos.
- Tóxicos e inhibidores, cuya concentración ha de ser la mínima posible.

Igualmente se hace necesario controlar parámetros operacionales tales como:

- Temperatura. Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (temperaturas en torno a los 35 °C) o termófilico (temperaturas en torno a los 55 °C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos.
- Agitación. En función de la tipología de un “reactor” debe transferirse al sistema el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de substrato a cada población o agregados de bacterias, así como homogeneizar para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores.
- Tiempo de retención. Cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos.
- Velocidad de carga orgánica. Cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención.

## **9. Características de la fracción orgánica de los residuos sólidos FORSU.**

La FORSU, en términos generales, puede estar constituida físicamente por:

Desechos vegetales de:

- Cosecha
- Podas
- Arvenses o malezas
- Poscosecha
- Preparación de alimentos frescos
- Alimentos procesados y/o cocidos
- Empaques y/o envases en fibras vegetales
- Fibras textiles de algodón
- Papeles, Servilletas y Cartones
- Entre otros.

Deyecciones o residuos corporales (eses/excretas/estiércol y micciones u orina) de animales, tejido óseo, órganos de animales, sangre, contenido ruminal y/o estomacal, y sobras o residuos de alimentos vegetales frescos y/o procesados (concentrados/piensos), tanto de especies mayores como de especies menores tales como:

- Bovinos (bobinaza)
- Bufalinos (bobinaza)
- Equinos (equinaza)
- Mulares (equinaza)
- Porcinos (porcinaza)
- Caprinos (caprinaza)
- Ovinos (ovinaza)
- Aves de corral y/o domesticas (gallinaza y cascara de huevo molidas)
- Mamíferos: Cuy/Cuyes/Cobayo/Conejillo de indias y/o Conejos (conejaza)
- Zoocría de Reptiles y Batracios
- Moluscos: Caracoles (estiércol y conchas molidas) y/o Babosas (cuerpos)
- Piscícolas o acuaristica
- Caninos (estiércol)
- Felinos (estiércol)
- Insectos (cuerpos)
- Entre otros.

Residuos líquidos tales como:

- Leche y derivados
- Aceite y/o grasas animales y/o vegetales comestibles
- Café
- Té
- Cerveza, vinos y demás alcoholes
- Refrescos y/o bebidas azucaradas
- Entre otros.

Residuos de tierra y/o lodos.

En términos fisicoquímicos los componentes de la FORSU esta compuestos por:

| <b>Parámetros Analíticos</b>         | <b>FORSU</b> | <b>LODO</b> |
|--------------------------------------|--------------|-------------|
| Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )        | 295          | 1.000,00    |
| Humedad (%)                          | 17,2         | 96,47       |
| Materia Orgánica (%)                 | 53,36        | 1,33        |
| Sólidos (%)                          | 82,8         | 3,53        |
| ST (g/Kg)                            | 828          | 35,33       |
| SV(g/Kg)                             | 441          | 13,27       |
| SFT (g/Kg)                           | 387          | 22,06       |
| STS (%peso seco)                     | 17,5         | 19,6        |
| SVS (%peso seco)                     | 17           | 1,1         |
| SFS (%peso seco)                     | 0,5          | 18,5        |
| STD (%peso seco)                     | 810,5        | 15,73       |
| SVD (%peso seco)                     | 424          | 12,17       |
| SFD (%peso seco)                     | 386,5        | 3,56        |
| pH                                   | 7,62         | 8,35        |
| Alcalinidad (g CaCO <sub>3</sub> /g) | 0,14         | 1,01        |
| Acidez total (mg Ach/L)              | 1.974,67     | 224,58      |
| N-amon (mg NH <sub>3</sub> -N/g)     | 0,01         | 0,05        |
| N-total (mg NH <sub>3</sub> -Nk/g)   | 11,20        | 5,6         |
| N-total (%)                          | 1,12         | 0,56        |
| Carbono de la MO (%)                 | 30,94        | 0,77        |
| Carbono orgánico disuelto            | 31,97        | 13,67       |
| C:N (materia orgánica)               | 27,62        | 1,375       |
| C:N (COD)                            | 28,54        | 24,41       |
| COD (mg/g)                           | 31,97        | 13,67       |
| DQO (mgO <sub>2</sub> /g)            | 113,4        | 87,67       |

Sólidos Totales: ST; Sólidos Volátiles: SV; Sólidos Fijos Totales: SFT; Nitrógeno Amoniacal: N-amon; Carbono Orgánico Disuelto: COD; Sólidos Totales en Suspensión: STS; Sólidos Volátiles en Suspensión: SVS; Sólidos Fijos en Suspensión: SFS; Sólidos Totales Disueltos: STD; Sólidos Volátiles Disueltos: SDV; Sólidos Fijos Disueltos: SFD.

Tabla 4. Posible composición y caracterización físico-química iniciales del residuo sólido urbano y del lodo.

| <b>RESIDUO</b>                  | <b>SOLIDOS VOLÁTILES (%)</b> | <b>Producción biogás (Nm<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup>)</b> |
|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Estiércol                       | 10 a 20                      | 15 a 45                                                   |
| FOR Municipales                 | 20 a 30                      | 150 a 240                                                 |
| Lodos EDAR                      | 2 a 4                        | 15 a 22                                                   |
| Residuos proceso aceite de Soya | 90                           | 800 a 1000                                                |
| Aceite residual de pescado      | 80 a 85                      | 350 a 600                                                 |
| Residuos matadero               | 15 a 20                      | 50 a 70                                                   |
| Suero de leche                  | 7 a 10                       | 40 a 55                                                   |

Tabla 5. Posible potencial de producción de Biogás de determinados residuos. (R.(Eds), 2008)

## 10. Selección de Tecnología para la Obtención de Biogás a partir de la FORSU.

Expuestos los métodos de aprovechamiento, anteriormente descritos, ahora podemos entender el cómo y el porqué es posible hacer un efectivo aprovechamiento de la FORSU, pero si nos enfocamos en la energía calorífica generada a partir de la combustión del Biogás derivado de la FORSU, es necesario conocer las tecnologías que posibilita el aprovechamiento del Biogás.

Existen modelos que dependen de, si son de flujo Continuo, Semi-continuo o Discontinuo, por lotes o baches.

### 10.1. Biodigestores de Flujo Continuo

Como su nombre lo indica, se cargan continuamente, y principalmente tienen la finalidad de tratamiento de aguas negras, así como de producción a gran escala por un suministro muy constante de materia orgánica por lo que requiere el uso de alta tecnología para el calentamiento del sustrato, para el control de la calidad del gas resultante, plantas enteras de desulfuración, grandes compresoras, cadenas de distribución, plantas de almacenamiento, antorcha de desfogue por lo que se entiende que es sobre todo de uso industrial o de grandes granjas.

Los biodigestores de desplazamiento horizontal tienen una cámara de digestión alargada, con un perfil cuadrado, rectangular o en V, dependiendo de las características del terreno o conveniencia. En este diseño, los residuos se van degradando a medida que transitan a lo largo del biodigestor. Esta característica lo hace útil en el procesamiento y aprovechamiento de residuos y materiales que requieran un

tratamiento prolongado, tales como excretas humanas ciertos desperdicios de sacrificio de animales, cierto material vegetal muy fibroso o difícil de degradar.

Se utilizan generalmente para explotaciones agropecuarias que generan grandes cantidades diarias de residuos criaderos de porcinos, granjas avícolas y ganadería intensiva; es también muy útil para comunidades pequeñas que desean de estabilizar y neutralizar los residuos orgánicos municipales antes de verterlos al ambiente.

Para un biodigestor de desplazamiento horizontal de pequeña escala, se recomienda, por cuestiones de diseño, volúmenes mayores a los quince 15 m<sup>3</sup> aproximadamente; pues la excavación de un pozo en forma vertical puede resultar problemática, si es que el nivel freático esté muy cercano a la superficie y puede aparecer demasiada humedad. El agua circula en “flujo pistón”, como si fuese la circulación producida en el intestino de algún mamífero.

Este tipo de flujo permite que cada porción del residuo que ingresa por un extremo cumpla el tiempo de residencia necesario dentro del biodigestor antes de salir por el otro extremo.

## 10.2. Biodigestores de Flujo Discontinuo

Se cargan una sola vez y se retira cuando ya se ha dejado de producir Biogás, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.

## 10.3. Biodigestor Semi-Continuo

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 en los días. Los principales, son el Hindú, el Chino, y el Taiwanés, cada uno con ventajas y desventajas, como si se quiere aprovechar más el Biogás, o el biol, si se quiere usarlo para fines sanitarios o de producción, diversas ventajas que veremos más adelante.

En el presente trabajo nos centraremos en los BD de régimen Semi-continuos, al ser los usados en medio rural, así como los más extendidos, de los demás mencionaremos algunas características de construcción y funcionamiento.

Entre las principales características de los biodigestores los hay de cúpula o tambor; horizontales o verticales; según la tasa de descarga; según el tiempo de retención hidráulico; según el tipo de material y según el material de alimentación. En este sentido podemos entender que los modelos existen de acuerdo a las variables requeridas y

disponibles, por tanto se mostrarán modelos construidos con base a las anteriores variables.

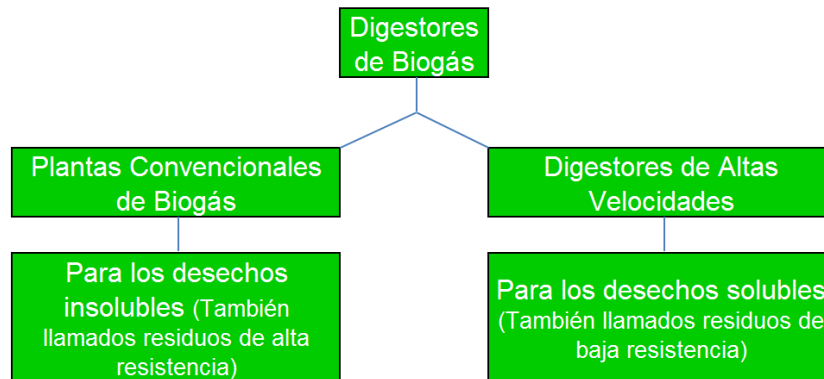


Figura 13. Tipos de Biodigestores

#### 10.4. Componentes Generales de una Planta de Biogás

- Tubería de entrada: La suspensión se mueve en el digestor a través de la entrada de la tubería al tanque.
- Tanque de mezclado: la materia prima como el estiércol se recoge en el tanque de mezcla. Con el uso de agua suficiente, el material se mezcla a fondo hasta que se forma una suspensión homogénea.
- Digestor: en el interior del digestor, la suspensión se fermenta. El Biogás se produce a través de la acción bacteriana.
- Gasómetro o domo de almacenamiento de Biogás: el Biogás formado, consigue así ser recogido en el contenedor de Biogás. Se mantiene el Biogás hasta el momento en que se transporta para el consumo.
- Tubo de salida: La suspensión se descarga en el tanque de salida. Esto se hace a través de la tubería de salida o la abertura en el digestor.
- Gasoducto: El gasoducto transporta el Biogás hasta el punto de utilización como una estufa o una lámpara.

#### 10.5. Modelos o Tipos de Biodigestores

##### 10.5.1. Biodigestor Hindú de Tambor o Campana Flotante

Este se compone de un pozo profundo, y un tambor flotante (por lo general de acero dulce). Se denomina tambor flotante debido a que este se eleva por la presión del Biogás que se va acumulando, presión que es constante generada por el peso del tambor (la presión es equivalente al peso de gasómetro en una unidad de área).

En el depósito de este biodigestor, la entrada es más alta que la salida, creando una presión hidrostática que ayuda a la suspensión para moverse a través del sistema. El gasto excesivo de presión de Biogás alcanza 8 - 10 cm de columna de agua.

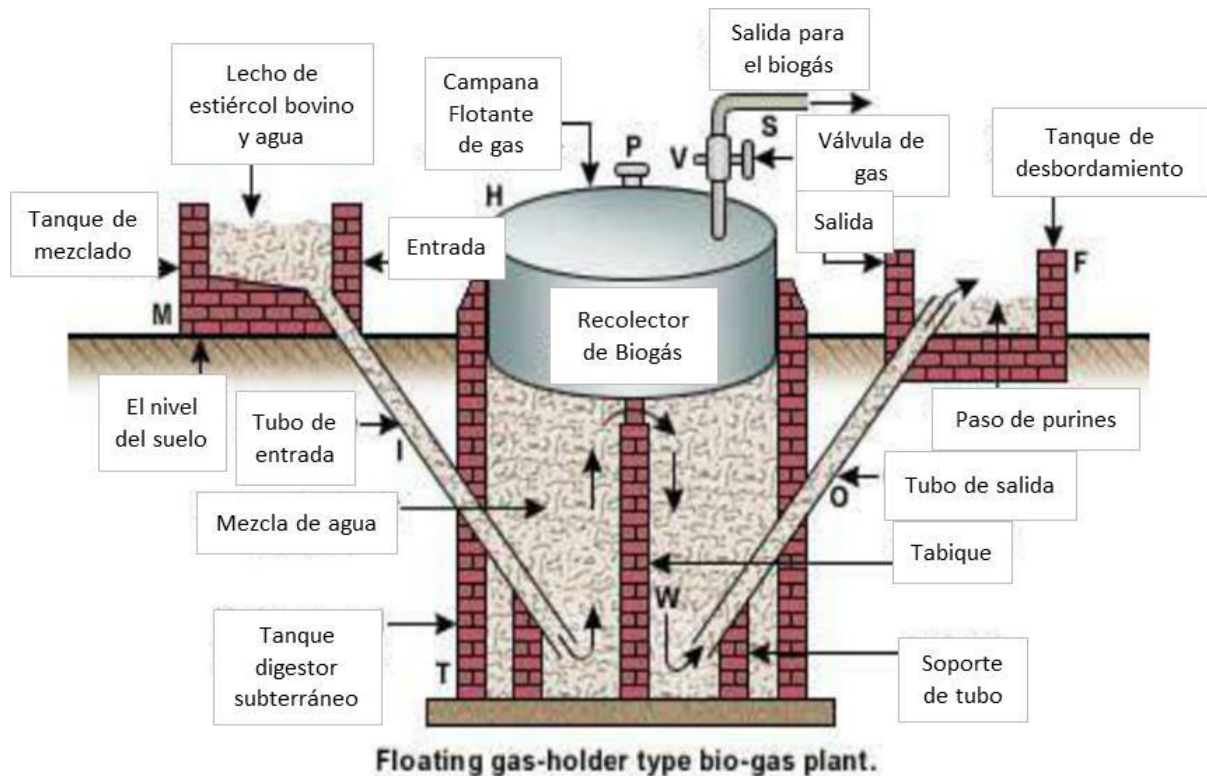


Figura 14. Gráfica Planta de Biogás tipo Campana Flotante de Gas.



Figura 15. Planta de Biogás tipo Campana Flotante de Gas.

Otra tecnología reconocida y aprobada por el gobierno de India en el año de 1986, es el Deenbandhu, este diseño consiste en dos semiesferas de diferentes diámetros, unidas por sus bases en forma de la talladora, reduciendo la superficie de la planta de Biogás, pero permite reducir costos en la construcción. La curvatura en la parte inferior de este digester anula la presión de la tierra; esto hace que la resistencia estructural de la misma sea más resistente que una estructura rectangular.

#### 10.5.2. Biodigestor Chino de Domo o Cúpula Fija

Digestor inventado en china en los años 30 y 60, que en su diseño está compuesto de un compartimiento subterráneo fabricado en ladrillo o cámara de fermentación con una cúpula en la parte superior para el almacenamiento del Biogás. La cámara de fermentación y el soporte del Biogás se combinan como una unidad.

El movimiento y el peso de la pasta digerida deciden la presión del Biogás, la cual es variable (columna de agua de 0-90 cm)

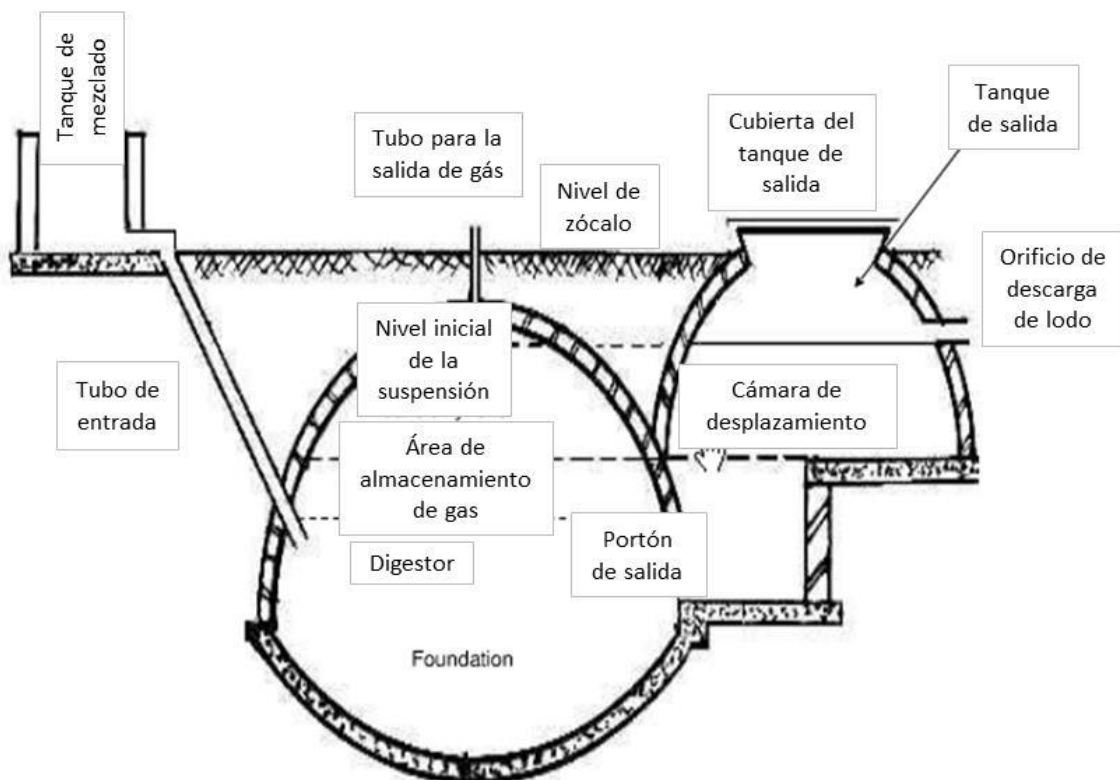


Figura 16. Planta de Biogás Deenbandhu.

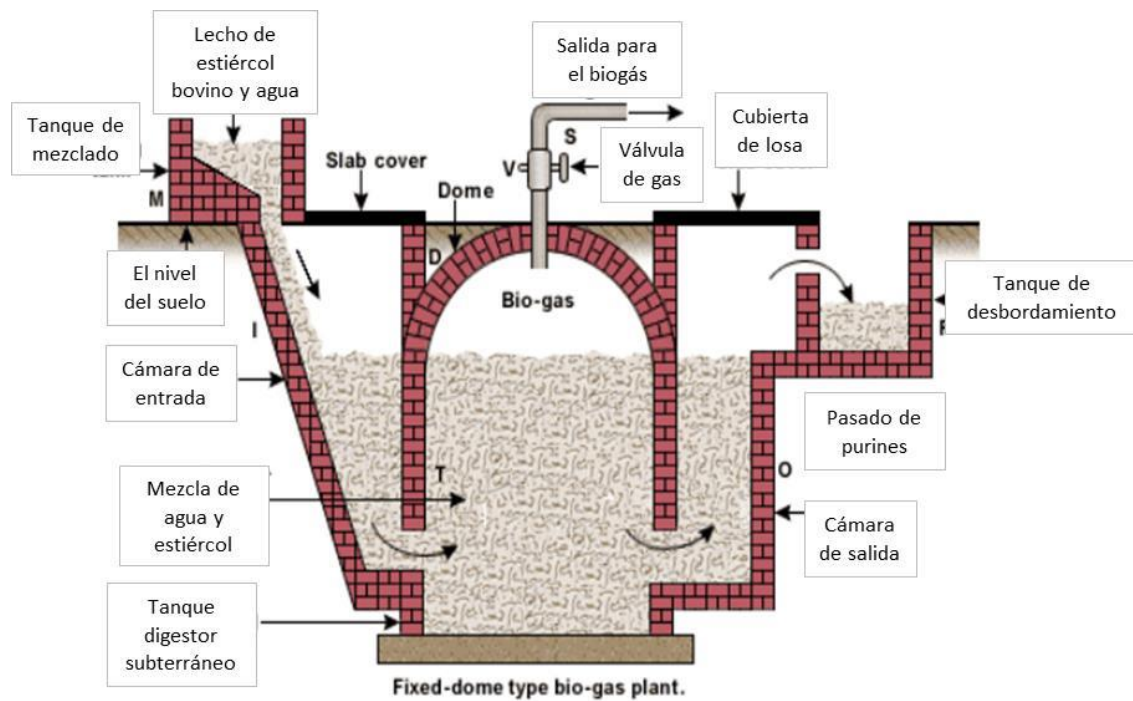


Figura 17. Gráfica Planta de Biogás de Domo Fijo.



Figura 18. Planta de Biogás de Domo Fijo.

### 10.5.3. Biodigestor de alta velocidad.

También son conocidos como biodigestores de flujo inducido y sus principales características de este tipo de digestores son:

1. Los que el tiempo de residencia para la biomasa sólida de los lodos o SRT por su sigla en inglés, pasa a través del sistema por un tiempo mucho mayor que el tiempo de residencia hidráulico o HRT por su sigla en inglés.
2. Anaerobios de crecimiento lento, se pueden mantener en el reactor en alta concentración, lo que permite una alta tasa de conversión volumétrica.
3. Ampliamente utilizados para el tratamiento de aguas residuales.
4. La retención del lodo en el reactor es por traumatismo sobre el material de soporte (microorganismos que se pegan a las superficies, por ejemplo material de filtro en el "filtro anaeróbico") o auto-agregación en gránulos (microorganismos que se adhieren entre sí, por ejemplo gránulos de lodo).
5. Por ser anaeróbicos, se desarrolla una película fija (mantas de lodos) de bacterias en el digestor durante largos períodos relativos y prevé la SRT largo y corto de la HRT.
6. Las bacterias dendríticas crecen en película y se fijan como una "cuerda" creando una masa en los medios de comunicación de apoyo o como acumulaciones de sólidos en el interior de las aberturas o huecos de los medios de apoyo (tales como grava y/o el plástico). Estas bacterias adsorben los compuestos orgánicos solubles, mientras que los compuestos orgánicos insolubles se adsorben a la superficie de las mismas.
7. El flujo de aguas residuales a través del sistema de película fija puede ser desde la parte inferior a la parte superior (flujo ascendente) o desde la parte superior a la parte inferior (flujo descendente).

Un ejemplo claro para comprender porque el digestor de alta velocidad es el digestor de tercera generación, es debido a que este modifica radicalmente al de tipo Hindú tradicional expuesto anteriormente, aunque sigue los lineamientos de esta escuela. Ha logrado una eficiencia de trabajo en forma continua que permite cargarlo con toda clase de materiales, hasta un 50 o 60% de materia de origen vegetal mezclada con excrementos, empleando una sola unidad que trabaja en forma de digestor continuo.

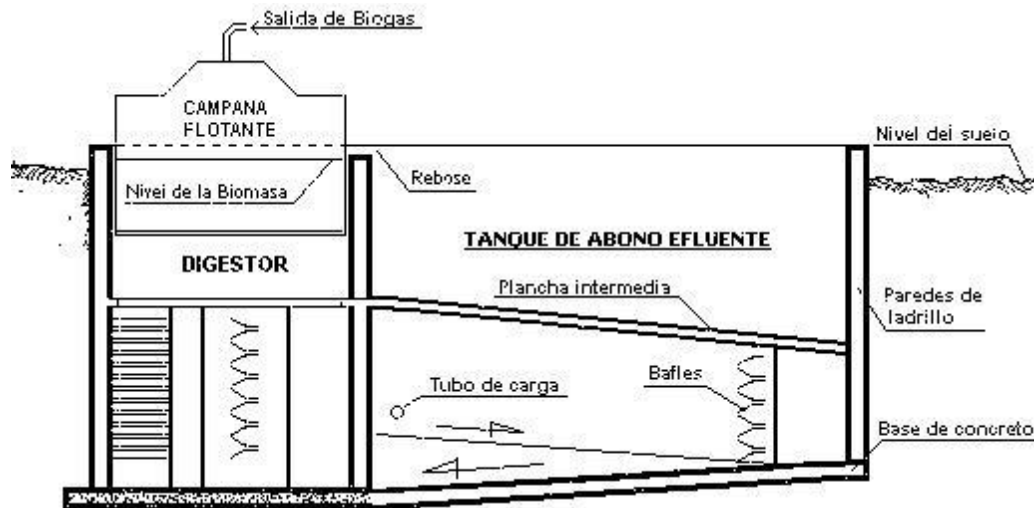


Figura 19. Digestor de Tercera Generación ((ODEPA), 2009)

#### 10.5.4. Biodigestor Taiwanés o de Estructura Flexible.

También es conocido comúnmente como biodigestor de chorizo, su diseño es originado en Taiwan – China en los años 60's, debido a los comunes bajos ingresos de la comunidad rural. Particularmente este diseño rectifica los problemas experimentados en digestores con ladrillo y metal, entre otros los altos costos en los materiales, fabricación, tiempo de construcción y mantenimiento, gracias a que se empleó inicialmente como material Nylon recubierto de neopreno, luego PVC recubierto con un material llamado plástico barro rojo RMP, por su sigla en inglés, que es producido a partir de los residuos de las refinerías de aluminio y posteriormente hasta la actualidad se hace uso de polietileno por su bajo costo y resistencia

El digestor de membrana es extremadamente ligero y puede ser instalado fácilmente en la excavación de una zanja poco profunda y de una longitud que puede variar según los requerimientos volumétricos; la zanja es ligeramente más profunda que el radio del digestor mismo.



Figura 20. Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

Una vez dispuestos los materiales en mención y en las cantidades requeridas, se sugiere realizar el seguimiento a las siguientes recomendaciones dadas por la Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda EARTH, para la construcción, instalación y puesta en marcha del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.

Bien sea previo o posterior al alistamiento del polietileno, se requiere construir una cárcava que debe tener una capacidad instalada coherente con la longitud y diámetro del polietileno, teniendo particular cuidado en las cuatro paredes ya que estas no pueden ser totalmente verticales, deben tener una leve pendiente o talud a fin de que con el paso del tiempo no colapsen, así mismo es necesario evitar que en la base y en las paredes o taludes queden aristas o piedras expuestas que puedan rasgar o perforar el polietileno, razón por la cual se recomienda forrar las paredes o taludes con lonas de polietileno de alta densidad reutilizadas o polisombra de encerramiento negra o verde de polietileno de alta densidad o plástico negro o en el mejor de los casos con geomembrana.



Figura 21. Ejemplo de cárcava para Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

En cada uno de los extremos angostos de la cárcava principal, se deben cavar una cárcava conexa cuya base debe tener una inclinación alrededor de los 45°, con un ancho que debe ser coherente con el diámetro de la caneca plásticas de 15 galones.



Figura 22. Cárcava conexas al Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

Extender totalmente el polietileno tubular, con mucho cuidado de no rasgar o perforar. Para incrementar la resistencia a la presión, a las inclemencias climáticas y dar mayor durabilidad en el tiempo, se sugiere que el biodigestor sea construido con una doble capa, esto se logra introduciendo una sección de polietileno tubular dentro de otra, ambas secciones de polietileno deben tener las mismas características de calibre, longitud y libre de rasgaduras o perforaciones.

Al polietileno tubular se le debe realizar una perforación para la instalación de la válvula de salida del Biogás, esta perforación debe permitir el paso muy ajustado de la rosca del macho en PVC y la ubicación de la perforación, para la válvula, debe ser en la parte superior del polietileno tubular, a tres metros en uno de los extremos del mismo, y claramente direccionado a donde se pretenda instalar el quemador.

El ensamble de las piezas para la válvula de salida del Biogás se realiza enroscando la arandela rígida (acrílico, madera, fibra de vidrio, material sintético o metálica), con los bordes pulidos para que no rasgue el polietileno, en la rosca del acople macho quedando la arandela presionada. Luego se introduce el empaque hecho en neumático, asegurándose que entre de manera forzada, evitando así posibles fugas. Teniendo esta sección de la válvula armada, se introduce en la perforación realizada en el polietileno, de adentro hacia fuera orientando la arandela de caucho hacia el polietileno, luego se enrosca el otro empaque hecho en neumático, asegurándose que entre de manera forzada, evitando así posibles fugas y sobre este otra arandela rígida. Enroscar al acople macho, el acople hembra previamente ensamblada al codo con tuvo de PCV.



Figura 23. Instalación válvula de salida del Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

Introducir en la cárcava, el polietileno tubular con mucho cuidado de no rasgar o perforar, orientando la válvula hacia arriba; introducir cada uno de los extremos del polietileno tubular en las canecas plásticas de 15 galones, estos deben tener los bordes pulidos para que no rasgue el polietileno y en lo posible forrados con costales de lona de polietileno de alta densidad.

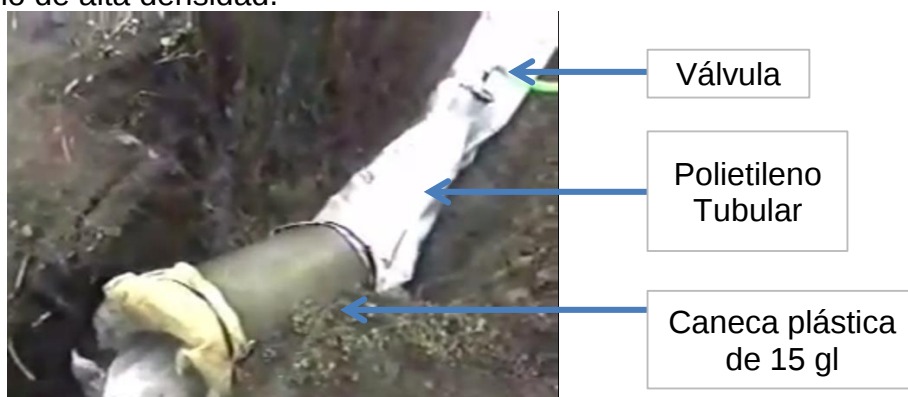


Figura 24. Instalación de canecas plásticas de 15 galones al polietileno tubular del Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

El ensamble de las piezas para la válvula de seguridad se realiza haciendo inserción solo a presión, sin adición de soldadura, de una sección de 30 cm de longitud de tubo gris en PVC, esto con el fin de poder realizar cambio de la esponjilla metálica cuando se haga necesario; luego insertar el tubo en el extremo inferior de la "T", inserte la esponjilla metálica en la "T" e inserte en ambos extremos laterales los niples previamente limpios y con soldadura para PVC.



Figura 25. Inserción de la esponjilla metálica en válvula de seguridad para el Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

En uno de los niples insertar el codo y a este, insertar otro niple limpio y con soldadura para PVC.



Figura 26. Válvula de seguridad para el Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

La sección de la válvula en PVC se inserta en el envase de PET, con capacidad para 3 Lts, al que se le deben hacer agujeros en contorno a un mismo nivel, a la altura media.

Instalar un poste de madera enterrando un extremo en la tierra y en el otro extremo instalar la válvula de seguridad amarrando y dejando muy bien asegurado el envase de PET con una correa en neumático reutilizado.



Figura 27. Válvula de seguridad instalada para el Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible

La válvula de salida y la válvula de seguridad se unen con la manguera plástica, tipo jardín, de 1¼", insertando a presión en cada uno de los extremos las válvulas y asegurándolas muy bien con correas en neumático reutilizado.

Para verificar que no hay escapes y eliminar todas las arrugas en el biodigestor Taiwán o Estructura Flexible, uno de los extremos del polietileno tubular se dobla y amarra fuertemente con una correa en neumático, al otro extremo se amarra fuertemente con una correa en neumático, una sección de manguera tipo jardín que a su vez se conectara, amarrando fuertemente con una correa en neumático, a una sección de tubo galvanizado, que debe estar inserta y amarrada fuertemente con una correa en neumático, al exhosto de un vehículo, esto con el objetivo de llenar totalmente el biodigestor Taiwán o Estructura Flexible con humo. El indicador de llenado total del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible se evidencia cuando la válvula de seguridad, estando llena de agua por debajo de los agujeros, burbujea.

Verificado que no tiene escapes el biodigestor Taiwán o Estructura Flexible, se desconecta la manguera del exhosto y por la misma se llena de agua el biodigestor Taiwán o Estructura Flexible, hasta llegar al nivel donde el humo no pueda pasar o escapar, cuando esto ocurra, se abren los extremos del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible para amarrarlos fuertemente con correas en neumático, a la caneca plástica de 15 gl.



Figura 28. Extremo del polietileno tubular amarrado con correas la caneca plástica.

Finalmente, las excretas serán conducidas por una canal o tubería, para que ingresen por uno de los extremos del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.

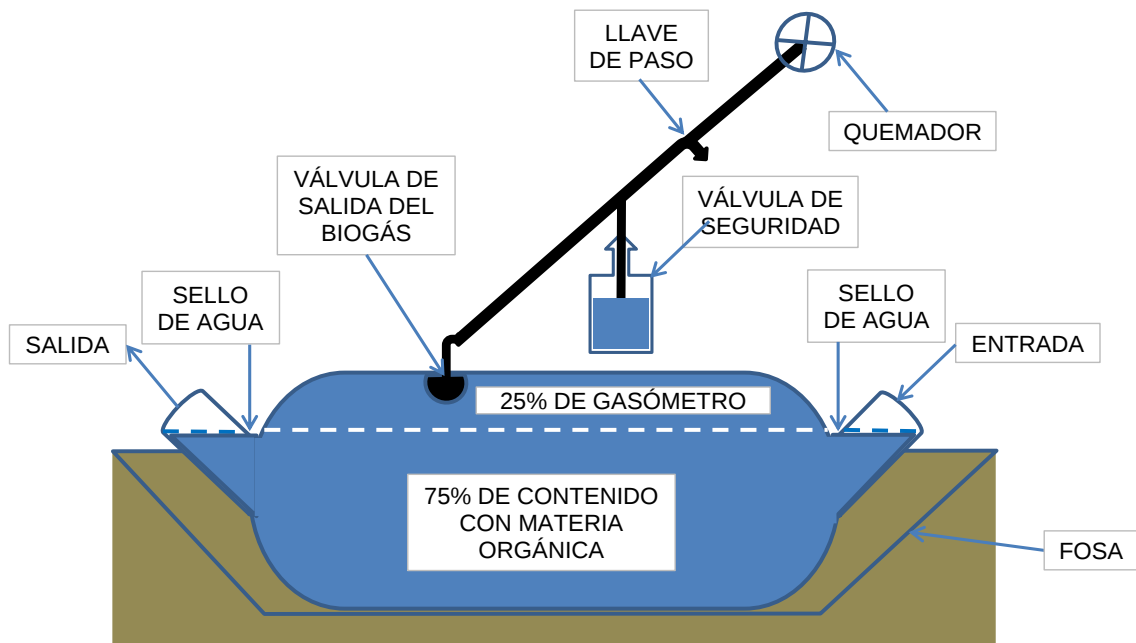


Figura 29. Partes del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.

Acciones correctivas:

- Si la producción de Biogás se detiene o se ve reducida, verificar y corregir si existen posibles entradas de aire al contenedor por los extremo, cambio o reducción de la T° o cambio del pH.

- Si la producción de Biogás se detiene o se ve reducida por efecto de la entrada del aire por alguno de los extremos del digestor, llene con agua o con más biomasa líquida hasta sellar.
- Si la producción de Biogás se detiene o se ve reducida por efecto de la reducción de la T° a causa de largos periodos de lluvia o baja temperatura en el ambiente, cubra el digestor con polietileno negro de tal modo que se reduzcan las corrientes de aire sobre el digestor.
- Si la producción de Biogás se detiene o se ve reducida por efecto de la reducción de cambio del pH, medir la acidez o alcalinidad y realizar la acción requerida aplicando cal.
- Si la producción de Biogás se detiene o se ve reducida, verifique que la llave de la válvula de Biogás está abierta; inspeccione si en la línea de Biogás hay perforaciones o fracturas, selle con soldadura y un trozo de tubo o manguera o si es necesario, cierre la llave de la válvula y cambie totalmente la pieza o sección.

## **11. Selección de Tecnologías para Obtención de Biogás a Partir de Residuos Orgánicos.**

### **11.1. Análisis de ventajas operativas y técnicas de las tecnologías.**

En términos generales, cualquiera de los biodigestores presenta las siguientes bondades:

- Aporta conocimiento y nuevas costumbres culturales a corto plazo, a la idiosincrasia.
- La climatogeografía de la zona, usualmente no es limitante para su establecimiento.
- Admite soluciones energéticas (cogeneración de energía térmica), agronómicas (su residuo es usado como abono), sanitarias (eliminación de malos olores y vectores) y económicas (generación de ingresos y reducción de gastos).
- Tecnología accesible.
- Fuente de ingresos por bienes y/o servicios energéticos, agronómicos y sanitarios.
- Admite acciones que mitigan la generación de vectores y la contaminación del aire, del suelo y de los recursos hídricos, afectando positivamente la salubridad en seres vivos.
- Reduce el uso de materiales combustibles altamente contaminantes.

- Reducción de la polución, sobre todo en áreas urbanas.
- Contribuye en la reducción de desechos orgánicos.
- Reduce los olores.
- Se elimina o controlan fuentes generadoras de patógenos.
- Herramientas y materiales accesibles a los sectores económicos en condición de vulnerabilidad.

#### 11.2. Algunas ventajas y desventajas específicas de cada tecnología

| TECNOLOGÍA                                     | VENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | DESVENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Biodigestor Hindú de Tambor o Campana Flotante | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite medir nivel del Biogás.</li> <li>• El manejo sencillo.</li> <li>• Presión constante.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos de mantenimiento (Uso de impermeabilizantes, sellantes para líquidos y gases, aislante térmico y anticorrosivo)</li> <li>• Puede afectar alguna capa freática.</li> <li>• Variable capacidad de soportar cargas estáticas y dinámicas.</li> <li>• Uso de contrapesos sobre acampana para mantener presión constante.</li> </ul> |
| Biodigestor Chino de Domo o Cúpula Fija        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos mantenimiento.</li> <li>• Vida útil alrededor de 20 años.</li> <li>• Protegida contra bajas temperaturas.</li> <li>• No posee partes móviles</li> <li>• No posee partes metálicas oxidables.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión no es constante.</li> <li>• Alto riesgo de daño la estructura.</li> <li>• Materiales de alta calidad costosos.</li> <li>• Mano de obra calificada y costosa.</li> <li>• Mantenimiento sistemático.</li> </ul>                                                                                                                        |
| Biodigestor de Alta Velocidad                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evita formación de costra.</li> <li>• Más eficiente mediante el incremento de la T°.</li> <li>• Fácil mantenimiento.</li> <li>• Altas capacidades de contenido.</li> <li>• Muy compacto.</li> <li>• Limpieza automática.</li> <li>• Bajo gasto de mantenimiento.</li> <li>• T° y degradación uniforme.</li> <li>• Menor tiempo de retención</li> <li>• Eficiente en digestión de aguas residuales.</li> <li>• Impide concentraciones de</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos de construcción y mantenimiento debido a tecnología que puede incorporar.</li> <li>• Requiere de personal idóneo</li> </ul>                                                                                                                                                                                                     |

| TECNOLOGÍA                            | VENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | DESVENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | material tóxico para el sistema.<br>• Duplica la producción de Biogás.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Biodigestor Taiwanés o Balón Flexible | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente eventos telúricos.</li> <li>• Hermético y flexible</li> <li>• Reducen pérdidas.</li> <li>• Acción de carga y descarga no requiere pausar.</li> <li>• Alta durabilidad respecto a los otros tipos de digestores.</li> <li>• Fácil y bajo gasto de mantenimiento y/o reparación.</li> <li>• Permite medir el volumen del Biogás.</li> <li>• Vida alrededor de 20 años con protección.</li> <li>• Puede ser protegido contra bajas temperaturas.</li> <li>• Altas capacidades de contenido.</li> <li>• Muy compacto.</li> <li>• La presión del Biogás puede ser corregida.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Susceptible a perforaciones. Tiempo de vida de 3 años, sin protección.</li> <li>• Requiere instalaciones de seguridad.</li> <li>• Costos de inversión en infraestructura de protección. La presión no es constante</li> </ul> |

Tabla 6. Ventajas y Desventajas Técnicas y Operativas de los modelos de Biodigestores.

Complementario a las ventajas y desventajas de cada modelo de biodigestor, siempre es necesario tener en cuenta medidas de seguridad que permitan evitar o prevenir accidentes, en este sentido se debe:

- No instalar elementos en combustión o artefactos que generen corto eléctrico, cerca al digestor.
- En el lugar donde se instalen los quemadores, debe estar bien ventilado.
- En los eventos que se considere necesario el uso de motor, cableado y alumbrado, estos deben ser a prueba de explosión.
- Inspeccionar meticulosamente el sistema en busca de posibles fugas de Biogás.
- Cuando se realicen operaciones de ignición del Biogás, mantener el pelo recogido y no usar prendas sueltas.
- Es ideal hacer uso de dispositivos, con alarma, de detección de fugas de Biogás.
- Tener mucho cuidado con elementos cortopunzantes cerca al biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.
- Cuando se realice el vaciado del digestor, no conducir el contenido a fuentes hídricas.

### 11.3. Selección de la alternativa tecnológica.

| Características comunes entre los digestores | Tipo de biodigestor                                                                                                                                                                                               | Calificación |      |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------|
|                                              | Biodigestor Hindú de Tambor o Campana Flotante                                                                                                                                                                    | Bueno        | Malo |
| Generación de material a digerir             | Alta, más de 50kg/día                                                                                                                                                                                             | -            | -    |
| Rango de capacidad promedio                  | 5 a 20 m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                             | 1            |      |
| Área de establecimiento                      | Biodigestor subterráneo. Requiere la excavación de un pozo profundo. Debe disponer de un área perimetral efectiva de prevención media, relativo al tamaño del digestor.                                           |              | 1    |
| Materiales de construcción                   | Cemento, grava gruesa, arena, gravilla, puntillas, alambre, varilla de hierro, ladrillo, estuco plástico, cúpula flotante, anticorrosivo o pintura anticorrosiva, tubería en PVC, limpiador y soldadura para PVC. |              | 1    |
| Mano de obra calificada en construcción      | Sí                                                                                                                                                                                                                |              | 1    |
| Complejidad de la operación del sistema      | Sencilla                                                                                                                                                                                                          | 1            |      |
| Restricción de materiales                    | Sí                                                                                                                                                                                                                |              | 1    |
| Requerimiento de mantenimiento               | Alto y costoso                                                                                                                                                                                                    |              | 1    |
| Durabilidad promedio                         | 20 años                                                                                                                                                                                                           | 1            |      |
| Nivel de presión del Biogás                  | Constante                                                                                                                                                                                                         | 1            |      |
| Nivel de la T°                               | Variable                                                                                                                                                                                                          |              | 1    |
| Frecuencia de las fugas                      | Alto                                                                                                                                                                                                              |              | 1    |
| Nivel de retención de los materiales         | Alto                                                                                                                                                                                                              |              | 1    |
| Puntaje                                      |                                                                                                                                                                                                                   | 4            | 8    |
| Calificación                                 |                                                                                                                                                                                                                   | 33,3         | 66,7 |

Tabla 7. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor Hindú.

| Características comunes entre los tipos de digestores | Tipo de biodigestor                                                                                                                                                                       | Calificación |      |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------|
|                                                       | Biodigestor Chino de Domo o Cúpula Fija                                                                                                                                                   | Bueno        | Malo |
| Generación de material a digerir                      | Alta, de 20 a 50kg/día                                                                                                                                                                    |              |      |
| Rango de capacidad promedio                           | 5 a 10 m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                     | 1            |      |
| Área de establecimiento                               | Biodigestor subterráneo. Requiere la excavación de un poso medianamente profundo. Debe disponer de un área perimetral efectiva de prevención muy amplia, relativa al tamaño del digestor. |              | 1    |
| Materiales de construcción                            | Cemento, grava gruesa, arena, gravilla, puntillas, alambre, varilla de hierro, ladrillo, estuco plástico, tubería en PVC, limpiador y soldadura para PVC.                                 |              | 1    |
| Mano de obra calificada en construcción               | Sí                                                                                                                                                                                        |              | 1    |
| Complejidad de la operación del sistema               | Sencilla                                                                                                                                                                                  | 1            |      |
| Restricción de materiales                             | No                                                                                                                                                                                        | 1            |      |
| Requerimiento de mantenimiento                        | Medio y costoso                                                                                                                                                                           |              | 1    |
| Durabilidad promedio                                  | 20 años                                                                                                                                                                                   | 1            |      |
| Nivel de presión del Biogás                           | Variable                                                                                                                                                                                  |              | 1    |
| Nivel de la T°                                        | Constante                                                                                                                                                                                 | 1            |      |
| Frecuencia de las fugas                               | Medio                                                                                                                                                                                     | 1            |      |
| Nivel de retención de los materiales                  | Alto                                                                                                                                                                                      |              | 1    |
| Puntaje                                               |                                                                                                                                                                                           | 6            | 6    |
| Calificación                                          |                                                                                                                                                                                           | 50,0         | 50,0 |

Tabla 8. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor Chino.

| Características comunes entre los tipos de digestores | Tipo de biodigestor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Calificación |      |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------|
|                                                       | Biodigestor de Alta Velocidad                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Bueno        | Malo |
| Generación de material a digerir                      | Alta, de 50kg/día                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |      |
| Rango de capacidad promedio                           | 5 a 15 m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |              | 1    |
| Área de establecimiento                               | Biodigestor subterráneo. Requiere la excavación de un poso medianamente profundo. Debe disponer de un área perimetral efectiva de prevención muy amplia, relativa al tamaño del digestor.                                                                                                                                                |              | 1    |
| Materiales de construcción                            | Depende del tipo de construcción, si es subterránea o superficial y del nivel de implementación tecnológica con el uso de mecanismos e implementos de automatización del sistema. Este sistema esta complementado con una caldera que permite mantener un elevada T° constante y un agitador que permite la homogenización del sustrato. |              | 1    |
| Mano de obra calificada en construcción               | Sí                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1            |      |
| Complejidad de la operación del sistema               | Sencilla                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1            |      |
| Restricción de materiales                             | Según tipo de cúpula                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,5          | 0,5  |
| Requerimiento de mantenimiento                        | Alto y costoso                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              | 1    |
| Durabilidad promedio                                  | 20 años<br>Agitador 10años                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1            |      |
| Nivel de presión del Biogás                           | Variable<br>Según el tipo de cúpula                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,5          | 0,5  |
| Nivel de la T°                                        | Constante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1            |      |
| Frecuencia de las fugas                               | Variable<br>Según el tipo de cúpula                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,5          | 0,5  |
| Nivel de retención de los materiales                  | Bajo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |              | 1    |
| Puntaje                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 5,5          | 6,5  |
| Calificación                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 45,8         | 54,2 |

Tabla 9. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor de Alta Velocidad.

| Características comunes entre los tipos de digestores | Tipo de biodigestor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Calificación |      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------|
|                                                       | Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Bueno        | Malo |
| Generación de material a digerir                      | Baja, de 5 kg/día                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |              |      |
| Rango de capacidad promedio                           | 4 a 100 m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1            |      |
| Área de establecimiento                               | Biodigestor semisubterráneo o superficial.<br>No necesariamente requiere la excavación de un poso.<br>Puede instalarse en una laguna o reservorio.<br>Debe disponer de un área perimetral efectiva de prevención pequeña, relativa al tamaño del digestor.                                                                                                                                                                                                                                                         | 1            |      |
| Materiales de construcción                            | Polietileno calibre 6 u 8; 2 canecas plásticas de 15gal., manguera plástica para jardín de 1¼", 1 adaptador macho PVC de ½", 1 adaptador macho PVC de 1", 1 adaptador hembra PVC de 1", 1 "t" PVC de 1", 2 bujes PVC de 1 a ½", 3 codos de 90° en tubería gris PVC de 1", 1 tapón liso PVC de 1", 2 secciones tubería gris PVC de ½", 1 sección tubería conduit PVC de 1" o manguera negra en polietileno reciclado de ¼", 1 frasco limpiador para PVC, 1 frasco soldadura para PVC, 1 sección tubería galvanizada | 1            |      |

| Características comunes entre los tipos de digestores | Tipo de biodigestor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Calificación |      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------|
|                                                       | Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Bueno        | Malo |
|                                                       | de ½", con rosca en ambos extremos, 1 codo galvanizado de ½", 1 niple de 10 a 12 cm galvanizado de ½", roscada en ambos extremos, 4 abrazaderas metálicas de cremallera con ajuste desde 1 hasta 1½", 1 llave de paso de ½", 2 arandelas en acrílico, madera, fibra de vidrio, material sintético o metálicas que permita el paso de la rosca del macho en PVC de 1", 1 marcador de tinta oscura indeleble, 1 envase de PET 3 lts. Reciclado, sin tapa, 1 envase de lata de ½ gal., redondo, 2 empaques en neumático reutilizado, de 20x20 cm. En forma de ruana o 20 cm de diámetro y con una ranura central que permita la entrada muy ajustada de la rosca del macho en PVC de 1", 6 correas en neumático reutilizado, de 5 cm de ancho por 2 mt de longitud, 8 lonas de polietileno de alta densidad reutilizadas con capacidad de 40 kg., 2 ladrillos reutilizados y 1 esponjilla metálica. |              |      |
| Mano de obra calificada en construcción               | No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1            |      |
| Complejidad de la operación del sistema               | Sencilla                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1            |      |
| Restricción de materiales                             | No                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1            |      |
| Requerimiento de mantenimiento                        | Bajo y económico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1            |      |
| Durabilidad promedio                                  | 12 años                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              | 1    |
| Nivel de presión del Biogás                           | Variable                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |              | 1    |
| Nivel de la T°                                        | Variable                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |              | 1    |
| Frecuencia de las fugas                               | No es común                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1            |      |
| Nivel de retención de los                             | Alto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |              | 1    |

| Características comunes<br>entre los tipos de digestores | Tipo de biodigestor                      | Calificación |      |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|------|
|                                                          | Biodigestor Taiwán o Estructura Flexible | Bueno        | Malo |
| materiales                                               |                                          |              |      |
|                                                          | Puntaje                                  | 8            | 4    |
|                                                          | Calificación                             | 66,7         | 33,3 |

Tabla 10. Caracterización y Calificación de las Cualidades del Biodigestor Taiwán.

Teniendo en cuenta las ventajas, las desventajas, las puntuación dada a cada una de las características planteadas en la tabla anterior y teniendo como criterio base de calificación la capacidad económica de una unidad productiva agropecuaria de minifundio en Colombia, que es inferior a un salario mínimo mensual legal vigente – smmlv, y la funcionalidad del sistema de digestión para la FORSU, se describirá la tecnología que presenta la mejor calificación o las mejores cualidades, a la hora de establecer un biodigestor.

De acuerdo a la puntuación dada a cada uno de los sistemas, el biodigestor tipo Hindú presenta la menor calificación positiva, llegando al treinta y tres punto tres por ciento (33,3%) y la mayor calificación negativa, alcanzando el sesenta y seis punto siete por ciento (66,7%), en cuanto al alcance de cualidades de funcionalidad de un sistema, y respecto a las mismas, el biodigestor Taiwán presenta la mayor calificación positiva llegando al sesenta y seis punto siete por ciento (66,7%), y la menor calificación negativa alcanzando treinta y tres punto tres por ciento (33,3%). Esta diferencia radica en el costo beneficio entre los dos sistemas. Esta afirmación radica en el costo que puede causar proporcionalmente el establecimiento de los sistemas de acuerdo al volumen de material a digerir, ya que el biodigestor Taiwán en términos de inversión, puede tener mayor capacidad promedio de almacenamiento de material y requiere un área de instalación relativamente más pequeña, por otra parte el biodigestor Taiwán no presenta problemas con la digestión de materiales, como si ocurre con el biodigestor tipo Hindú, así mismo el biodigestor Taiwán no tiene partes movibles no partes metálicas expuestas a la corrosión, tal como ocurre con el biodigestor tipo Hindú. El tiempo de retención es menor el biodigestor Taiwán pero la presión no es tan constante como en el biodigestor tipo Hindú, sin embargo, esta debilidad se detecta y se corrige fácilmente sin costo ni riesgo de fuga como si puede ocurrir en el biodigestor tipo Hindú.

Ahora bien, se puede observar en la tabla que el biodigestor Taiwán respecto a los sistemas de biodigestión tipo Chino o de alta velocidad, también logra superarlos en cuanto al alcance de cualidades orientadas al enfoque económico y/o funcional.

Por las razones expuestas el biodigestor Taiwán, bien sea en una situación que requiera la digestión de altos volúmenes de digestión de materiales generados ya sea

por una comunidad o por una unidad productiva, el biodigestor Taiwán está en la capacidad de satisfacer las necesidades requeridas, y su sistema es lo suficientemente flexible o dinámico, admitiendo mejoras tales como la instalación de medidores de presión, sistemas de alerta, automatización de la operación, aceleración de la digestión ya sea con la inoculación con microorganismos, con el incremento de la temperatura o con la sumatoria de los dos procesos. Todo depende claramente de las necesidades, de las capacidades y del manejo que se le pueda dar, sin requerir avanzados conocimientos tecnológicos.

## **12. Análisis (Costo - Beneficio) de las tecnologías seleccionadas evidenciando la viabilidad y la sustentabilidad ambiental, económica y financiera.**

Enmarcado en las características cualitativas de los modelos de digestores mostrados, es visible el equilibrio costo-beneficio entre los digestores de alta velocidad y el Taiwán o Estructura Flexible debido a que son dos modelos efectivos, según donde sean instalados, es decir, el digestor de alta velocidad en términos generales no es asequible para una economía campesina como lo es un digestor Taiwán o Estructura Flexible, sin embargo el digestor Taiwán puede ser adaptado a los requerimientos de una industria donde usualmente es usado el digestor de alta velocidad.

La construcción de cualquiera de las dos tecnologías o modelos es financieramente viable y económicamente sostenible, teniendo en cuenta la capacidad de inversión y las necesidades o requerimientos de la zona o región, en consecuencia al servicio que prestan, permitiendo la generación de ingresos económicos para la empresa o unidad productiva operadora de este, ya que si desean prestar un servicio a la comunidad y generar un cobro por la prestación del servicio de recolección de la FORSU; por otra parte, puede generar ingresos por la venta de energía eléctrica cogenerada por el aprovechamiento del Biogás en motores a gas, y así mismo puede generar ingresos por la venta de abono orgánico líquido o sólido. En el mismo contexto pero proporcionalmente menor, el biodigestor Taiwán o Estructura Flexible puede proporcionar los mismos beneficios a una población no mayor a dos familias rurales.

### **12.1. Inversión Inicial.**

En cuanto a la inversión inicial se deben tener en cuenta los siguientes requisitos de evaluación, los cuales determinarán puntualmente la inversión inicial de la tecnología que se desee establecer:

1º. El objetivo del proyecto, si está orientado a un predio privado o de servicio público.

- 2º. Las capacidades de producción, recolección y almacenamiento de FORSU a ser gestionada, aprovechada o procesada en el sistema.
- 3º. La localización geográfica, elección del predio o área donde se desea la instalación y puesta en marcha del digestor, teniendo en cuenta
  - a. Fácil acceso.
  - b. Muy soleado.
  - c. Espacio suficiente para el trabajo u operación.
  - d. No inundable.
  - e. No muy pendiente.
  - f. Bajo nivel freático.
  - g. Localizándolo lo mejor posible en un lugar equidistante del acopio de materia prima y de los puntos de consumo del Biogás.
  - h. A no más de cuarenta (40) metros del punto de acopio y
  - i. A no menos de 15 metros de fuentes hídricas.
- 4º. La consulta previa a la comunidad, en el caso que sea requerido.
- 5º. La solicitud de permiso(s) de construcción y funcionamiento, en el caso que sea requerido, de acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial POT.
- 6º. Los estudios (Evaluación de Riesgo) ambientales, geotécnicos, ocupacionales y de ingeniería civil, en el caso que sea requerido.
- 7º. Las actividades previas de adecuación y/o alistamiento del terreno donde se planea realizar la instalación y puesta en marcha.
- 8º. Capacidad de inversión
- 9º. Acceso a la tecnología y a los materiales
- 10º. El nivel y costo de la incorporación de tecnología complementaria.
- 11º. Los tipos, las calidades y las cantidades requeridas de materiales, con base a las necesidades preestablecidas en el numeral 2.
- 12º. Los tiempos estimados de movilización de materiales desde origen hasta destino y los tiempos de construcción.
- 13º. Costo del personal calificado y de la mano de obra
- 14º. El recurso humano requerido.
- 15º. El análisis económico-financiero donde se contempla la Tasa Interna de Retorno TIR y el Costo de Oportunidad
- 16º. Las fuentes de financiación en el caso que sea requerido.

## Costo global de un biodigestor Taiwán o Estructura Flexible en pesos colombianos

| ACTIVIDADES                          | COSTO               |                 |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|
|                                      | Pesos Col.          | US\$*           |
| Consultoría                          | \$ 500.000          | \$ 266,0        |
| Visita a zona                        |                     |                 |
| Diagnostico                          |                     |                 |
| Elección de sitio definitivo         |                     |                 |
| Cotización de materiales             |                     |                 |
| Formulación del proyecto             |                     |                 |
| Compra de materiales (global)        | \$ 500.000          | \$ 266,0        |
| Mano de obra<br>(2 obreros - 2 días) | \$ 140.000          | \$ 74,5         |
| Horas tractor (1 hora)               | \$ 40.000           | \$ 21,3         |
| <b>COSTO TOTAL</b>                   | <b>\$ 1.180.000</b> | <b>\$ 627,7</b> |

\* TRM \$1.880 26-06-2014

Tabla 11. Costos para la construcción de un biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.

### 12.2. Beneficio Económico

Se calcula que en un núcleo familiar, constituido por cuatro (4) personas, dos (2) adultos y dos (2) menores de edad, el costo del consumo promedio día de gas propano – GLP puede ser de \$1.504,0 pesos Col. o US\$ 0,8, que equivale a un costo de consumo anual de \$548.960,0 pesos Col. o US\$ 292.

En caso de un núcleo familiar, constituido por cuatro (4) personas, dos (2) adultos y dos (2) menores de edad, el costo del consumo promedio día de gas natural – GN puede ser de \$1.332 pesos Col. o US\$ 0,7 en estrato 3, que equivale a un costo de consumo anual de \$486.180,0 pesos Col. o US\$ 258,6.

Teniendo como base el costo del consumo anual por núcleo familiar, ya sea en GLP o GN, se puede tener un referente y calcular de cuanto es el ahorro económico para un núcleo familiar con las mismas características de consumo, por lo que se estimara

básicamente el tiempo en que se dará la recuperación de la inversión en la construcción y en la operación anual del biodigestor Taiwán o Estructura Flexible.

Costos aproximado de mantenimiento biodigestor Taiwán, equivalente al 0,05% sobre el valor de inversión inicial.

Año 1: \$59.000,0 – US\$ 31,4

Año 2: \$61.950,0 – US\$ 32,9

Año 3: \$65.050,0 – US\$ 34,6, con un incremento del 0,05% sobre el mismo valor de mantenimiento, para cada uno de los años anteriores.

La inversión es de \$1'180.000,0 + costo de mantenimiento durante tres (3) años \$186.000 = 1'366.000,0 pesos Col. o US\$ 762,6, estos valores comparativamente son muy cercanos, respecto al valor de consumo ya sea de GLP o de GN, por consiguiente el hecho de no tener que realizar pago ya sea por el GLP o por el GN, evita un gasto, convirtiéndose así en la recuperación de una inversión en un periodo de tiempo no mayor a tres (3) años, esto a razón que tres (3) años de consumo de GLP equivalen a \$1'646.880 o tres (3) años de consumo de GN equivalen a \$1'458.540. Esto sin tener en cuenta el ahorro que se puede tener anualmente por la generación y posible autoconsumo y/o comercialización de los desechos causados por la digestión que como bien ya se explicaron anteriormente, son abonos líquidos y sólidos con propiedades muy efectivas para la recuperación de suelos y fertilización de cualquier tipo de cultivo agrícola, piscícola o de lombricultura.

Por tanto, un biodigestor permite tener como beneficios tangibles, prestar un servicio a la comunidad, realizando la recolección selectiva de la FORSU, la producción de Biogás, energía eléctrica o calorífica, abono/fertilizante o alimento, para el autoconsumo o para la comercialización.

### **13. Conclusiones**

Se identificaron plenamente cuatro métodos o sistemas disponibles que es posible implementar en el entorno Colombiano para la obtención de Biogás a partir de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos – FORSU.

De las cuatro (4) alternativa se evidencia, mediante la tabla de calificación de cualidades, que el modelo de biodigestor Taiwán se acomoda de manera eficiente y efectiva a los requerimientos de índole ambiental y técnica, los cuales son aplicables en el contexto Colombiano.

Se puede evidenciar en el análisis Costo-Beneficio, básico, que la implementación del modelo de biodigestión Taiwán o Estructura Flexible es aplicable tanto financiera como económicamente en el contexto Colombiano.

La viabilidad técnica para la producción de Biogás a partir de la FORSU y de manera controlada, es posible obedeciendo estrictamente a las capacidades de producción, a las capacidades de inversión y a las capacidades de gestión financiera y operativa.

Los sistemas para la producción de Biogás son diversos, sin embargo el modelo Chino, el modelo de Alta Velocidad y el modelo Taiwán, en su mayoría son fácilmente ajustables a las necesidades de cada situación.

El sistema o modelo de biodigestor para la producción de Biogás es el biodigestor de Estructura Flexible, debido al fácil acceso y al bajo costo de los materiales de construcción, los cuales pueden ser elaborados o contruidos con materiales reutilizados que pueden estar disponibles en el mismo sitio en el que se va a instalar el biodigestor; así mismo al costo de la mano de obra no calificada y al bajo costo de mantenimiento y de reparación de sus componentes.

Si bien es cierto que el biodigestor de Estructura Flexible posee un menor tiempo de durabilidad de sus partes, también es cierto que su reconstrucción no requiere la compra de todos los implementos, solo los necesarios, permitiendo así duplicar la prolongación de su vida útil.

## BIBLIOGRAFÍA

De La Merced J., Diego; (2012). "Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio Tipo Continuo", Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana.

Dustano, Tito. (2014). Análisis de condiciones técnicas para la creación de una empresa que maneje residuos orgánicos generados en las plantas de sacrificio, plazas de mercado y agroindustria de los municipios de Paipa, Duitama, Sogamoso y Tunja. Informe Final de Investigación desarrollado para optar por el título de Especialista en Gestión de Residuos Sólidos. Universidad EAN.

Forster-Carneiro, et al. Biometanización de la fracción orgánica del residuo sólido urbano: proceso Sebac. T. Dept. de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos, y Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz; página 5.  
[http://www.creaf.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/09\\_Cap%C3%ADtulo8.pdf](http://www.creaf.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/09_Cap%C3%ADtulo8.pdf)

Gómez, J. (2012). Análisis de variables para determinar la viabilidad técnica y económica de la obtención de harina de lombriz a partir de residuos orgánicos. Informe Final de Investigación desarrollado para optar por el título de Especialista en Gestión de Residuos Sólidos. Universidad EAN..

Gómez Wilkinson, Conor. Tratamiento de residuos en proyectos de eficiencia energética, capítulo 5: PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS  
<http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report12/mesal-navarrete.pdf>.

Herrera Restrepo, Juan Alberto – Vélez, Julián Andrés. (2008), Caracterización y Aprovechamiento del Aceite Residual de Frituras para la Obtención de un Combustible (Biodiesel) Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Tecnología Escuela de Tecnología Química,  
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1059/1/6626H565.pdf>.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Biomasa Digestores Anaerobios IDAE. Departamento de Energía.  
[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_digestores\\_07\\_a996b846.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf)

Jiménez, Diego De La Merced. (2012), Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio Tipo Continuo, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Jaramillo Henao, Gladys - Zapata Márquez, Liliana María. (2008), Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia, Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería Posgrados de Ambiental Especialización en Gestión Ambiental <http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>

Martínez S., J; Montoya, N. Análisis preliminar de la viabilidad de obtención de bioetanol a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Producción + Limpia - Julio - Diciembre de 2013. Vol.8, No.2 – 72-84.

Mejía Sánchez, Gaspar M. (1996), Digestión Anaerobia, Universidad Autónoma de Yucatán, Disponible en:

[http://books.google.com.co/books?id=1Sxpl-0KBgoC&pg=PA7&lpg=PA7&dq=Bacterias+hidrol%C3%ADticas-acidog%C3%A9nicas&source=bl&ots=QEjNK8vF7Y&sig=U-DhdcOs-YaXqt\\_7Et37l-PIADM&hl=es&sa=X&ei=47fGUs3WG4G3kQfAl4HIDA&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=Bacterias%20hidrol%C3%ADticas-acidog%C3%A9nicas&f=false](http://books.google.com.co/books?id=1Sxpl-0KBgoC&pg=PA7&lpg=PA7&dq=Bacterias+hidrol%C3%ADticas-acidog%C3%A9nicas&source=bl&ots=QEjNK8vF7Y&sig=U-DhdcOs-YaXqt_7Et37l-PIADM&hl=es&sa=X&ei=47fGUs3WG4G3kQfAl4HIDA&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=Bacterias%20hidrol%C3%ADticas-acidog%C3%A9nicas&f=false).

Montes Ponce de León, Julio. Sostenibilidad de la eliminación de los residuos sólidos urbanos: consideraciones tecnológicas y sociológicas, <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/descargas/2010-2011/aula%2027.10.2010.pdf>.

Morales Gilede, Abel. Producción de energía por combustión de basuras en Bogotá, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional, <http://digital.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/viewFile/19496/20541>.

Muruais, José y Maíllo, Alfonso. (2010), Guía de valorización energética de residuos, AEVERSU (Asociación Española de Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos), Fundación de la energía de la comunidad de Madrid - FENERCOM, Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid, <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-valorizacion-energetica-de-residuos-fenercom-2010.pdf>.

Negret Cordoba, Enrique, (1993), La Nutrición y Alimentación en la Acuicultura de América Latina y el Caribe, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO México D.F., <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab487s/AB487S05.htm>

Rodríguez V. Jenny Alexandra, Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Universidad del Valle, <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>.

Petunchi, Juan O. Procesos de combustión para la eliminación de residuos peligrosos, Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica - INCAPE - (FIQ, UNL-

CONICET), Santiago del Estero 2829 - 3000 - Santa Fe - República Argentina, <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=774>.

Pirólisis y Gasificación (alternativas a la incineración convencional) [http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase8.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase8.pdf)

Proyecto de Acuerdo N°. 329, (2009), "Por el cual se Establecen las Condiciones Técnicas para el Manejo, Almacenamiento, Transporte, Utilización y la Disposición de Aceites Vegetales de Fritura Usados, se crea el Programa Intersectorial de Prevención de la Contaminación y Gestión Ambiental de Residuos de Aceites Vegetales de Fritura Usados y Control de la Contaminación Hídrica en la Ciudad de Bogotá y se dictan otras disposiciones", <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37110>.

Rodríguez V. Jenny Alexandra, Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Ing. Sanitaria Msc., Profesora Asociada de la Universidad del Valle. Cali – Colombia <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>

Universidad Tecnológica de Pereira, (2008). Facultad de Tecnología, Escuela de Tecnología Química, Programa de Tecnología Química, <http://intellectum.unisabana.edu.co:8080/jspui/bitstream/10818/2054/1/130004.pdf>

Varnero Moreno, María Teresa. (2011), Manual de Biogás, MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, Santiago de Chile, [http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual\\_biogas.pdf](http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual_biogas.pdf)

Enlaces web:

- [http://bioarquitectura-bioconstruccion.blogspot.com/2009/05/construyendo-nuestra-unidad-productiva\\_31.html](http://bioarquitectura-bioconstruccion.blogspot.com/2009/05/construyendo-nuestra-unidad-productiva_31.html)
- <http://www.infoagro.com/abonos/compostaje.htm>
- <http://environmentalchemistry.com/yogi/environmental/wastehistory.html>
- [http://www.afdc.energy.gov/fuels/emerging\\_biobiogas.html](http://www.afdc.energy.gov/fuels/emerging_biobiogas.html)
- <http://www.cempre.org.co/Documentos/2.%20Informe%20condensado%20del%20Estudio%20Nacional%20de%20Reciclaje%20final%20agosto%202011.pdf>
- [http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/36666164373034386433323930303464/dimension\\_categorizacion\\_1.pdf](http://www.cra.gov.co/apc-aa-files/36666164373034386433323930303464/dimension_categorizacion_1.pdf)

- <http://www.dane.gov.co/estratificacion/images/a/ad/ClasificacionMunicipiosV12 .pdf>
- [http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06\\_20/7Proyecciones\\_poblacion.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf)
- <http://www.engormix.com/MA-ganaderia-carne/manejo/articulos/manejo-productivo-excretas-sistemas-t925/p0.htm>
- <http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/index.htm>
- [http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual\\_biogas.pdf](http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual_biogas.pdf)
- <http://www.gov.hk/en/residents/environment/waste/msw.htm>
- [http://www.opds.gba.gov.ar/uploaded/File/residuos\\_03\\_10.pdf](http://www.opds.gba.gov.ar/uploaded/File/residuos_03_10.pdf)
- <http://www.youtube.com/watch?v=3UafRz3QeO8>

## LICENCIA DE USO – AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES

Actuando en nombre propio identificado (s) de la siguiente forma:

Nombre Completo Luis Alejandro Rodríguez Perdigón

Tipo de documento de identidad: C.C. ☒ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: 79'948.382

Nombre Completo \_\_\_\_\_

Tipo de documento de identidad: C.C. ☐ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: \_\_\_\_\_

Nombre Completo \_\_\_\_\_

Tipo de documento de identidad: C.C. ☐ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: \_\_\_\_\_

Nombre Completo \_\_\_\_\_

Tipo de documento de identidad: C.C. ☐ T.I. ☐ C.E. ☐ Número: \_\_\_\_\_

El (Los) suscrito(s) en calidad de autor (es) del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado, documento de investigación, denominado:

Viabilidad Técnica para Producción de Biogás a  
partir de la Fracción Orgánica de los Residuos  
Sólidos Urbanos - FORSU

Dejo (dejamos) constancia que la obra contiene información confidencial, secreta o similar: SI ☐ NO ☒  
(Si marqué (marcamos) SI, en un documento adjunto explicaremos tal condición, para que la Universidad EAN mantenga restricción de acceso sobre la obra).

Por medio del presente escrito autorizo (autorizamos) a la Universidad EAN, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad EAN y a los usuarios de bases de datos y sitios webs con los cuales la Institución tenga convenio, a ejercer las siguientes atribuciones sobre la obra anteriormente mencionada:

- A. Conservación de los ejemplares en la Biblioteca de la Universidad EAN.
- B. Comunicación pública de la obra por cualquier medio, incluyendo Internet
- C. Reproducción bajo cualquier formato que se conozca actualmente o que se conozca en el futuro
- D. Que los ejemplares sean consultados en medio electrónico
- E. Inclusión en bases de datos o redes o sitios web con los cuales la Universidad EAN tenga convenio con las mismas facultades y limitaciones que se expresan en este documento
- F. Distribución y consulta de la obra a las entidades con las cuales la Universidad EAN tenga convenio

Con el debido respeto de los derechos patrimoniales y morales de la obra, la presente licencia se otorga a título gratuito, de conformidad con la normatividad vigente en la materia y teniendo en cuenta que la Universidad EAN busca difundir y promover la formación académica, la enseñanza y el espíritu investigativo y emprendedor.

Manifiesto (manifestamos) que la obra objeto de la presente autorización es original, el (los) suscritos es (son) el (los) autor (es) exclusivo (s), fue producto de mi (nuestro) ingenio y esfuerzo personal y la realizó (zamos) sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de exclusiva autoría y tengo (tenemos) la titularidad sobre la misma. En vista de lo expuesto, asumo (asumimos) la total responsabilidad sobre la elaboración, presentación y contenidos de la obra, eximiendo de cualquier responsabilidad a la Universidad EAN por estos aspectos.

En constancia suscribimos el presente documento en la ciudad de Bogotá D.C.,

|                                                                           |                               |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| NOMBRE COMPLETO: <u>Luis Alejandro Rodríguez</u>                          | NOMBRE COMPLETO: _____        |
| FIRMA: <u>[Firma]</u>                                                     | FIRMA: _____                  |
| DOCUMENTO DE IDENTIDAD: <u>79'948.302</u>                                 | DOCUMENTO DE IDENTIDAD: _____ |
| FACULTAD: <u>Postgrados</u>                                               | FACULTAD: _____               |
| PROGRAMA ACADÉMICO: <u>Especialización en Gestión de Recursos Humanos</u> | PROGRAMA ACADÉMICO: _____     |
| NOMBRE COMPLETO: _____                                                    | NOMBRE COMPLETO: _____        |
| FIRMA: _____                                                              | FIRMA: _____                  |
| DOCUMENTO DE IDENTIDAD: _____                                             | DOCUMENTO DE IDENTIDAD: _____ |
| FACULTAD: _____                                                           | FACULTAD: _____               |
| PROGRAMA ACADÉMICO: _____                                                 | PROGRAMA ACADÉMICO: _____     |

Fecha de firma: 28-Oct.-2014