



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

ESCUELA DE INGENIERÍA

## TESIS

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA  
PARA ACONDICIONAR Y  
PRESURIZAR BIOGÁS”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN CIENCIAS EN  
DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA  
**CÉSAR GÓMEZ BELTRÁN**

DIRECTORES DE TESIS: DR. NEÍN FARRERA VAZQUEZ  
DR: JOEL MOREIRA ACOSTA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.

OCTUBRE 2014

---

## **INDICE**

|                       |      |
|-----------------------|------|
| Índice.....           | I    |
| Resumen.....          | VII  |
| Lista de Cuadros..... | IX   |
| Lista de Figuras..... | XI   |
| Introducción.....     | XVI  |
| Objetivos.....        | XXI  |
| Hipótesis.....        | XXII |

### **Capítulo 1. Antecedentes**

|   |    |
|---|----|
| 1. Antecedentes.....                              | 1  |
| 1.1 La industria ladrillera artesanal.....        | 1  |
| 1.2 El uso del biogás como energía renovable..... | 9  |
| 1.3 El uso de biogás embotellado.....             | 14 |

### **Capítulo 2. Marco Teórico**

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 2. Marco Teórico.....           | 18 |
| 2.1 Desarrollo Sustentable..... | 19 |

---

---

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 2.2 Biogás: Conceptos Básicos.....   | 23 |
| 2.3 Biodigestores.....               | 26 |
| 2.4 Acondicionamiento de biogás..... | 39 |

### **Capítulo 3. Metodología**

|   |    |
|---|----|
| 3. Metodología.....   | 47 |
| 3.1 Implementación y evaluación de un digestor anaeróbico alimentado por excretas de ganado vacuno para generar biogás..... | 48 |
| 3.1.1. Sitio para la implementación del Biodigestor.....  | 48 |
| 3.1.2. Cálculo de la cantidad de estiércol a producirse en el rancho.....   | 49 |
| 3.1.3. Cálculo de la cantidad de Biogás a producirse.....   | 51 |
| 3.2 Diseño, construcción e implementación de un sistema de purificación, compresión y almacenamiento de biogás.....         | 53 |
| 3.2.1 Acondicionamiento del Biogás mediante su purificación.....  | 55 |
| 3.2.2 Diseño del Filtro Seco para Eliminación del Ácido Sulhídrico (H <sub>2</sub> S).....                                  | 56 |

---

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.2.3 | Especificaciones de construcción del Filtro Seco para Eliminación del Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S).....   | 58 |
| 3.2.4 | Diseño del Filtro Húmedo para Eliminación del Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) y restos del Acido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S).....  | 60 |
| 3.2.5 | Especificaciones de construcción del Filtro Húmedo para Eliminación del Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) y restos del Acido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S).....                                      | 62 |
| 3.2.6 | Especificaciones de funcionamiento del módulo completo de acondicionamiento y presurizado de Biogás.....  | 64 |
| 3.3   | Análisis de forma comparativa de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) emitido por los diferentes combustibles usados en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas..... | 68 |
| 3.3.1 | Determinación analítica de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) producido al usar madera (leña) como combustible.....   | 69 |
| 3.3.2 | Cálculo de la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) en un horno de ladrillo, por el uso de Aceite Lubricante Gastado.....  | 71 |

---

---

|  |    |
|--|----|
| 3.3.3 Cálculo de la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )<br>en un horno de ladrillo, por el uso de Biogás como<br>combustible..... | 72 |
|--|----|

## Capítulo 4. Resultados

|   |     |
|---|-----|
| 4. Resultados.....  | 74  |
| 4.1 Implementación y evaluación de un digester anaeróbico alimentados por<br>excretas de ganado vacuno para generar biogás..... | 74  |
| 4.1.1 Procedimiento de Operación del Sistema de Producción de<br>Biogás.....  | 76  |
| 4.1.2 Resultados de producción de Biogás.....   | 82  |
| 4.2 Construcción e implementación del Módulo de Acondicionamiento y<br>Presurizado de Biogás.....                               | 83  |
| 4.2.1 Descripción del Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de<br>Biogás.....   | 84  |
| 4.2.2 Memoria fotográfica del módulo de acondicionamiento y presurizado<br>de biogás.....                                       | 88  |
| 4.2.3 Proceso de purificación y compresión de Biogás.....   | 94  |
| 4.2.4 Resultados del desempeño del módulo de acondicionamiento y<br>presurizado de Biogás.....                                  | 100 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.5 Cálculo del Potencial Calorífico del Biogás purificado y presurizado.....   | 104 |
| 4.2.6 Capacidad de producción y almacenamiento de Biogás.....   | 111 |
| 4.3 Cálculos para determinar la cantidad de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) emitido por el uso de madera (leña) y de biogás como combustible en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas..... | 114 |
| 4.3.1 Determinación de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) generado por un horno de ladrillo, usando madera (leña) como combustible.....   | 114 |
| 4.3.2 Cálculo de la cantidad requerida de Biogás para cocer un horno típico de ladrillo.....  | 115 |
| 4.3.3 Cálculo de la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) en un horno de ladrillo, al utilizar biogás.....   | 117 |
| 4.3.4 Comparación de la cantidad de Dióxido de Carbono emitido por la leña y el biogás si se utilizan como combustible en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas.....                             | 118 |

## **Capítulo 5. Discusiones**

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 5. Discusiones..... | 121 |
|---------------------|-----|

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 Implementación y evaluación de un digestor anaeróbico alimentado por excretas de ganado vacuno para generar biogás..... | 122 |
| 5.2 Diseño, construcción e implementación de un sistema de purificación, compresión y almacenamiento de biogás.....         | 126 |
| 5.2.1 Resultados de este proyecto de investigación.....   | 126 |
| 5.2.2 Resultados de otros proyectos de investigación.....   | 128 |
| 5.2.3 Comparación entre los resultados de este proyecto contra los presentados en las otras investigaciones.....            | 132 |

## **Capítulo 6. Conclusiones**

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 6. Conclusiones.....      | 138 |
| 7. Literatura citada..... | 141 |

---

## RESUMEN

La industria ladrillera es una importante actividad productiva generadora de empleos en México, de acuerdo al INEGI en el 2009 existían en el país 18,768 unidades económicas dedicadas a la manufactura de productos a base de arcillas y refractarios para la construcción, quienes ocupan a 53,550 personas directamente. Sin embargo, esta industria continúa usando combustibles y sistemas de combustión con muy baja eficiencia térmica y altamente contaminantes. En el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas; México, se utilizan diversos combustibles como el diesel, el aserrín de madera, la cáscara de café, leña, olotes, llantas y aceite gastado. Combustibles que producen contaminación por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Además, esta actividad productiva da sustento a más de 400 familias de la zona y en los últimos años la producción se ha incrementado, debido a que satisface una gran parte de la demanda de la industria de la construcción, que últimamente ha tenido un crecimiento inclusive mayor que el producto interno bruto.

En esta tesis, se presentan los resultados del análisis de la factibilidad de contribuir al desarrollo sustentable del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas; México, mediante la implementación de un sistema de biogás producido en biodigestores alimentados con excretas de ganado vacuno, para proponer su uso como energía térmica en las ladrilleras del municipio. Para esto, se recabaron datos sobre combustibles utilizados, cantidad de personas involucradas en las ladrilleras y se

---

---

determinó el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) emitido por los hornos analizados. También se instaló y se evaluó un biodigestor, para determinar el potencial de producción de biogás. Además, se realizaron pruebas con un módulo de purificación y compresión de Biogás diseñado y construido específicamente para este proyecto de investigación, para determinar el potencial de manejo del biogás en su almacenamiento y transporte. Finalmente, se presentan los cálculos obtenidos al proponer el uso del biogás, como combustible en los hornos típicos de ladrillo de la región analizada.

**Palabras Clave:** Biogás, Ladrillera, Compresión de Biogás, Purificación de Biogás

---

## Lista de Cuadros

|   |     |
|---|-----|
| 1. Total de estiércol aprovechable.....                                     | 50  |
| 2. Cantidad de biogás a producir.....                                       | 52  |
| 3. Cantidad máxima de almacenamiento de biogás.....                         | 52  |
| 4. Características del módulo.....  | 67  |
| 5. Producción de biogás en el Biodigestor rígido DM-1.....                  | 82  |
| 6. Especificaciones del módulo de acondicionamiento y presurizado.....      | 85  |
| 7. Resultados del proceso de acondicionamiento y presurizado de biogás..... | 102 |
| 8. Consumo de energía eléctrica.....  | 103 |
| 9. Costo de purificar y comprimir biogás (pesos mexicanos).....             | 103 |
| 10. Costo de purificar y comprimir biogás (dólares americanos).....         | 104 |
| 11. Temperatura contra tiempo al calentar biogás.....                       | 107 |
| 12. Calentamiento de un litro de agua (Gas L.P. y Biogás).....              | 110 |
| 13. Potencial calorífico del biogás calculado.....                          | 111 |
| 14. Dióxido de carbono generado por horno de leña.....                      | 115 |
| 15. Calorías requeridas para cocer 20,000 piezas de ladrillo.....           | 116 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 16.Cantidad requerida de biogás para cocer 20,000 ladrillos.....              | 116 |
| 17.Cantidad de dióxido de carbono por metano en un horno de ladrillo.....     | 118 |
| 18.Cantidad de dióxido de carbono por metano en un horno de ladrillo (2)..... | 119 |
| 19. Cantidad de dióxido de carbono generado por horno de leña.....            | 119 |
| 20.Producción de biogás en el biodigestor rígido DM-1.....                    | 123 |
| 21.Cantidad de estiércol aprovechable y producción de biogás.....             | 124 |
| 22.Producción promedio esperada por tipo de biodigestores.....                | 125 |
| 23.Potencial calorífico del biogás y contenido de metano en el mismo.....     | 127 |
| 24.Presión, volumen y masa de biogás en un tanque metálico.....               | 127 |
| 25.Resultados de Chandra.....   | 129 |
| 26.Resultados de Zafar.....   | 130 |
| 27.Resultados de Vijay.....   | 131 |
| 28.Resultados de Yingjian.....  | 132 |
| 29.Resultados de presión de diferentes proyectos.....                         | 133 |
| 30.Comparación de embotellado de biogás de diferentes proyectos.....          | 135 |

---

---

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| 1. Esquema de planta de purificado y envasado de Biogás.....                        | 16 |
| 2. Principios de diseño del proceso de digestión anaeróbica.....                    | 28 |
| 3. Tipos de biodigestores y sistemas de homogenización.....                         | 30 |
| 4. Biodigestor con sistema de acumulación continua.....                             | 31 |
| 5. Diferentes posibles usos del biogás.....   | 33 |
| 6. Proceso biológico que sucede en el interior de un biodigestor.....               | 36 |
| 7. Esquema básico de un biodigestor con alimentación continua.....                  | 38 |
| 8. Proceso básico de purificación de biogás con agua a presión.....                 | 46 |
| 9. Fotografía satelital del rancho Nueva Esperanza.....                             | 48 |
| 10. Fotografía del ganado raza AFS.....   | 49 |
| 11. Esquema diseñado para el sistema de purificación y compresión de<br>biogás..... | 53 |
| 12. Dibujo y diseño mecánico del sistema.....                                       | 54 |
| 13. Ubicación del filtro seco en el sistema.....                                    | 58 |
| 14. Colocación de la limadura de hierro tratada en el filtro seco.....              | 59 |

---

---

|   |    |
|---|----|
| 15. Proceso de purificación de biogás con agua a presión.....   | 61 |
| 16. Ubicación del filtro húmedo en el sistema.....  | 62 |
| 17. Ubicación de los tanques metálicos en el sistema.....   | 63 |
| 18. Vista frontal del módulo.....   | 65 |
| 19. Vista superior del módulo.....  | 65 |
| 20. Vista isométrica del módulo.....  | 66 |
| 21. Leña utilizada para cocer ladrillo.....   | 69 |
| 22. Equipo de aceite lubricante gastado.....  | 71 |
| 23. Tabla. Tomada del “Plan de Manejo para uso de aceites usados como combustibles en los hornos para la producción de ladrillos, tabiques y tejas de arcilla no refractarios”..... | 72 |
| 24. Biodigestor instalado dentro de la UNICACH.....   | 75 |
| 25. Proceso de producción de biogás.....  | 76 |
| 26. Biodigestor dentro de la UNICACH.....   | 77 |
| 27. Bolsa de geomembrana de 3.5 m <sup>3</sup> .....  | 78 |
| 28. Estiércol procedente del rancho Nueva Esperanza.....  | 79 |

---

---

|   |    |
|---|----|
| 29. Vaciado de la mezcla de estiércol con agua, dentro del biodigestor.....                       | 80 |
| 30. Bolsa de geomembrana con biogás, capacidad 3.5 m <sup>3</sup> .....                           | 81 |
| 31. Bolsa de geomembrana llena de biogás. Capacidad 1.5 m <sup>3</sup> .....                      | 81 |
| 32. Vista frontal del módulo.....   | 84 |
| 33. Vista superior del módulo.....  | 85 |
| 34. Vista isométrica del módulo.....  | 88 |
| 35. Vista frontal del módulo construido.....  | 89 |
| 36. Vista frontal inferior del módulo construido.....   | 91 |
| 37. Vistas del módulo construido y pintado.....   | 92 |
| 38. Vista del módulo construido instalado en la UNICACH.....                                      | 93 |
| 39. Bolsa de geomembrana instalada al módulo de acondicionamiento y<br>presurizado de biogás..... | 94 |
| 40. Módulo para acondicionamiento y presurizado en operación.....                                 | 95 |
| 41. Manómetro (medidor de presión) con el equipo en operación.....                                | 96 |
| 42. Báscula (medidor de masa) con el equipo en operación.....                                     | 96 |
| 43. Sistema en funcionamiento, purificación y compresión.....                                     | 97 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| 44. Sistema en funcionamiento, purificación y compresión(2).....                                 | 98  |
| 45. Mediciones de peso con el equipo en operación.....   | 99  |
| 46. Mediciones de peso con el equipo en operación (2).....                                       | 99  |
| 47. Tabla de presión contra peso durante la operación del módulo.....                            | 100 |
| 48. Tabla y ecuación de regresión lineal obtenida.....   | 101 |
| 49. Equipo de trabajo de investigación del programa de Desarrollo Sustentable de la UNICACH..... | 105 |
| 50. Flamas de biogás purificado y comprimido.....  | 105 |
| 51. Flama obtenida con el biogás purificado y comprimido.....                                    | 106 |
| 52. Gráfica de temperatura contra tiempo.....  | 108 |
| 53. Gráfica de comparación entre el CO <sub>2</sub> emitido por leña y el biogás.....            | 120 |
| 54. Comparación de producción de diversos proyectos.....   | 125 |
| 55. Datos y gráfica de presión ejercida, contra el peso del biogás dentro del tanque.....        | 128 |
| 56. Planta de purificado y envasado de biogás (India).....                                       | 129 |
| 57. Balance de energía para purificación y compresión de biogás.....                             | 131 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 58.Comparación entre diferentes resultados reportados de porcentaje de metano contenido en el biogás..... | 133 |
| 59.Gráfica de comparación entre los resultados reportados por otros proyectos de investigación.....       | 136 |

---

## INTRODUCCIÓN

La industria ladrillera es una importante actividad productiva generadora de empleos en México. De acuerdo al INEGI (2008) en su resumen de las características principales de las diez industrias micro más importantes, existen en el país 18,768 unidades económicas dedicadas a la manufactura de productos a base de arcillas y refractarios para la construcción, quienes ocupan a 53,550 personas directamente.

Sin embargo, en la actualidad esta industria continúa usando los mismos procesos desarrollados desde la antigüedad, tales como preparación manual de la mezcla, moldeo y cocción en hornos, empleando combustibles y sistemas de combustión con muy baja eficiencia térmica y altamente contaminantes, que generan dioxinas y furanos, distintas especies de hidrocarburos, volúmenes masivos de partículas, óxidos de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno, contaminando la atmósfera, cuerpos de agua y suelo (Moreno, 2003).

La evidencia actual sugiere que los cambios en el nivel de dióxido de carbono atmosférico alteran el clima de la tierra sustancialmente a través del efecto invernadero. Por lo que este, es elemento contaminante de mayor preocupación (Manahan, 2007). Debido a que es un gas transparente a la luz solar, pero que absorbe la energía infrarroja (calor) que irradia la superficie terrestre, con lo que

---

---

retrasa su pérdida en el espacio. Tal proceso calienta la atmósfera inferior y produce el “efecto invernadero”, aún si las variaciones en el porcentaje de la concentración de dióxido de carbono son pequeñas, estas influyen en la temperatura terrestre. Se piensa que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el causante de casi el 60% de la tendencia del calentamiento global (Nebel y Wrigth, 1999).

Para las actividades de producción de ladrillo en el municipio de Chiapa de Corzo, se utilizan diversos combustibles como el diesel, el aserrín de madera, la cáscara de café, leña, olotes, llantas y aceite gastado (Gómez et al, 2011); combustibles que producen contaminación atmosférica debido a los residuos que se generan por la combustión de estos materiales, entre los que se encuentra el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Casado 2005, 2010). Sin embargo; a pesar de ello, la producción de ladrillo en el municipio de Chiapa de Corzo se ha incrementado, debido a que satisface una gran parte de la demanda de materiales de la industria de la construcción, sector muy importante en México, ya que involucra 37 ramos industriales en el país, y en los últimos años ha tenido un crecimiento inclusive mayor que el producto interno bruto (Secretaría de Hacienda, 2010).

En el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. México., la fabricación de ladrillo, es una actividad productiva que da sustento a más de 400 familias desde hace varias décadas (SEMARNAT 2005), genera un insumo básico para la industria de la

---

---

construcción que opera tanto en el municipio como en los municipios cercanos a la capital del estado Tuxtla Gutiérrez.

En este trabajo, se plantea el uso de Biogás como fuente renovable de energía en la producción del ladrillo. El término Biogás, se aplica a la mezcla de gases que se obtienen a partir de la descomposición en un ambiente anaerobio (sin oxígeno) de los residuos orgánicos, como el estiércol animal o los productos de desecho de los vegetales. En este proceso realizado por bacterias, el biogás está compuesto en un 50% a un 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y de un 30% a un 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), además de contener ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y otros gases de menor importancia.

Actualmente el uso del biogás producido en digestores anaeróbicos, se realiza en su mayoría en zonas de producción agropecuaria; es decir, en el mismo lugar en donde se genera. Por lo tanto, existe una gran necesidad de hacer el biogás transportable. Esto puede hacerse comprimiendo el biogás en cilindros, lo cual es posible acondicionándolo, removiéndole el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), el Ácido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y los componentes del vapor de agua. (Kapdi et al. 2005).

Por lo tanto, uno de los grandes problemas a resolver en el uso y aplicación masiva del biogás, es su almacenamiento y transporte. En tal sentido, se hace necesaria su compresión en cilindros portátiles, lo que requiere de un previo acondicionamiento y

---

---

por lo tanto; del desarrollo de un dispositivo eficiente y económicamente factible. Por esta razón, este trabajo de investigación, tiene como objetivo fundamental, el diseñar, construir e implementar un sistema de acondicionamiento y presurizado de biogás, para estar en condiciones de plantear su uso como combustible en los hornos de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México.

El biogás a utilizar en este proyecto de investigación será generado en un sistema de biodigestión, que utiliza digestores anaeróbicos alimentados por excretas de ganado vacuno para la producción del biogás; posteriormente, el combustible será acondicionado en un subsistema que se diseñará y se implementará para almacenarlo presurizado en tanques portátiles.

Una vez que se ha purificado el Biogás; el biogás resultante, presenta características muy similares a las del Gas Natural (GNC), por lo que puede ser utilizado en las mismas aplicaciones que este. Por esta razón, los países con más grandes programas de biogás en el mundo (China y la India), han estado trabajando con gran éxito en el uso del biogás comprimido en recipientes portátiles (Vijay, 2007).

De tal forma que, la generación de biogás y su acondicionamiento para su compresión en cilindros, incrementa su potencial como energía renovable en sustitución de otros sistemas energéticos, y por lo tanto contribuye al desarrollo sustentable (Zafar, 2006).

---

---

Por esta razón, este proyecto de investigación, propone el uso de biogás comprimido como combustible, en los hornos de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. México.

---

## **OBJETIVO GENERAL**

Contribuir al desarrollo sustentable de la industria del ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México., al diseñar, construir e implementar un módulo de acondicionamiento y presurizado de biogás; para proponerlo como combustible, en los hornos típicos de ladrillo del municipio.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Implementar y evaluar un digester anaeróbico alimentados por excretas de ganado vacuno para generar biogás.
2. Diseñar, construir e implementar, un sistema de purificación, de compresión y almacenamiento de biogás.
3. Analizar de forma comparativa la cantidad de Dióxido de Carbono emitido por los diferentes combustibles (madera, aceite gastado y biogás) usados en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas.

---

## HIPOTESIS

- El digester anaeróbico alimentado por excretas de ganado vacuno, generará la cantidad suficiente de biogás, para su uso en un horno típico de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo.
- Se puede diseñar un sistema eficiente y de fácil manejo para purificar y comprimir una mezcla de gases como el biogás; así como para su almacenamiento y transporte, para finalmente proponer su uso como combustible en las ladrilleras.
- Se pueden disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por un horno de ladrillo típico en el municipio de Chiapa de Corzo, si se emplea un sistema de biogás para la cocción de ladrillo.

---

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 La industria ladrillera artesanal

El ladrillo de barro recocido es un material de construcción que se ha utilizado por muchos años. Actualmente la demanda de ladrillos ha crecido considerablemente en los países en desarrollo, principalmente en Latinoamérica, donde los proyectos de infraestructura de vivienda han tenido grandes progresos. La industria del ladrillo en estos países ha crecido notablemente en producción, pero no así tecnológicamente. Los hornos han permanecido sin cambios por décadas y siguen siendo ineficientes en el consumo de energía, además de utilizar una variedad de combustibles que causan contaminación a la atmósfera (Pérez y Payan, 2003).

De la operación de hornos ladrilleros se derivan riesgos a la salud principalmente por las altas emisiones de contaminantes. Los hornos ladrilleros típicos a cielo abierto son construidos de forma artesanal, consumen grandes cantidades de combustibles como leña, aceite automotriz reciclado, carbón, combustóleo, diesel, llantas usadas, basura y plásticos. La combustión ineficiente de estos hornos favorece la emisión de partículas sólidas totales (PST) y gases de invernadero, entre los que se encuentran los óxidos de nitrógeno, de azufre y de carbono (Corral et al. 2009).

Esto ha ocasionado que en diversos lugares del mundo como en Sudamérica, se hayan elaborado proyectos que tienen por objeto la determinación y disminución del impacto ambiental derivado por las actividades de producción de ladrillo. Por ejemplo, en el Perú se realizó un trabajo destinado a la determinación de los límites

---

máximos permisibles para la industria ladrillera con el objeto de que los productores de ladrillo realicen los cambios necesarios en sus procesos para poder cumplir con estos parámetros (Casado, 2010).

En Ecuador, se realizó investigación para optimizar el proceso de cocción en la producción de ladrillos, mediante el uso de fundentes, los cuales son componentes de bajo punto de fusión que se combinan con los alumino-silicatos presentes en la arcillas (barro) reduciendo la temperatura de fusión de las mismas, lo que disminuye el tiempo de cocción de los ladrillos y por lo tanto se reduce la cantidad de combustible utilizado y por lo tanto; la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera (Toctaquiza, 2008).

En Argentina (Angélico, 2013) se llevó a cabo un análisis de la producción actual de las ladrilleras, encontrándose que en condiciones normales de mercado, la industria ladrillera paulatinamente debería ir mejorando por la aplicación de innovaciones tecnológicas mediante inversiones en nuevas maquinarias y técnicas de producción. Sin embargo; esto no ha sucedido, debido a que las condiciones de disponibilidad de grandes cantidades de mano de obra barata proveniente de países limítrofes (Perú y Bolivia), ha permitido que esta actividad mantenga niveles altos de rentabilidad basándose en la sobreexplotación de los trabajadores que emplean métodos sumamente artesanales. Además el reciente crecimiento de la industria inmobiliaria, ha permitido sostener la rentabilidad del sector de la construcción con base en bajos costos de los insumos, en este caso el ladrillo. También en Argentina (Codes et al. 2002), se realizó un proyecto de investigación, para determinar el grado

---

---

de impacto ambiental derivado de las actividades de producción de ladrillos, para finalmente simular alternativas y proponer soluciones, tanto para los impactos generados a la atmósfera, como a los causados a las características fisicoquímicas del suelo.

En ese mismo año, se realizaron estudios de propiedades fisicoquímicas de las materias primas destinadas a la elaboración de ladrillo (Antequera et al. 2002), con el objeto de tener mayor información que pueda ser usada en la propuesta de sistemas de producción de ladrillo más eficientes.

La industria del ladrillo es una actividad que está asociada a los sectores más pobres de las comunidades mexicanas, operando bajo un esquema de economía informal, y su desarrollo está en función de la demanda de los centros de población aledaños.

Este hecho dificulta que los productores de ladrillo cuenten con tecnologías más eficientes y amigables con el medio ambiente (Romo et. al, 2004). Por estas razones, en México se han hecho diversos esfuerzos para evaluar el impacto ambiental derivado de la producción de ladrillo; así como, para proponer el uso de tecnologías y combustibles más limpios.

Tan solo en el área metropolitana de la Ciudad de México funcionaban en 2003 (Moreno) más de mil ladrilleras, con sistemas tecnológicos obsoletos que causan serios problemas a quienes trabajan en ellas (más de 20 mil personas y a la población en general. Lo que también ha obligado a estas industrias a migrar hacia zonas menos pobladas.

---

En el municipio de Juárez, Chihuahua en el año 2003, operaban un poco más de 300 ladrilleras, de las cuales 43% utilizaba como combustible a la madera, el 19.4% de ellos usaba el aserrín; en tanto que 37.6% de los productores combinaba estos dos materiales, generando de acuerdo a las cifras presentadas por la Comisión de la calidad del Ambiente de Texas (TCEQ, por sus siglas en inglés) la cantidad de 146,375 kg de contaminantes al aire (Romo et al. 2004).

En la ciudad de Durango, Durango se estima una producción anual de ladrillo de 24,000,000 de piezas; y para llevar a cabo esta actividad, se utilizan combustibles contaminantes como: madera, llantas, aceites, residuos industriales, entre otros, por lo que se considera a esta industria como altamente contaminante (Bradley, 2007).

En el estado de Guanajuato, en el año 1998 se publicó una Norma Técnica Ecológica (NTE-IEG-001/98), que establece las condiciones de operación que deben reunir los Hornos Ladrilleros en el estado.

En la publicación de la misma norma se establece que esta obedece a que en el estado de Guanajuato existen más de 3,000 productores de ladrillo, cuyo proceso de elaboración y cocido contribuye al deterioro del medio ambiente por sobreexplotación de la capa edáfica, por el alto nivel de emisiones e inmisiones contaminantes a la atmósfera, por el uso inadecuado de materiales combustibles y por una combustión deficiente de los mismos, así como por el uso excesivo de agua potable en dicho proceso.

---

En el Distrito Federal y en el Estado de México en el año 2003, se desarrolló un proyecto denominado: Coeficientes de Transferencia de Calor y Caída de Presión en un Horno de Ladrillo. En este trabajo se presenta el análisis de las mediciones de transferencia de masa realizadas usando la técnica de sublimación de naftalina; el objetivo de este trabajo, era encontrar una correlación que permita calcular los coeficientes de transferencia de calor por medio de la analogía entre estos dos fenómenos de transporte. Se presentó la descripción de las características de un horno típico para ladrillos y se analizó el proceso de cocción de ladrillos desde el punto de vista de transferencia de calor, obteniendo información que permitió el desarrollo de un aparato para medir la caída de presión y los coeficientes de transferencia de masa en un modelo de un horno para ladrillos.

Este proyecto se desarrolló con el objetivo de obtener las características típicas de transferencias de calor y caída de presión de los hornos para ladrillo, información fundamental para mejorar su diseño (Pérez y Payán, 2003).

En el estado de Coahuila, se realizó un proyecto de creación de tecnología que utiliza aceite lubricante gastado de motores de los vehículos como combustible en los hornos de ladrillo de la región (Comimsa, 2002), esta tecnología tiene el objetivo de la disminución de la contaminación en las ladrilleras del municipio de Saltillo, Coahuila.

También Swisscontact, presentó el Estudio de Factibilidad del Sector Ladrillero Artesanal para ingresar al Mercado de Carbono por parte del Programa de Eficiencia

---

---

Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para mitigar el Cambio Climático (EELA, 2011) cuyo objetivo consiste en contribuir a la mitigación del cambio climático a través de la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) de las ladrilleras artesanales de América Latina y así coadyuvar a la mejora de la calidad de vida de los ladrilleros y la población en general. El programa es una iniciativa de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), ejecutado por Swisscontact junto con sus socios en siete países de la región. El programa en su primera fase de desarrollo (desde marzo 2010 hasta febrero 2013), tiene como beneficiarios y ámbito de acción a 970 ladrilleras artesanales ubicadas en Argentina (San Juan), Bolivia (Cochabamba-Champa Rancho), Brasil (Seridó-Región Noroeste), Colombia (Nemocón-Cundinamarca), Ecuador (Cuenca), México (León Guanajuato) y Perú (San Jerónimo-Cusco). El enfoque del programa se orienta a promover la reducción de emisiones de GEI en las ladrilleras artesanales, mediante la implementación de modelos integrales de eficiencia energética en base al aprendizaje generado por el intercambio de conocimientos entre los países, así como también a través de la incidencia en las políticas públicas nacionales. Para el caso de México, se propone el uso de biomasa proveniente de fuentes sostenibles, principalmente de madera de desecho.

Sin embargo, en México de acuerdo al estudio, existen dudas significativas con respecto a la factibilidad de la generación de estas reducciones de emisiones particularmente por la precaria situación social de los productores. Debido a que las

---

ladrilleras analizadas en el Estado de Guanajuato (126 de un total de 135) se observaron altos niveles de informalidad de las unidades productivas, exacerbado por la situación social vulnerable como resultado de la marginación del sector. Además, la falta de escolaridad constituye también un problema a enfrentar antes de considerar un ingreso masivo a los mercados del carbono.

Finalmente con relación a las ladrilleras, en el Estado de Chiapas en el año 2007, se autorizó por parte de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Plan de Manejo para el uso de aceites usados como combustible en los hornos para la producción de ladrillos, tabiques y tejas de arcilla no refractarios. Este plan de manejo tiene el objeto de reducir daños generados al medio ambiente debido a las grandes cantidades de madera utilizada para la combustión. Dicha autorización es específica para la sociedad de producción rural denominada “Ladrilleros de Riberas Unidas, de R.L.”, asentada en el municipio de Chiapa de Corzo, lugar en donde de manera rudimentaria operan un total de 126 hornos, 428 familias enteras se dedican a las tareas de amasar el lodo, formar las compostas para armar los ladrillos y acarrear los materiales que se cuecen en los hornos. El material combustible utilizado generalmente es leña y aserrín, aunque se ha detectado que también utilizan llantas, cuya combustión origina una gran cantidad de contaminantes (SEMARNAT, 2005). El plan de manejo previamente mencionado operó satisfactoriamente por un tiempo aproximado de un año. Sin embargo, debido a las presiones comerciales de las grandes empresas prestadoras de servicios de

---

recolección y transporte de residuos peligrosos, el precio del aceite gastado, utilizado como combustible en las ladrilleras, superó por completo los costos de operación bajo los cuales se trabaja en la industria ladrillera de la zona (Gómez et al. 2011). Por lo que, actualmente ya no utilizan el aceite gastado como combustible sino que regresaron a las prácticas de utilizar madera producto de la tala inmoderada de la región, además de emitir grandes cantidades de emisiones a la atmósfera debido a la naturaleza de operación de los hornos de ladrillo que utilizan madera (leña) como combustible.

---

## 1.2 El uso del Biogás como energía renovable

Si consideramos que en la actualidad la emisión a la atmósfera de gases con efecto invernadero, como consecuencia de las actividades industriales y agropecuarias (como lo es la producción de ladrillo, en el municipio de Chiapa de Corzo), así como la dependencia de los derivados del petróleo para la obtención de energía, alteran o afectan la sustentabilidad en las actividades productivas y económicas. En nuestros tiempos, se han presentado grandes dificultades con la obtención y precios del petróleo, debido a ello es cada vez más indispensable el reemplazo total o parcial de este combustible fósil por otros combustibles, entre ellos los alternativos. Se suma además su efecto nocivo con las emisiones de gases a la atmósfera como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre otras, causantes entre otros impactos del efecto invernadero, las lluvias ácidas y daños a la salud humana por solo citar algunos.

El uso del biogás como combustible es una de las vías para lograr un desarrollo sustentable, del mismo biogás se obtiene residuos orgánicos beneficiosos que de otra manera contribuirían a la contaminación ambiental. La obtención del biogás es un método para evitar o mitigar de la contaminación de las aguas y de la atmósfera fundamentalmente (Martínez et al. 2008).

En este trabajo, se plantea el uso de energías renovables como el biogás en la producción del ladrillo, dicho combustible será generado en digestores anaeróbicos alimentados por excretas de ganado vacuno, las cuales en caso de no darles ningún

---

tratamiento también contribuyen al efecto invernadero, debido a que el biogás contiene metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) los cuales también son gases causantes del calentamiento global. En general, los gases producidos en el sector agropecuario contribuyen con más de un 30 % de dicho efecto (Masters et al. 2008).

El término Biogás, se aplica a la mezcla de gases que se obtienen a partir de la descomposición en un ambiente anaerobio (sin oxígeno) de los residuos orgánicos, como el estiércol animal o los productos de desecho de los vegetales. En este proceso realizado por bacterias, el biogas está compuesto en un 50% a un 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y de un 30% a un 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), además de contener ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y otros gases de menor importancia. Es un combustible económico y renovable; puede ser utilizado, para usos industriales y domésticos. La producción de biogás, además de aprovechar materia considerada como desperdicio, origina como subproducto un fertilizante de calidad excelente. El biogás tiene mucha importancia en los países en desarrollo, y en los industrializados está aumentando la atención por este combustible para intentar reducir la dependencia actual del petróleo y para reducir el índice de contaminación ambiental que poseen (Yáñez, 2007).

En España en 1997, un estudio de aprovechamiento energético de residuos ganaderos, llevó a conclusiones interesantes con relación al uso del biogás. Uno de ellos, es el hecho de que el objetivo del ganadero es la engorda de los animales para la producción de carne o de leche, por lo que el introducir un sistema de producción de energía basado en biogás, es ajeno a los conocimientos técnicos necesarios para

---

la consecución de estos objetivos. Por lo tanto, esto implica que el diseño del sistema de aprovechamiento energético, debe incluir un procedimiento que funcione de forma automatizada, sin necesidad de interrumpir las actividades del personal del rancho o de continuas intervenciones de personal técnico calificado. (Flotats et al. 1997).

En Colombia, se realizaron trabajos para evaluar la factibilidad de utilizar el biogás generado por medio de residuos ganaderos, para generar electricidad mediante motores diesel adaptados con sus respectivos generadores, obteniendo resultados de ahorro en el consumo de combustible hasta de un 40%. Aunque los resultados económicos no se pueden generalizar pues cambian de acuerdo a las circunstancias de cada lugar, en este trabajo se demostraron importantes beneficios económicos al sustituir el biogás por combustibles comunes como el diesel. La necesidad de alternativas de producción energética, mediante la implementación de prácticas amigables con el ambiente y el aprovechamiento de los recursos disponibles, crea un clima favorable para la promoción e implementación de la tecnología de biodigestores, obteniendo como beneficio la producción de biogás. Por lo consiguiente, aprovechar de manera eficiente este combustible es de importancia para sustituir las tradicionales fuentes energéticas no renovables, escasas y costosas, convirtiendo la explotación agropecuaria en una actividad económica más rentable y menos contaminante (Zapata, 1998).

También en Colombia, se elaboró un proyecto de diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno (González et al. 2007). En dicho proyecto, se concluyó que es

---

---

factible técnica y económicamente la construcción de la planta de manejo de residuos sólidos orgánicos, de ganado vacuno en los campos de Colombia.

De igual forma en Costa Rica, se desarrolló un proyecto de generación de energía eléctrica mediante el uso de un motor de combustión interna y su propio generador, el cual utiliza como combustible al biogás producido en biodigestores a partir de excretas de origen animal. Obteniendo resultados favorables con relación a la eficiencia que demostró el motor al utilizar el biogás como combustible y al mejorar la calidad del agua que anteriormente era contaminada con los residuos ganaderos (Quesada et al. 2007).

La importancia del Biogás, radica en el hecho de que México se proyecta ya como un país deficitario en la producción de gas, entonces, una de las alternativas más viables es la producción de Biogas, que puede producirse a partir de desechos orgánicos, los cuales son elementos básicos en la producción de metano y bióxido de carbono. En nuestro país se han desarrollado estudios que demuestran una factibilidad económica y ambiental para el uso de biogás en sustitución de los combustibles tradicionales. (Ávila, 2009).

En el estado de Michoacán, se realizó un proyecto de instalación de biodigestores plásticos en áreas de producción de ganado bovino, con el objeto de disminuir el riesgo de contaminación en aguas y suelos debido a la producción de excretas del ganado. El proyecto resultó exitoso debido a que de parámetros contaminantes monitoreados, cuando se usan los efluentes para riego agrícola solo la cantidad de

---

coliformes fecales no satisface la Norma Oficial Mexicana correspondiente (Esquivel et al. 2002).

Este mismo sentido, se elaboró un estudio de factibilidad para la puesta en marcha de digestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de Delicias, Chihuahua. El cual muestra que es redituable la construcción de digestores anaeróbicos en establos lecheros con más de 300 cabezas de ganado rango dentro del cual se encuentran todas las explotaciones ganaderas de manejo intensivo en la región y que representan el mayor porcentaje de la población lechera (Casas et al. 2009).

En el Estado de Guanajuato, según el censo agropecuario del 2007 realizado por el INEGI, había en existencia 707,618 cabezas de ganado bovino y según datos de la Fundación Guanajuato Produce existían aproximadamente 300,000 bovinos lecheros (Frías, 2009), que serían los únicos a tomar en cuenta para propósitos de acopio y transformación de excretas en biogás, pues el resto se supone se explotan en condiciones de pastoreo y no es posible la recolección de excretas. Por otra parte en biodigestores hechos por personal de la Universidad de Guanajuato se han probado diferentes sustratos y se han obtenido, entre otros resultados, que 1 kg de excreta de vaca genera 50 L de biogás con 60% de metano y la excreta de cerdo genera 60 L con la misma proporción de metano, por lo tanto existe un gran potencial de generación de biogás por excretas de bovinos y porcinos estabulados. Además, pocas son las opciones de actividad económica o proyectos que ofrecen la solución en estas tres vertientes simultáneamente, es decir, rentabilidad económica, mínimo impacto ambiental y generación de empleos. Sin duda la oportunidad más

---

---

interesante se presenta con la generación de biogás a partir de excretas de animales domésticos por la cantidad de las mismas y por la cantidad de bioenergético que se puede obtener (658 millones de litros/día) la cual puede ser empleada para diversos usos destacando la generación de energía térmica y eléctrica (Frías, 2009).

### 1.3 El uso de Biogás embotellado

Actualmente el uso del biogás producido en digestores anaeróbicos, se realiza en su mayoría en zonas de producción agropecuaria; es decir, en el mismo lugar en donde se genera. Por lo tanto, existe una gran necesidad de hacer el biogás transportable. Esto puede hacerse comprimiendo el biogás en cilindros, lo cual es posible acondicionándolo, removiéndole el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), el Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y los componentes del vapor de agua. (Kapdi et al. 2005).

El uso de biogás presurizado en tanques portátiles, es una práctica que a nivel internacional todavía no ha tenido un gran desarrollo, por lo que son pocos reportes científicos que se tienen a la fecha.

En el reporte "*Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders*" (Vijay, 2006) se presenta el caso de éxito del desarrollo de un sistema de purificado y embotellado de biogás, como sustituto de gas natural en aplicaciones automotrices, a partir de un proyecto realizado por el Instituto Hindú de Tecnología en Delhi India. También Zafar

---

(2006), en su caso de estudio para embotellar el biogás en cilindros como fuente de energía (“A Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders as Source of Power for Rural Industries Development in Pakistan”), reportó resultados obtenidos al analizar un sistema de lavado de biogás diseñado por la Universidad de Balochistan, en Quetta, Pakistán. Dicho sistema cuenta con dos subsistemas principales, uno de remoción de CO<sub>2</sub> mediante lavado a presión con agua y otro de compresión de biogás purificado en cilindros.

Yingjian, en el año 2011, en su *reporte “Energy use project and conversion efficiency analysis on biogas produced in breweries”* manifestó que en Nueva Zelanda se ha purificado el biogás mediante lavado a presión y posteriormente almacenado en tanques de acero, con el objetivo de substituir el Gas Natural en la mayoría de sus aplicaciones y en algunos casos a la Gasolina, el Diesel y el Gas Licuado del Petróleo.

Finalmente Chandra et al (2012), reporta el uso del sistema desarrollado por el Instituto Hindú de Tecnología en Delhi India , para acondicionar el biogás para uso en automóviles, pero realizó otras experimentaciones que Vijay (2006) a menores presiones de almacenamiento del biogás pero mejorando el sistema de purificación del mismo.

---

En la figura 1, se muestra el esquema reportado como una planta de purificado y envasado de biogás instalada en la India, usado por Vijay (2006) y por Chandra et al (2012).

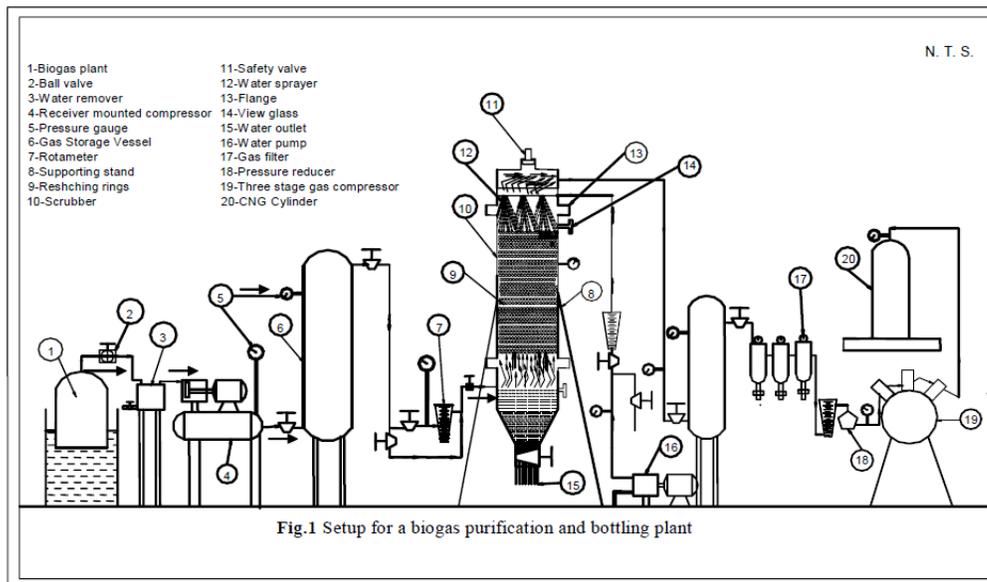


Figura 1. Esquema de Planta de purificado y envasado de Biogás. Vijay (2006).

De tal forma que, cada uno de los reportes presentados en esta sección con respecto al embotellado del biogás; coinciden en que este proceso, es la mejor opción para potencializar el uso del biogás a escalas industriales, por esta razón y debido a que la pertinencia del programa de Doctorado en Ciencias en Desarrollo Sustentable, se fundamenta en la necesidad que tiene el estado de Chiapas de programas y proyectos de desarrollo con preservación y potencialización de sus recursos naturales, respetando cultura, usos y costumbres pero también mejorando sus condiciones actuales de producción, salud y conductas sociales; este proyecto propone:

---

El diseño e implementación de un sistema de energía renovable a bajo costo, basado en el acondicionamiento y compresión de Biogás, para proponerlo como combustible en los hornos típicos de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas., México.

---

## **2. MARCO TEÓRICO**

Es importante resaltar el hecho de que en este proyecto de investigación se plantea el uso de energías renovables como el biogás en la producción del ladrillo y que dicho combustible será generado en digestores anaeróbicos alimentados por excretas de ganado vacuno.

Por lo tanto, tenemos que conocer el marco teórico que encierra a los cuatro principales procesos del sistema a desarrollar, necesarios para alcanzar los objetivos de investigación:

2.1 Desarrollo Sustentable.

2.2 Biogás: Conceptos básicos.

2.3 Biodigestores.

2.4 Acondicionamiento de Biogás.

---

## 2.1 Desarrollo Sustentable

Desde hace mucho tiempo, la contaminación se ha enfocado en problemas más bien locales, en el daño aun río, un lago o una bahía, o bien al aire de alguna ciudad; pero ahora los expertos la examinan a escala mundial. Por ejemplo el peligro del calentamiento global. El subproducto inevitable del consumo de combustibles fósiles, gasolina y otros líquidos extraídos del petróleo crudo *es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual es un componente natural de las partes inferiores de la atmósfera*, junto con el nitrógeno y el oxígeno. Lo requieren las plantas para la fotosíntesis y es importante para el equilibrio energético de la atmósfera. El dióxido de carbono es transparente a la luz solar, pero absorbe la energía infrarroja (calor) que irradia la superficie terrestre, con lo que retrasa su pérdida en el espacio. Este proceso calienta la atmósfera inferior y produce el fenómeno conocido como efecto invernadero. Aunque el porcentaje de la concentración de dióxido de carbono es pequeño, incluso los aumentos ligeros influyen en la temperatura. Dado el gran volumen de combustibles fósiles que se queman en nuestros días, los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera habían crecido de unas 280 partes partes por millón (ppm) a más de 370 ppm hacia el año 2000. En 1995, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC), afirmaba que las actividades humanas, incluyendo la quema de combustibles fósiles, habían aumentado las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera.

---

Se estima que estos cambios, han modificado el clima mundial al igual que parámetros relacionados como la temperatura, precipitación, humedad del suelo y nivel del mar. Se piensa que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el causante casi del 60% de la tendencia del calentamiento global (Nebel y Wrigth, 1998).

“El incremento de las temperaturas observado podría deberse en gran medida a la variabilidad natural; esta variabilidad, y otros factores humanos podrían haber contrarrestado un calentamiento global aún mayor a causa del efecto invernadero provocado por el hombre” (IPCC, 1990).

“El balance de evidencias denota una influencia humana discernible en el clima global” (IPCC, 1995).

“Hay nuevas y más abrumadoras evidencias de que gran parte del calentamiento observado a lo largo de los últimos 50 años es atribuible a las actividades humanas” (IPCC, 2001).

“La mayor parte del incremento en las temperaturas medias globales observado desde mediados del siglo veinte se debe, con gran probabilidad, a las concentraciones de gases de efecto invernadero antropogénicas” (IPCC, 2007).

El grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es una organización fundada en 1988 por el Programa Medioambiental de Naciones Unidas (UNEP) y por la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Su papel es evaluar la información científica, técnica y socioeconómica relativa a los riesgos, impacto

---

potencial y opciones de adaptación para mitigar el cambio climático inducido por la actividad humana. El IPCC en sí mismo no puede investigar pero delega en miles de expertos en el clima y las normativas del mundo entero para que contribuyan con sus conocimientos a la confección y revisión de los informes del IPCC. Su principal resultado ha sido una serie de informes de Evaluación basados en literatura científica y técnica publicada y revisada. El primer informe de evaluación del IPCC, terminado en 1990, suministró las bases científicas y de actuación para abordar el cambio climático, adoptadas en la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) que entró en vigor en 1994. El segundo informe de evaluación (SAR), Cambio Climático 1995, jugó un papel decisivo en las negociaciones que condujeron a la adopción del Acuerdo de Kyoto por parte de la UNFCCC en 1997. El tercer informe de evaluación (TAR), Cambio Climático 2001, y el cuarto informe (AR4), publicado en 2007, continúan siendo los documentos de conclusiones más autorizados en el tema de la investigación climática. El IPCC también confecciona informes especiales y publicaciones técnicas que rellenan algunos huecos dejados por los grandes informes globales (Masters y Ela, 2008).

Este proyecto, tiene la finalidad de contribuir a la mitigación de los impactos al medio ambiente, además de promover el desarrollo sustentable. La expresión de desarrollo sustentable fue llevada al uso común por primera vez por la Comisión Mundial para el Ambiente y el Desarrollo, un grupo reunido por la Organización de las Naciones Unidas. La comisión hizo del desarrollo sustentable el tema de su informe final,

---

Nuestro ***futuro común***, publicado en 1987. Ahí se define el término como una forma de desarrollo o progreso que “satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones venideras de satisfacer sus propias necesidades” (Manahan, 2007).

Ahora, para que el concepto de Desarrollo Sustentable refleje toda la expresión humana, su concepto es comúnmente dividido en tres sostenibilidades: la sostenibilidad económica, la sostenibilidad ecológica y la sostenibilidad social. En estas tres dimensiones estarían comprendidas todas las preocupaciones ambientales. De manera que la cuestión ambiental no puede reducirse a la depredación y contaminación, también tiene que abarcar la pobreza, la inequidad y otras variables sociales. Aquí es, precisamente, donde surgen las complicaciones. En la interpretación consumista de la crisis ambiental los problemas son resultado del consumo excesivo, en un mundo donde los recursos naturales son limitados. En este caso, es claro que la preocupación son los recursos naturales limitados o la limitada capacidad de los ecosistemas, es decir, la sostenibilidad ecológica (Foladori, 2006).

Esta investigación, propone medidas para contribuir al desarrollo sustentable del municipio de Chiapa de Corzo, al hacer uso de energías renovables como lo es el Biogás contribuyendo a la disminución del daño a la atmósfera; y por el otro lado, se plantea el diseño de un sistema eficiente de producción de ladrillo que contribuya a mejorar las condiciones socioeconómicas de todos los involucrados en la industria ladrillera ubicada en el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas.

---

## 2.2 Biogás: Conceptos básicos

Un elemento muy importante para poder desarrollar la teoría de esta investigación, es conocer los elementos fundamentales del Biogás. Por lo que a continuación se presenta la Química del Metano un extracto del libro publicado por la FAO (1992):

Química del Metano.- La química del metano, fue primeramente estudiada por Berthollet en 1786 (cj. Roscoe y Schorlemmer, 1878). Analizó cuantitativamente al gas, pero no lo pudo diferenciar del etileno. Este fue el inicio de muchas investigaciones sobre el metano durante los posteriores 200 años. Sin embargo, el origen biológico del metano, fue estudiado por Van Helmont, Volta, y Davy mucho tiempo antes que Berthollet. (McCarty, 1982). En 1630, Van Helmont observó que la materia orgánica en descomposición emitía gases flamables. Volta en 1776 determinó que existía una relación directa entre la cantidad de gas emitido con la cantidad de materia en descomposición. En 1808, Davy descubrió que existía gas metano, durante la digestión anaeróbica del estiércol del ganado. Trabajo experimental sobre el origen del biogás fue reportado en 1875 (Popoff, 1875). Popoff pudo determinar la cantidad de microorganismos durante la descomposición de celulosa por la formación del metano. En 1886 y 1887, Hoppe-Seyler descubrió que los microorganismos que habitan en los pantanos causan la formación de metano (Hoppe-Seyler, 1886 y 1889). Casi 20 años después, Omelianski publicó que la

---

descomposición de celulosa y la simultánea formación de metano era causada por las bacterias (Omelianski, 1904).

Estas investigaciones establecieron el origen biológico del metano. Sohngen más tarde comprobó las observaciones de Hoppe-Seyler acerca de que los ácidos grasos permiten la formación del metano y demostró que bajo ciertas condiciones, el dióxido de carbono y el hidrógeno se combinan para formar metano y agua (Sohngen, 1906, 1910). Después de estas observaciones muchos investigadores estudiaron la formación del metano con relación a ciertas aplicaciones como el tratamiento de biosólidos y el uso de desechos animales. La posición del metano en el ciclo del carbón fue determinada por la observación y el análisis de los materiales de lagos y pantanos. Las bacterias que producen el metano en un ambiente anaeróbico, desde un punto de vista microbiano son análogas a las que producen dióxido de carbono del metano en un ambiente aeróbico. Las bacterias aeróbicas y anaeróbicas fueron capaces de producir estas reacciones se encontraron en muchos lugares en el mundo.

El biogás fue reconocido como un combustible útil desde los inicios de su descubrimiento. En 1896, la digestión de biosólidos proveía combustible para las lámparas de las calles en Inglaterra. En 1897, un tanque de aguas residuales en Bombay, India, fue adecuado para que captara gas y el biogás se utilizó en algunos motores. En 1925, el biogás resultó ser adecuado para ser provisto y distribuido en ciertas ciudades en Alemania. Millones de biodigestores de bajo costo han operado satisfactoriamente durante mucho tiempo en China y la India, en granjas adaptadas

---

para generar biogás a través de desechos animales y humanos, donde el gas es utilizado para fines domésticos.

A pesar de que el biogás como combustible ha sido utilizado casi desde su descubrimiento, su industrialización y producción a gran escala se ha enfocado al metano descubierto en los depósitos naturales (gas natural), mientras que el uso del biogás generado a través de residuos animales o humanos, apenas se ha restringido a algunos casos aislados.

Como ya se mencionó, el biogás se produce a partir de la digestión anaerobia de residuos orgánicos que pueden provenir de fuentes industriales, municipales y/o agropecuarias. La composición aproximada del biogás se estima en 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 35% de Dioxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), 4% de vapor de agua y aproximadamente un máximo de 1% de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Sin embargo, diversos estudios han demostrado que el biogás puede contener 577 compuestos trazas incluyendo hidrocarburos halogenados, alcanos superiores (mayor a  $\text{C}_2$ ) e hidrocarburos aromáticos. Normalmente los compuestos trazas constituyen solo el 1% del volumen del biogás. La capacidad calorífica del biogás es determinada principalmente por el porcentaje de metano presente. El metano puro tiene una capacidad calorífica de 2,232 kJ/kg K, y es el único constituyente significativo de hidrocarburo presente en el biogás que es convertido en energía eléctrica/mecánica a partir de un proceso de combustión. Por otra parte, algunos compuestos aromáticos (ej. benceno) e hidrocarburo clorados (ej. cloroetano) pueden causar daños en la salud, otros son muy olorosos (ej. terpenos, esteroides y tioles) y algunos pueden dañar la planta de

---

utilización de gas (ej. organohalogenados, especies de azufre y siloxanos). Por consiguiente, la purificación del biogás es importante tanto desde el punto de vista de la salud como del medio ambiente e impacta en el funcionamiento y la eficiencia del equipo de biogás. La ventaja de este tipo de combustible radica en que es amigable con el ambiente, limpio y barato. (Morero et al. 2009).

### 2.3 Biodigestores

Un biodigestor de manera general, en su forma más simple, es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material o deshecho orgánico en determinada dilución de agua, para que a través de la fermentación anaerobia (sin oxígeno) produzca gas metano y otros materiales orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio y otros de menor importancia. Como se mencionó anteriormente el biogás es un producto del metabolismo de bacterias metanogénicas que participan en la descomposición de tejidos orgánicos en ambiente húmedo y carente de oxígeno. Dependiendo del tejido orgánico a descomponer o fermentar, el contenido de metano del biogás puede variar de un 50 por ciento hasta un 70 por ciento. Este proceso fermentativo es también dependiente de la temperatura y acidez del sistema.

En los sectores rurales, generalmente se utilizan Biodigestores cerrados herméticamente con cubiertas plásticas, con temperatura controlada y con sistemas de agitación que permiten la homogenización del sustrato a fermentar. Para la

---

producción de energía eléctrica a partir de biogás se utilizan motores a combustión especialmente diseñados para tal efecto y se acoplan con generadores eléctricos.

A continuación, se presentarán conceptos fundamentales descritos por Kaiser (2009) sobre la operación de los biodigestores, esto con el objeto de entender de una mejor manera su funcionamiento y aplicaciones:

#### A. Bases bioquímicas

La digestión anaeróbica consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso bioquímico produce biogás, compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Dicho proceso ocurre en los siguientes cuatro pasos.-

- a. Hidrólisis: largos polímeros son degradados por enzimas a aminoácidos y azúcares simples.
- b. Acidogénesis: aminoácidos y azúcares simples son degradados a ácidos grasos volátiles, principalmente acetato.
- c. Acetogénesis: degradación de ácidos grasos volátiles a acetato e hidrógeno.
- d. Metanogénesis: acetato e hidrógeno son convertidos a metano y dióxido de carbono.

#### B. Procesos y tecnología

El diseño del proceso de la digestión anaeróbica se caracteriza por cuatro principios que se grafican en la figura 2.-

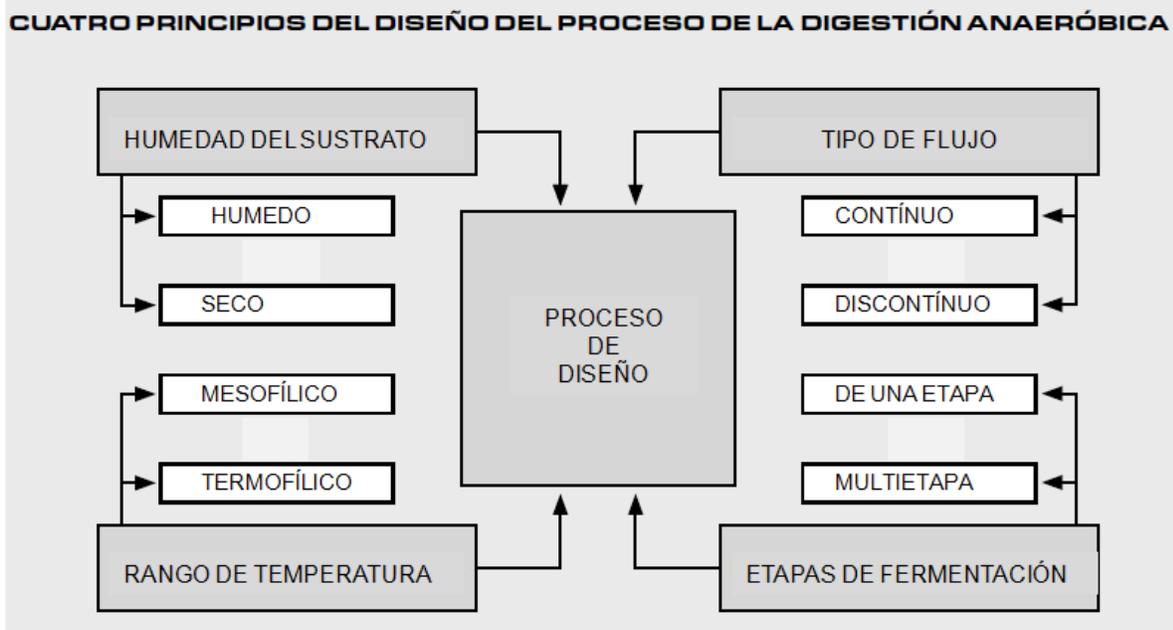


Figura 2. Principios del diseño del proceso de digestión anaeróbica. Kaiser (2009).

En el proceso de digestión anaeróbica se distinguen generalmente dos rangos de temperatura:

- a. Temperatura mesofílica desde 25 a 42 °C.
- b. Temperatura termofílica desde 50 a 60 °C.

La mayoría de los biodigestores son operados a temperatura mesofílica. Temperaturas termofílicas son utilizadas en biodigestores centralizados de mayor escala, donde el residuo utilizado requiere de mayor seguridad higiénica.

El modo de alimentar el biodigestor puede ser de forma continua o discontinua. En el sistema discontinuo de batch, el material fresco es alimentado en conjunto con un

---

inóculo al interior de un reactor. Durante los primeros dos a tres días el material es aireado para subir su temperatura. En las siguientes dos a tres semanas el material es degradado anaeróbicamente. Al inicio de la degradación la curva de producción de biogás presenta una curva creciente, alcanzando su máxima producción entre los días 10 y 14 de degradación. En los siguientes días la producción disminuye aproximadamente a la mitad y luego permanece constante por un tiempo. Para compensar esta producción desigual se utilizan tres a cuatro biodigestores en forma paralela, pero con una alimentación desfasada para obtener en conjunto una producción estable en el tiempo. Este sistema es muy poco común en biodigestores agropecuarias.

Otra forma de alimentación discontinua es el sistema de almacenaje. Este sistema combina el biodigestor con un estanque de acumulación en un solo estanque. Este sistema es alimentado lentamente con material fresco (estiércol en general) según la cantidad producida diariamente. La ventaja de este sistema es el bajo costo, pero, por otro lado, el costo energético para mantener el biodigestor a una temperatura óptima es muy alto en comparación con la baja producción de este sistema.

Los sistemas de acumulación continua (ACF) son los más utilizados en el ámbito agropecuaria. En estos el material fresco es bombeado al biodigestor a medida que es producido. El residuo del biodigestor es removido ocasionalmente según la necesidad de fertilización requerida. Cuando no existe requerimiento de fertilización, el residuo es almacenado en un estanque que también está cubierto y que tiene también la capacidad de almacenar biogás. Otro sistema muy utilizado es el de flujo

---

---

continuo. En este sistema el material fresco es bombeado al interior del biodigestor y el mismo volumen es eliminado, manteniendo un volumen de llenado continuo. Este sistema es alimentado una a dos veces por día y en los biodigestores de mayor escala la alimentación puede llegar a ocurrir a cada hora.

Existen muchos tipos de biodigestores y sistemas de homogenización como se puede observar en la siguiente figura (3).-

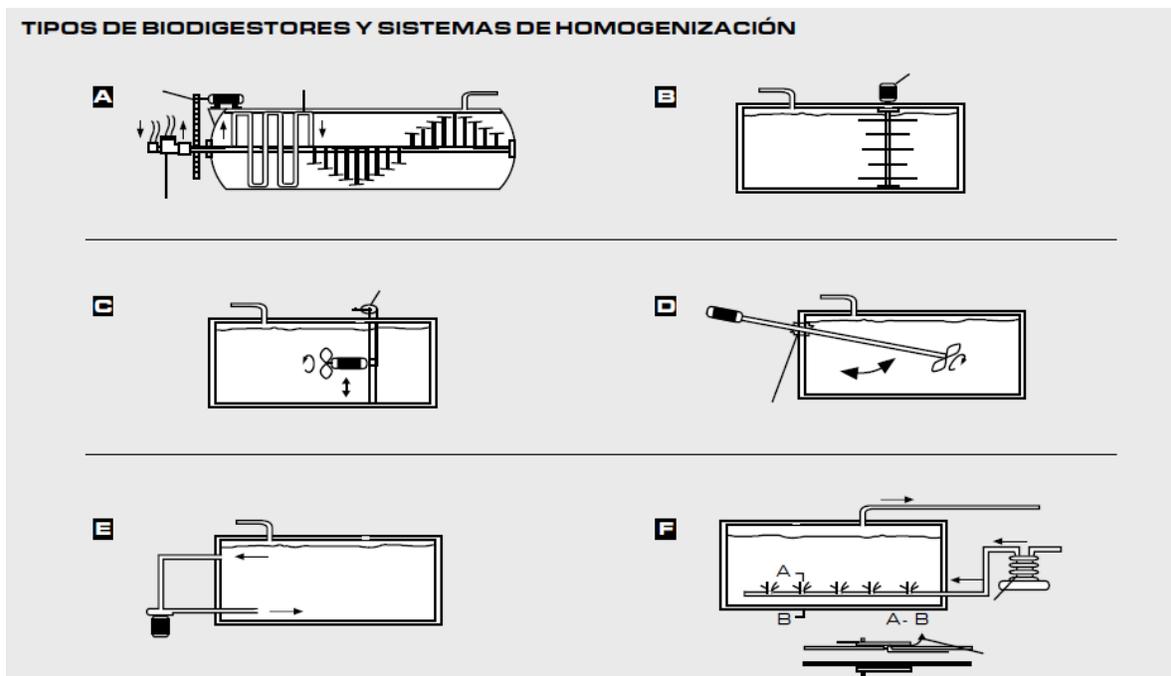


Figura 3. Tipos de Biodigestores y Sistemas de Homogenización. Kaiser (2009).

Un biodigestor está compuesto por más que un reactor. En general se identifican tres elementos principales (figura 4):

- a. Unidad de producción que incluye el sistema de recolección de la materia fresca y el biodigestor.

---

b. Unidad de almacenaje de biogás y tratamiento de biogás.

c. Equipos que utilizan el biogás y el residuo del biodigestor como fertilizante.

Existen un sinnúmero de diseños para cada uno de estos elementos. Algunos de los más comunes son descritos a continuación. El biodigestor puede tener un diseño horizontal o vertical. El diseño horizontal tiene como ventajas ser un sistema muy eficiente en el uso de la energía, ya que permite calentar y homogenizar con un mismo elemento. En este sistema el material fresco es introducido por un extremo y paralelamente se elimina el mismo volumen por el otro extremo sin que se mezclen los sustratos. De este modo se obtienen altos rendimientos en la producción de biogás. Por razones técnicas y económicas se construyen hasta un volumen máximo de entre 200 a 800 metros cúbicos.

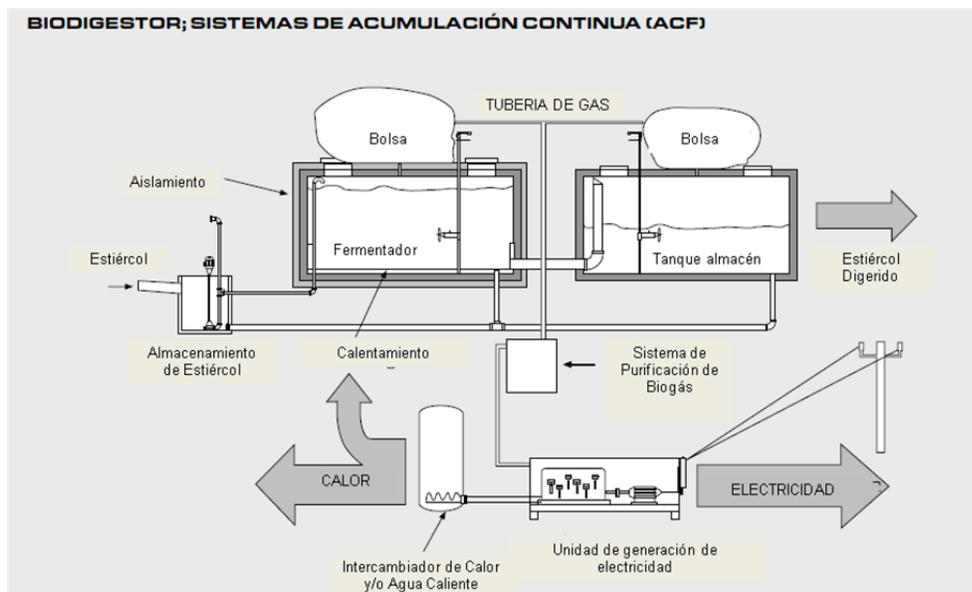


Figura 4. Biodigestor con sistema de acumulación continua. Kaiser (2009).

Para biodigestores de tamaño mayor a 800 metros cúbicos se utiliza el diseño vertical. Estos son construidos generalmente de concreto y en forma cilíndrica por

---

---

motivos estructurales. La ventaja de este diseño es la relación volumen/superficie y que las pérdidas termales son reducidas. La desventaja de este sistema es el no poder asegurar un tiempo de retención hidráulica para los sustratos, ya que el material fresco es homogenizado con el degradado y no existe un control del material eliminado.

Una vez que el biodigestor funciona correctamente es necesario controlar la calidad del biogás producido. Generalmente es necesario eliminar el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) del biogás para evitar la corrosión del motor a gas y la emisión de dióxido sulfuroso tras la combustión. En los biodigestores agropecuarios se realiza la eliminación del ácido sulfhídrico con un sistema biológico, el cual consiste en introducir en muy bajo volumen oxígeno para que éste reaccione con el azufre y precipite en la fase líquida, eliminándose así del gas. La cantidad de oxígeno requerido se traduce a una inyección de aire en una relación de un 2 a 6 por ciento del biogás producido, dependiendo de la concentración de ácido sulfhídrico presente en el biogás. En biodigestores de mayor escala se encuentran estanques biológicos de eliminación del ácido sulfhídrico externos al biodigestor.

La utilización más común del biogás en Europa es en motores a gas (CHP) con un generador eléctrico incorporado. En el caso donde la venta de energía eléctrica no es posible se utiliza el biogás como combustible para calderas. En el caso de biodigestores pequeños, en los cuales la potencia instalada no supera los 100 kilowatts, se utilizan motores combinados. Estos motores utilizan entre un 8 a un 10

por ciento de diesel para la ignición, lo que permite poder utilizar biogás de menor calidad (menor porcentaje de metano). Para el caso de biodigestores de gran producción de biogás existen motores especialmente acondicionados que permiten una mejor eficiencia eléctrica. A futuro, la celda de combustible para biogás puede ser una alternativa económicamente eficiente. O también, según la legislación local, se podrá introducir al sistema de gas natural tras una purificación para aumentar el contenido de metano al nivel de éste.

En la fig. (5) se muestra un diagrama con los diferentes posibles uso del Biogás, en donde para fines de esta investigación, se especifican los usos de acondicionamiento y compresión de biogás, para aprovechar su energía en forma de calor.

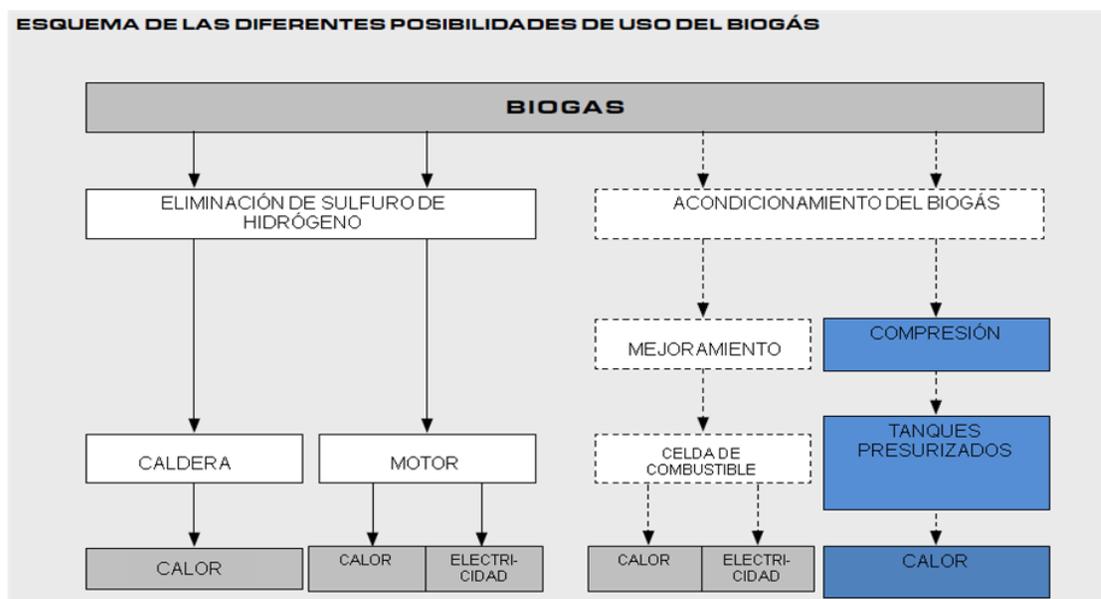


Figura 5. Diferentes posibles uso del Biogás. Esquema adaptado de Kaiser (2009).

También se presentan la siguiente síntesis de la metodología propuesta por Herrero (2008) para el diseño e instalación de biodigestores, alimentados por excretas de

---

ganado vacuno, debido a que es el tipo de biodigestor que se utilizará en esta investigación en particular:

El diseño de un biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar. La temperatura marcará la actividad de las bacterias que dirigieren el estiércol, y cuanto menor temperatura, menor actividad de estas y por tanto será necesario que el estiércol esté más tiempo en el interior del biodigestor. De esta forma la temperatura marca el tiempo de retención.

Por otro lado, la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura) determinarán el volumen del biodigestor.

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas donde su mayor rendimiento es a 70°C de temperatura, pero para ellos habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones en que su rango óptimo de trabajo es de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural; tales como el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. México. Lugar en donde se llevará a cabo este proyecto de investigación.

---

La actividad de las bacterias desciende si se encuentra por encima o por debajo del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción se depende de la temperatura ambiente que en muchas regiones es inferior al rango de temperaturas óptimo. A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta.

A temperaturas inferiores a 5 °C se puede decir que las bacterias quedan 'estáticas' y ya no producen biogás.

Por ello, es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia (figura 6), es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor.

Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias, que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

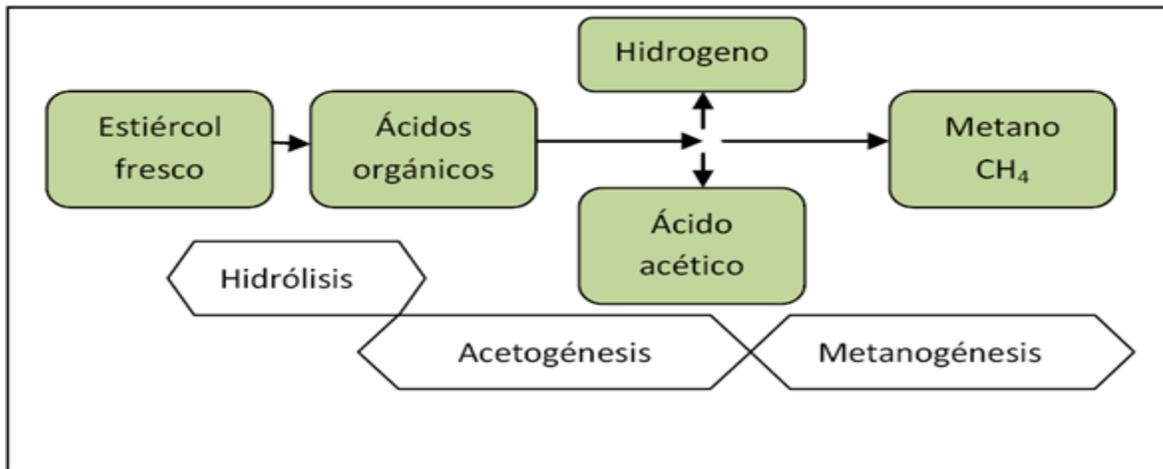


Figura 6. Proceso biológico que sucede en el interior de un biodigestor. Herrero (2008)

El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de cerdo y el de humano, pero el fertilizante que producen es muy ácido, además de que en el caso humano hay tener otras consideraciones. El estiércol más equilibrado es el de bovino, además que por animal se produce gran cantidad de estiércol, y por tanto es el más fácil de recoger.

De manera general, hay que calcular cuánto estiércol se dispone al día. Para ello hay que considerar el manejo del ganado que se realiza, ya que si es de pastoreo, solo se podrá recoger el 25% del estiércol producido por animal a lo largo del día. En caso de ganado estabulado el estiércol producido está disponible para ser introducido en el biodigestor. Se recomienda usar el estiércol necesario para la producción de biogás requerida, y dejar el sobrante para los usos tradicionales de abonado de los cultivos.

---

Todos los días hay que cargar el biodigestor con una carga de estiércol mezclada 1:4 con agua. De esta manera una parte es de estiércol y cuatro de agua. A esto se le llama mezcla de carga diaria (estiércol más agua). En artículos y bibliografía anterior se recomendaba en todos los casos mezclas de 1:4 para biodigestores tubulares, pero en el caso de estiércol de ganado bovino, una mezcla de 1:3 es suficiente como se ha visto experimentalmente.

En biodigestores tipo chino la mezcla se realiza 1:1, pero en biodigestores tubulares conviene diluir mucho más el estiércol de forma que no se formen 'natas' en la superficie. Además, una buena dilución de la mezcla asegura que el biodigestor realmente sea de flujo continuo, evitando que se atasque por exceso de materia sólida en su interior. Biodigestores tubulares que han sido cargados con relaciones de 1:2 de estiércol y agua, han tenido que ser desatascados a los pocos meses, por acumularse exceso de materia sólida en su interior.

El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa. Para que la carga diaria de entrada pueda ser digerida por las bacterias es necesario que esté en el interior del biodigestor tanto tiempo como el tiempo de retención estimado (según la temperatura del lugar). Ya que el biodigestor tubular es de flujo continuo, el volumen líquido será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria. De esta manera, si imaginamos el biodigestor vacío inicialmente y comenzamos a cargarlo de forma diaria, tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado en llenarse. Y así,

---

---

‘tiempo de retención +1 día’, al cargar el biodigestor, se desbordará expulsando la carga del primer día ya digerida. El volumen líquido de un biodigestor será el resultado de multiplicar la mezcla diaria de carga por el tiempo de retención.

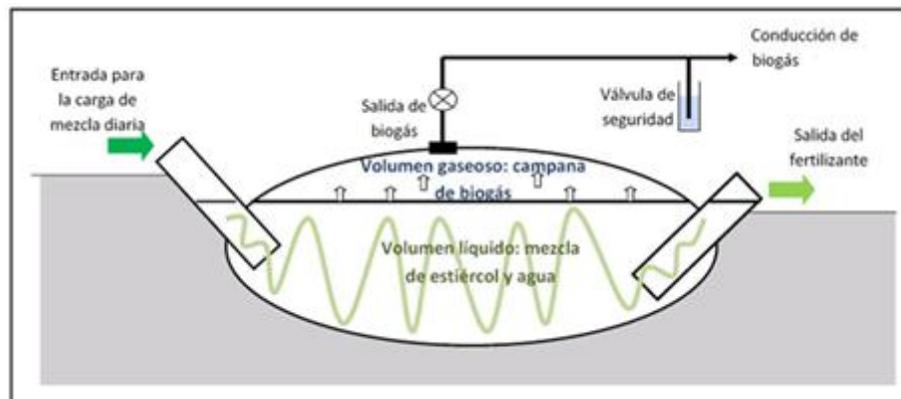


Figura 7. Esquema básico de un biodigestor con alimentación continua. Herrero (2008)

Dentro del biodigestor, por estar en una situación anaerobia (en ausencia de oxígeno) se va a producir biogás, y este se acumulará en la parte superior. Al ser el biodigestor de polietileno tubular se formará una campana de biogás que sirve para almacenar gas y darle forma al biodigestor (Figura 7).

Producción de biogás: La mezcla de estiércol con agua en el interior del biodigestor, en ausencia de aire, producirá biogás. Esta producción no es constante, y es un proceso que tarda aproximadamente, el tiempo de retención estimado según la temperatura de trabajo. De esta forma, un kilo de estiércol irá produciendo biogás de poco a poco a lo largo del tiempo de retención al que esté sometido.

---

## 2.4 Acondicionamiento del biogás

Actualmente el uso del biogás, se realiza en su mayoría en zonas de producción agropecuaria; es decir, en el mismo lugar en donde se genera, por lo que existe una gran necesidad de hacer el biogás transportable, y esto puede hacerse comprimiendo el biogás en cilindros, lo cual es posible únicamente después de remover el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), el Ácido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y los componentes del vapor de agua (Kapdi et al., 2006). Una vez que se ha purificado, el biogás resultante, presenta características muy similares a las del Gas Natural (GNC), por lo que puede ser utilizado en las mismas aplicaciones que este. Por esta razón, los países con más grandes programas de biogás en el mundo (China y la India), han estado trabajando con gran éxito en el uso del biogás comprimido en recipientes portátiles. Por ejemplo, han utilizado el biogás como combustible para vehículos, y lo han usado como combustible de motores de combustión interna para generar electricidad (Vijay, 2007). De tal forma que la generación de Biogás y su compresión en cilindros, incrementa su potencial como energía renovable en sustitución de los combustibles fósiles, y por lo tanto contribuye al desarrollo sustentable (Zafar, 2006).

Existen una gran cantidad de procesos para mejorar o enriquecer el contenido de metano en el Biogás, al remover la mayor cantidad posible de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y Ácido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). La mayoría de estos procesos han sido desarrollados en la industria del gas natural, y la industria del petróleo (Vijay, 2006). Por lo mismo, no todos los procesos son viables cuando la cantidad de biogás a trabajar es poca. Por lo que la selección del proceso a utilizar, depende de la

---

---

aplicación, de la escala a trabajar, de la pureza requerida y de la necesidad de querer recuperar o no el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

A continuación, se presenta un extracto de un artículo presentado por Morero, et al. (2010), sobre la revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás:

#### A. Eliminación de CO<sub>2</sub>

Absorción física: Los métodos de absorción fisicoquímicos se utilizan normalmente en la purificación de biogás ya que son efectivos incluso a bajos caudales. Además este método es menos complicado, requiere poca infraestructura y es de bajo costo. Un método fácil y económico utiliza agua presurizada como absorbente. El biogás crudo es comprimido y alimentado desde el fondo a una columna de lecho empacada y el agua presurizada es rociada desde la cima de la columna. El proceso de absorción es un proceso contra-corriente. De esta forma se disuelven el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S en agua y salen por el fondo de la torre. El agua puede ser recirculada a una torre de purificación.

Absorción química: La absorción química implica la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente, por lo tanto, comprende la ruptura de esos enlaces y correspondientemente una entrada relativamente alta de energía. Los solventes químicos generalmente emplean

---

soluciones acuosas de aminas (ej. mono-, di- o tri-ethanolamine) o soluciones acuosas de sales alcalinas (ej. hidróxido de sodio, potasio y calcio).

**Adsorción en una superficie sólida:** Los procesos de adsorción involucran la transferencia de soluto en la corriente de gas a una superficie de un material sólido, que se concentra principalmente como resultado de las fuerzas físicas de Van der Walls. Los adsorbentes comerciales son generalmente sólidos granulares con grandes áreas superficiales por unidad de volumen. A partir de una buena elección del adsorbente, el proceso puede remover CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, humedad y otras impurezas selectivamente o simultáneamente desde el biogás. La purificación del biogás se puede también llevar a cabo usando alguna forma de silicio, alúmina, carbón activado o silicatos, que son también conocidos como tamices moleculares. La adsorción normalmente se lleva a cabo a alta temperatura y presión. Tiene una buena capacidad para remover la humedad, tiene un diseño simple y es fácil de operar. Pero es un proceso costoso, con altas caídas de presión y altos requerimientos de calor.

**Separación por membrana:** El principio de esta técnica es que algunos componentes del gas crudo pueden ser transportados a través de una membrana delgada (menor a 1 mm) mientras que otros son retenidos. El transporte de cada componente se debe a la diferencia de presión parcial sobre la membrana y depende ampliamente de la permeabilidad del componente en el material de la membrana. Para alta

---

purificación de metano, la permeabilidad debe ser alta. Una sola unidad de separación de fases no puede proporcionar una completa separación de metano y dióxido de carbono y típicamente la baja presión del gas de salida (dióxido de carbono enriquecido) puede contener tanto como 12% v/v de metano. El producto de gas contiene alrededor de 88% v/v de metano. Sin embargo, los procesos de separación multietapas puede lograr 98% v/v aunque la presión necesaria para esta operación puede ser tan alta como 4 MPa. La membrana sólida construida a partir de polímeros de celulosa-acetato tiene una permeabilidad para el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S de 20 y 60 veces, respectivamente, superiores al CH<sub>4</sub>. Sin embargo, se requiere para este proceso una presión de 25-40 bar.

*Separación criogénica:* El método criogénico de separación implica la separación de la mezcla de gas por condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas. En la separación criogénica, el biogás crudo es comprimido a aproximadamente 80 bar. La compresión se realiza en múltiples etapas. El gas comprimido se seca para evitar que se congele durante el proceso de enfriado. El biogás es enfriado en intercambiadores y el CO<sub>2</sub> condensado es removido en un separador. El CO<sub>2</sub> es además procesado para recuperar el metano disuelto, que es reciclado a la entrada del gas. A partir de este proceso se obtiene más de 97% de metano puro. Aún no hay datos disponibles sobre costos operacionales y de inversión.

---

*Métodos de conversión química:* Este método se utiliza cuando se quiere obtener una alta purificación en el gas producido. Esto reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas. Normalmente el método de conversión química se utiliza luego de una buena remoción que se logró con otros métodos. Uno de dichos procesos de conversión es la metanización, en que el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub> son convertidos catalíticamente en metano y agua. El proceso de conversión química es muy caro.

## B. Eliminación de H<sub>2</sub>S

Introducción de aire/hidrógeno dentro del sistema de biogás.-

Este es un proceso simple y de bajo costo. No se necesitan químicos ni equipamientos especiales. Dependiendo de la temperatura, el tiempo de reacción y el lugar donde el aire se agrega, la concentración de H<sub>2</sub>S se puede reducir en un 95% a menos de 50 ppm.

- Adsorción usando óxido de hierro.-

El H<sub>2</sub>S reacciona con el óxido de hierro u óxidos para formar sulfuro de hierro. El biogás pasa a través de pelotitas de óxido de hierro, para remover el H<sub>2</sub>S. Cuando las pelotitas se cubren completamente con sulfuro, son removidas desde el tubo para la regeneración del sulfuro. Este es un método simple pero para la regeneración se libera mucho calor. Además el polvo empacado contiene un componente tóxico y el método es sensible a biogás con altos contenidos de agua.

- 
- Sistema comercialmente llamado GAS RAP® .-

Tiene la capacidad de limpiar el H<sub>2</sub>S dentro de la entrada del gas suministrado a niveles inferiores de entre 25 y 50 ppm. Esta tecnología aparece como la más costo-efectiva para gas de basural con altas concentraciones de H<sub>2</sub>S (mayores a 2000 ppm v/v).

- Procesos de oxidación en fase líquida.-

Este proceso se usa para el tratamiento de gases que contienen relativamente bajas concentraciones de H<sub>2</sub>S. Este puede ser un proceso de absorción físico o un proceso de absorción químico. En los procesos de absorción físicos el H<sub>2</sub>S puede ser absorbido por el solvente. Uno de los solventes es el agua. Pero el consumo de agua es muy alto para la absorción de pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>S. Si algunos químicos, como el Hidróxido de Sodio (NaOH), son agregados al agua el proceso de absorción es mejorado. Esto forma sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio, que no se regenera y genera residuos líquidos. En la absorción química del H<sub>2</sub>S los químicos usados pueden ser sólidos o líquidos y pueden ser aplicados en torres de contacto batch o puede inyectarse directamente a la cañería de gas. El subproducto de la reacción es generalmente separado y tratado como desecho. El producto químico es consumido y el absorbente puede ser regenerado.

- Separación por membranas.-

Cosoli et al. (2007) realizó un trabajo para estudiar la remoción de H<sub>2</sub>S a partir de corrientes de biogás con diferentes zeolitas. Los principales resultados de este

---

trabajo confirmaron que las zeolitas hidrofílicas son más indicadas para la adsorción de  $H_2S$ . Las isothermas de adsorción, el calor isotérmico de adsorción y la distribución de energía confirman las tendencias específicas y explican el comportamiento de adsorción. Por otra parte, Harasimowicz et al. (2007) demostró que usando módulos capilares con membranas de polimida era posible lograr el enriquecimiento de  $CH_4$  desde concentraciones de 55-85% a 91-94%. El material de la membrana es resistente a bajas concentraciones de gases ácidos y asegura la reducción de  $H_2S$  y la concentración de vapor de agua también.

Finalmente con relación a los procesos de purificación de Biogás, hacemos énfasis en los reportes científicos hechos por Kapdi (2005) y Vijay (2007), quienes manifiestan que el proceso de acondicionamiento de biogás, consistente en la limpieza con agua a presión, es un método fácil y económico que ha sido probado con éxito en proyectos de envasado de biogás presurizado en la India (figura 8), puesto que permite la eliminación tanto del Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) como del Ácido Sulfhídrico ( $H_2S$ ) los cuales son las principales impurezas presentes en el biogás. De esta forma el biogás se convierte en un equivalente al gas natural aumentando su potencial empleo como combustible para diferentes usos.

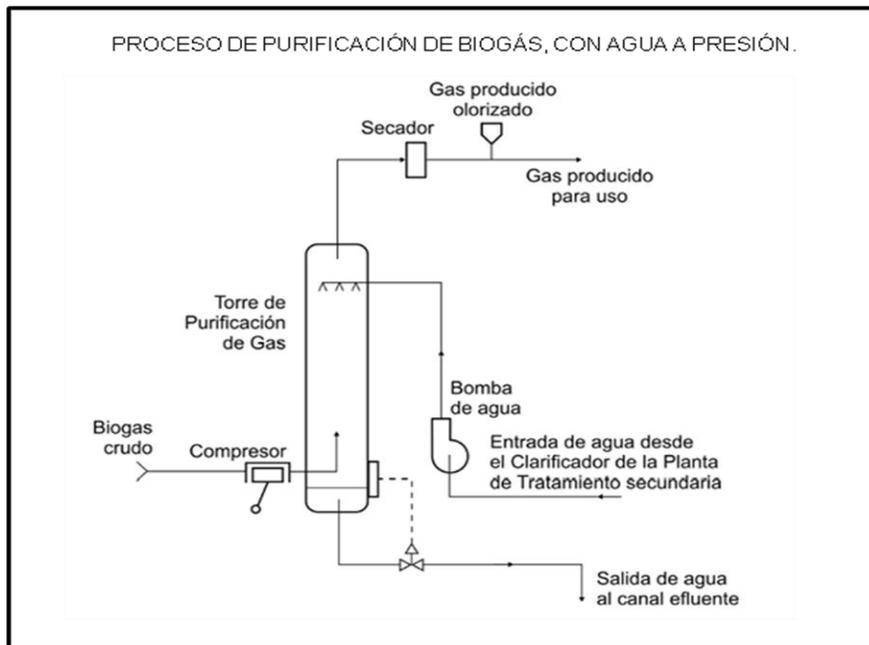


Figura 8. Proceso básico de purificación de biogás con agua a presión. Diagrama, Morero et al, (2010).

También este mismo método de purificación de biogás, ha tenido en éxito en plantas de purificación y compresión de biogás en cilindros en Pakistán (Zafar, 2006), por lo que servirá como base para el diseño del sistema en este proyecto de investigación.

---

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describirá la metodología que se llevará a cabo para ir cubriendo cada uno de los objetivos de investigación propuestos en este trabajo. Los cuales están estructurados de la siguiente forma:

Primeramente se llevará a cabo la instalación de un biodigestor, con el objeto de determinar su desempeño en condiciones reales de operación. Posteriormente, se realizará el diseño del sistema de purificación y compresión de biogás, por lo que inicialmente se llevará a cabo un diseño mecánico utilizando un software de simulación, posteriormente se realizará la construcción del sistema, el cuál será probado con el biogás producido en la primer etapa. Finalmente, con los resultados obtenidos en las dos etapas anteriores, se realizará el cálculo de las emisiones de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), producidas por los combustibles más usados en la industria ladrillera de Chiapa de Corzo, Chiapas; México.

---

### 3.1 Implementación y evaluación de un digestor anaeróbico alimentado por excretas de ganado vacuno para generar biogás.

#### 3.1.1 Sitio para la implementación del Biodigestor.

El lugar propuesto para la instalación del biodigestor, es el Rancho Nueva Esperanza (figura 9), ubicado en el Ejido Galecio Narcía, Municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. Cuyas coordenadas geográficas son:

Longitud: 92°59'59"; Latitud. 16°40'28"

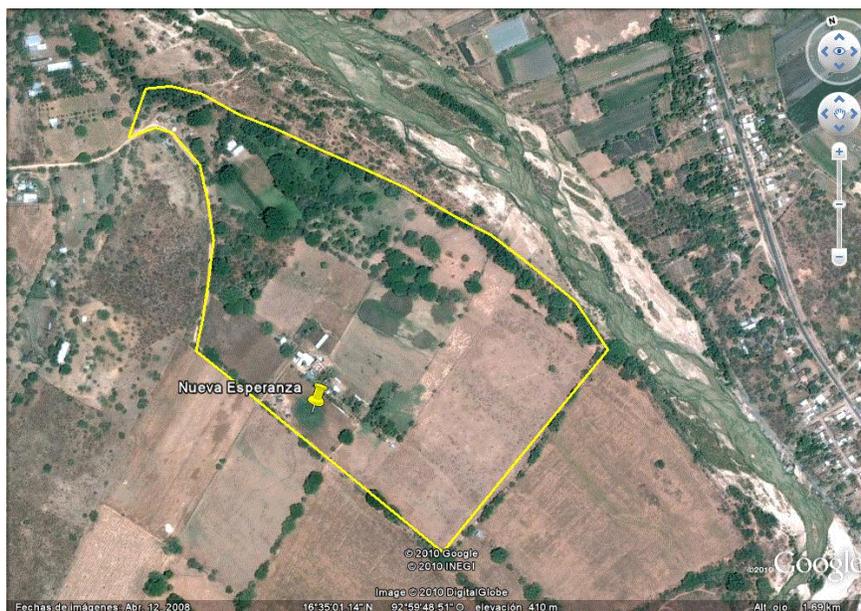


Figura 9. Fotografía satelital del Rancho Nueva Esperanza, Fuente Google Earth (2009). Longitud: 92°59'59"; Latitud. 16°40'28". Coordenadas recabadas en campo, tomadas en DATUM Horizontal WGS84. Gómez (2010).

Este lugar se seleccionó debido a su cercanía con los centros de producción de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo y además de que cuenta con ganadería

---

---

intensiva, lo que facilita la obtención de materia orgánica para la alimentación del biodigestor.

### 3.1.2 Cálculo de la cantidad de estiércol a producirse en el rancho

De acuerdo a los datos recabados en campo (Gómez, et al 2011), el Rancho Nueva Esperanza es un rancho lechero de ganadería intensiva que cuenta con 200 hembras (vacas) con un peso promedio de 425 kg, 2 machos (toros) adultos con un peso promedio de 600 kg, y 100 crías (becerros) con un peso promedio de 150 kg. Es ganado bovino de registro raza AFS (Australian Freisian Sahiwal), ver figura 10.



Figura 10. Fotografía del ganado raza AFS (Australian Freisian Sahiwal).Gómez (2010).

Según Elizondo (2005) y Wayllas (2010), un ejemplar vacuno, puede llegar a producir desde un 6% hasta un 8% de estiércol con relación a su peso. Por lo tanto, si

---

---

tomamos en cuenta únicamente el peso promedio de las vacas del rancho, debido a que son las que servirán para fines de experimentación en este proyecto; podemos inferir entonces, la cantidad diaria de estiércol a producirse y que será materia prima potencial para la generación de biogás.

- Peso promedio de las vacas en el rancho: 425 kg
- Número de ejemplares: 200
- Estiércol promedio producido por animal: 6.5% de su peso

Entonces (200 animales) X (425 kg / animal.día) x (0.065)= 5,525 kg/día

Debido a las características del rancho, se calculó que la cantidad diaria de estiércol máxima a recolectar y a depositar en el biodigestor será del 30%, por lo tanto:

| Cálculos                            | Total de estiércol aprovechable para producir Biogás (TEA) |
|-------------------------------------|--|
| TEA=(5525 kg/día) X (0.30)= 1657.5= | TEA=1,658 kg/día   |

Cuadro 1.- Total de estiércol aprovechable

---

### 3.1.3 Cálculo de la cantidad de Biogás a producirse

El digestor anaeróbico propuesto para instalarse en el rancho, es el denominado Biodigestor Rígido DM-1 (Farrera, 2011), el cual tiene una capacidad de producción de 33.3 L de Biogás producido al día por cada 26.66 L de estiércol alimentados, usando una proporción de 3 a 1 (Agua: Estiércol).

Por lo tanto, podemos hacer inferencias de producción con los datos teóricos reportados al respecto. Entonces, si sabemos que la Densidad del estiércol = 0.95 kg/L (Farrera, 2011) y que de acuerdo a los cálculos de la sección anterior, los cuales nos indican que el rancho podría producir 1,658 kg de estiércol /día; Podemos deducir, la cantidad de Litros de Biogás a producirse en el biodigestor.

Cálculos:

- Cantidad de estiércol alimentados al biodigestor (CEAB):

$$\text{CEAB} = \text{TEA} / \text{densidad del estiércol} =$$

$$\text{CEAB} = 1,658 \text{ kg/día} / 0.95 \text{ kg/L} = 1,745.26 \text{ L/día}$$

Y si el Biodigestor DM-1 produce por cada 26.66 L/día estiércol, la cantidad de 33.3 L/día de Biogás; entonces, usando la regla de proporcionalidad simple, determinamos que:

---

| Cálculos                               | Cantidad de Biogás a producir (CBP)                       |
|--|---|
| CBP= (CEABx33.3 L/día) / (26.66 L/día) | CBP= 2,179.94 L/día<br><br>CBP= 2.18 m <sup>3</sup> /día. |

Cuadro 2.- Cantidad de Biogás a producir

Por lo tanto, el Tipo de Biodigestor requerido será el **Rígido DM-1** con capacidad de 5,000 L, el cual tiene una capacidad de almacenar biogás del 70%, es decir 3,500 L.

| Tipo de Biodigestor | Cantidad Máxima de Almacenamiento de Biogás (CMAB) |
|---------------------|--|
| Rígido DM-1 5000 L  | CMAB= 3,500 L                                      |

Cuadro 3.- Cantidad Máxima de Almacenamiento de Biogás

Todos estos cálculos, nos servirán como parámetros de comparación, una vez que se haya instalado el biodigestor y se tenga producción de biogás.

---

3.2 Diseño, construcción e implementación de un sistema de purificación, compresión y almacenamiento de biogás.

Para poder alcanzar el objetivo relativo al sistema de purificación, compresión y almacenamiento de biogás, se diseñó un dispositivo al que se le denominará:

**Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás**

Por lo que a continuación, se presentan los fundamentos teóricos y metodológicos que se utilizaron para la el diseño de dicho sistema, el cual de manera general está representado por el esquema siguiente (Figura 11):

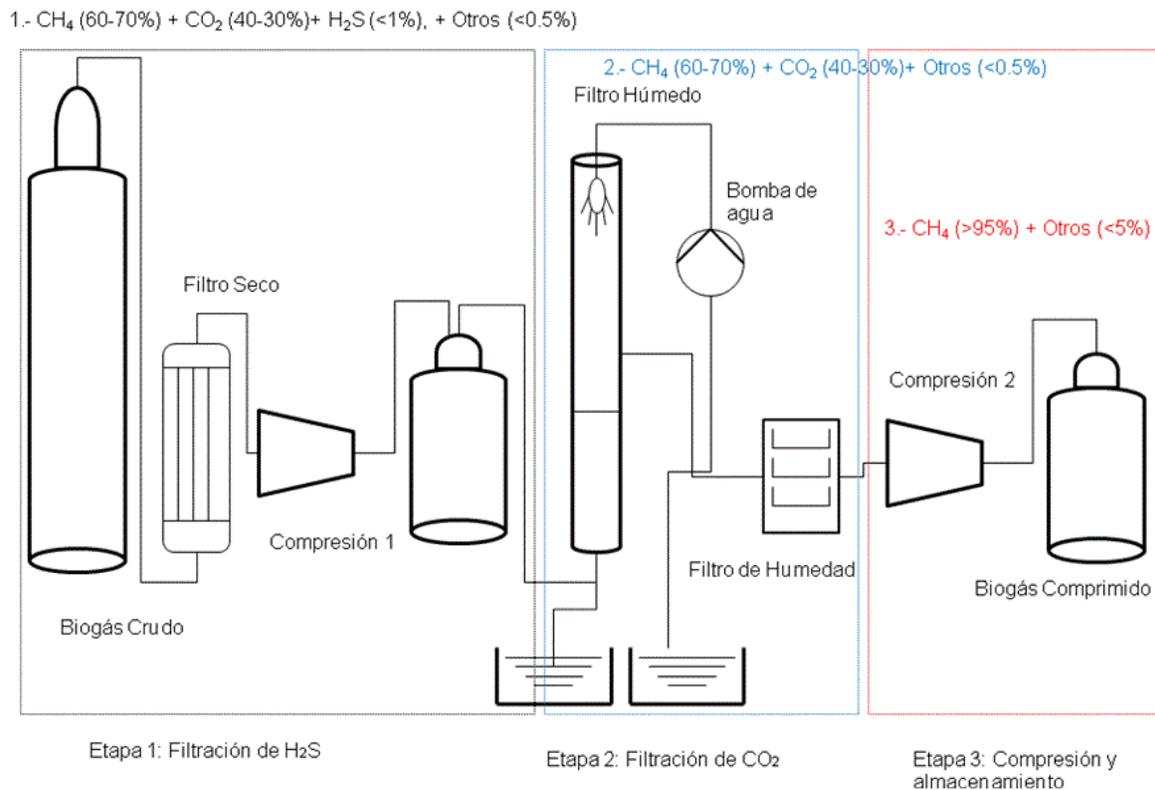


Figura 11. Esquema diseñado para el sistema de purificación y compresión de biogás. Gómez (2012).

---

Posteriormente, con base en el esquema diseñado, se procedió a elaborar el diseño mecánico en 3D del módulo, el cual se presenta a continuación (Figura 12):

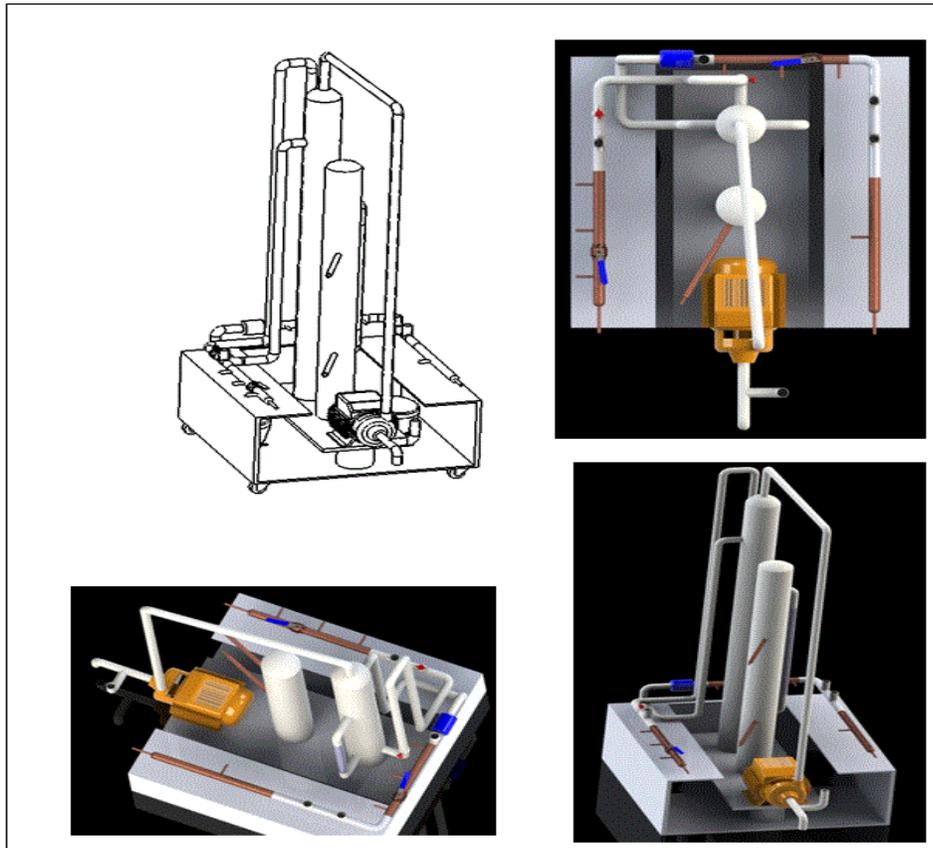


Figura 12.- Dibujo y Diseño mecánico (software solid Works 2012) del sistema. Gómez (2012).

En los puntos subsecuentes, se describen las características de cada uno de los materiales, principios y procesos de diseño de este módulo de acondicionamiento y presurizado de biogás.

---

### 3.2.1 Acondicionamiento del Biogás mediante su purificación

El biogás es una mezcla de gases: metano ( $\text{CH}_4$ ) 60%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) 35%, agua (en forma de vapor) ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 4%, sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) <1%, y en menor medida restos de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ). (Morero et al, 2008). Por lo que necesita ser purificado para aprovechar el poder calorífico del Metano.

El metano, componente principal del biogás, pertenece a la familia de los hidrocarburos, por lo tanto, tiene propiedades inflamables, mientras que los otros gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , y otros), simplemente influyen en la dilución del biogás. Si el biogás es utilizado para equipos tales como generadores eléctricos, microturbinas y compresores, el ácido sulfhídrico puede causar daños internos. En el caso de los compresores, el  $\text{H}_2\text{S}$  hará un efecto de corrosión directamente en los pistones, además de ser extremadamente nocivo para la salud humana, puesto que bastan 20-50 ppm en el ambiente, para causar un malestar agudo que lleva la sofocación y a la muerte por sobreexposición (Viquez, 2010).

En esta investigación, el biogás será utilizado para sustituir otras fuentes energéticas similares usadas en la industria ladrillera del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. Por lo tanto, es de suma importancia garantizar que el mismo no contenga compuestos, que dañen física y/o químicamente el equipo que se piensa aprovechar.

---

---

### 3.2.2 Diseño del Filtro Seco para Eliminación del Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S)

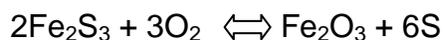
En este proyecto se propone un sistema de purificación del Biogás, con dos filtros principales, un filtro para la eliminación de Acido Sulfhídrico (filtro seco) y otro filtro para la eliminación del Dióxido de Carbono (filtro húmedo); por lo tanto, en esta sección se describen los elementos teóricos metodológicos que se seguirán para la construcción del primer filtro.

El filtro seco, como ya se mencionó, tiene la intención de eliminar del sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S). La diferencia entre ambos, es simplemente el estado físico en que se encuentre (Viquez, 2010). El sulfuro de hidrógeno es un gas, mientras que el ácido sulfhídrico es el mismo sulfuro de hidrógeno, que ha reaccionado con agua para formar un ácido.

Este primer filtro, se denominó “seco” y consiste en un sistema propuesto por Díaz (2008), el cual utiliza virutas de acero tratadas que se convierten en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Oxido Férrico) el cual reacciona rápidamente con el Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S), formando Sulfuro Férrico (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>). El objetivo es llevar de más de 60 ppm de H<sub>2</sub>S contenido en el biogás, a menos de 10 ppm, la cual es la concentración máxima permitida en lugares de trabajo.

---

El método se apoya en la reacción química siguiente:



El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y el  $\text{H}_2\text{O}$  actúan sobre el  $\text{H}_2\text{S}$  muy rápidamente y se transforman en un compuesto de sulfuro de hierro del tipo 3, que es muy fácil de convertir al estado de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  activo, gracias al oxígeno del ambiente.

El compuesto  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no se disuelve, por lo que se puede separar y sacar del compuesto e inmediatamente después éste se oxida con el oxígeno del ambiente. Y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vuelve a dar la vuelta al ciclo tecnológico para convertirse en un nuevo  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Para lograr esto, se tienen que utilizar virutas de acero tratadas. Por lo que primeramente se deben lavar las virutas con detergente para eliminar la grasa y otras suciedades que puedan traer y dejarlas secar.

Posteriormente se sumergen las virutas limpias en una solución de HCl (Acido Clorhídrico) a 5% durante 5-10 minutos, se extraen y se dejan secar al aire. Y finalmente se sumergen las virutas en una solución de NaOH (Hidróxido de Sodio) al 5% de 5 a 10 minutos y se dejan secar al aire.

---

---

Esto ocasiona que las virutas se conviertan en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  compuesto, que sí reacciona rápidamente con el  $\text{H}_2\text{S}$ . Un punto importante a considerar es que el límite de absorción del  $\text{H}_2\text{S}$  en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es del 56%.

El sistema de remoción de Acido Sulfhídrico mencionado, fue diseñado para ser utilizado en Instalaciones de Gas Natural, el cual recién extraído presenta características muy similares al Biogás, es por esto; que es el método que se usará para fines de este proyecto de investigación.

### 3.2.3 Especificaciones de construcción del Filtro Seco para Eliminación del Ácido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )

Para la construcción del Filtro de Eliminación del  $\text{H}_2\text{S}$ , se utilizará tubería de PVC Hidráulico de 10.16 cm de diámetro (4"), con accesorios del mismo material y con válvulas y conexiones de cobre para el acceso y salidas del gas. Ver figura 13.

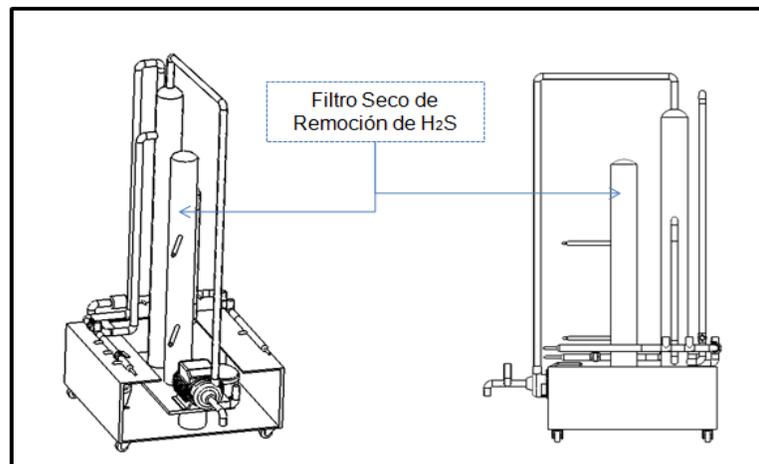


Figura 13. Ubicación del Filtro Seco en el sistema. Diseño, Gómez (2012).

---

El filtro, tendrá una altura de 1.10 m, y por dentro contendrá un sistema de doble malla en donde se coloca la limadura de hierro tratada (Figura 14), que como se mencionó anteriormente se convierte en Oxido Férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

El funcionamiento del Filtro Seco será el siguiente:

El biogás “crudo” se hace pasar por el filtro seco, debido a que un compresor de 0.25 W, realizará un trabajo de succión desde la parte superior del filtro, haciendo pasar el biogás filtrado de Ácido Sulfhídrico hacia un tanque metálico, en donde se depositará el biogás hasta una presión de  $14 \text{ kg/cm}^2$  (200 psi). En esta parte el biogás deberá contener todavía Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) aproximadamente al 30% del volumen total.



Figura 14. Colocación de la limadura de hierro tratada en el Filtro Seco. Fotografía, Gómez (2012).

---

### 3.2.4 Diseño del Filtro Húmedo para Eliminación del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y restos del Acido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

La segunda etapa del proceso de purificación del Biogás, consiste en la eliminación del CO<sub>2</sub>, y de los restos de H<sub>2</sub>S que hayan quedado del proceso anterior “filtro seco”.

A este sistema se le denominó “filtro húmedo”, debido a que se usa agua a presión en filtro de columna, en donde se aplica el agua desde la parte superior y por la parte inferior se suministra el biogás (Figura 15), lo que ocasiona burbujeo en la solución y el CO<sub>2</sub> es absorbido, el agua que sale del sistema, posteriormente puede ser regenerada y recirculada por el filtro para su uso posterior. La purificación del Biogás mediante un proceso de absorción por agua a presión, es un proceso desarrollado para la compresión y embotellado del biogás. (Vijay, 2007).

El método de “filtro húmedo”, mejora su capacidad de absorción de CO<sub>2</sub>, si el burbujeo resultante del suministro de agua se realiza en una solución de Óxido de Calcio (CaO), por lo que el sistema que se utilizará para realizar esta operación es el propuesto por Coto et al, 2007 (Morero et al, 2010), el cual consiste en utilizar tubería de 0.08 m de diámetro, con 1.0 m de longitud. Y la proporción a utilizar serán de tres partes de agua por una parte (en peso) del compuesto CaO, y el tiempo que durará el proceso será de 3 minutos.

---

---

Este procedimiento teóricamente ayudará a purificar el biogás con un porcentaje original de metano (CH<sub>4</sub>) del 60% a un porcentaje aproximado de contenido del metano del 90% después de utilizar el filtro húmedo. No es recomendable que se elimine por completo el CO<sub>2</sub> y el resto de los elementos del biogás, ya que estos compuestos impiden que el biogás detone cuando se somete a compresión. La retención ocurre al reaccionar el CO<sub>2</sub> con la solución de óxido de calcio, mediante la siguiente reacción:

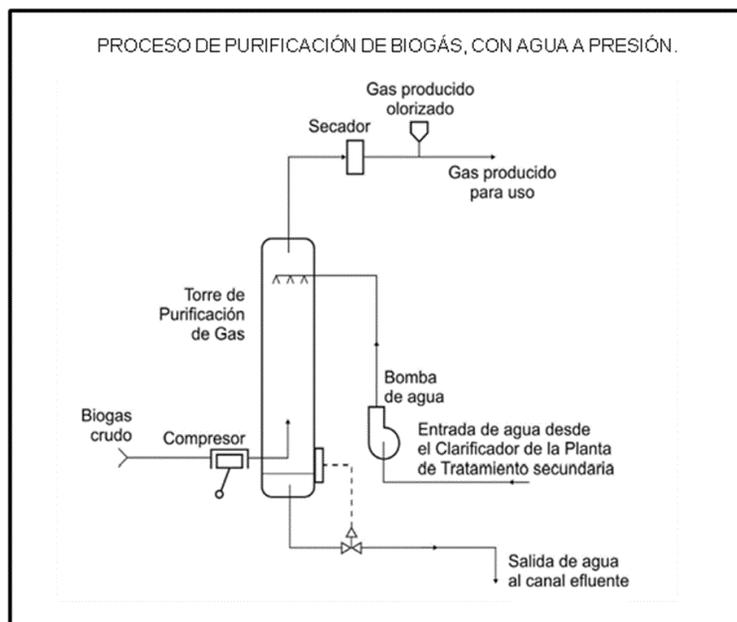


Figura 15. Proceso de Purificación de Biogás con agua a presión. Diagrama propuesto por Morero et al, (2010).

---

---

Los métodos de purificación de biogás utilizando agua a presión, son los más fáciles de implementar y menos costosos. Además han dado grandes resultados en procesos de purificación de biogás para posteriormente embotellarlo para usar el biogás como combustible en diversas aplicaciones (Kapdi et al, 2005).

### 3.2.5 Especificaciones de construcción del Filtro Húmedo para Eliminación del Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y restos del Acido Sulhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Para la construcción del Filtro de Eliminación del  $\text{CO}_2$ , se utilizará tubería de PVC Hidráulico de 10.16 cm de diámetro (4”), con accesorios del mismo material y con válvulas, conexiones y tubería también de PVC de 1.27 cm (0.5”) para el acceso y salidas del gas (Figura 16).

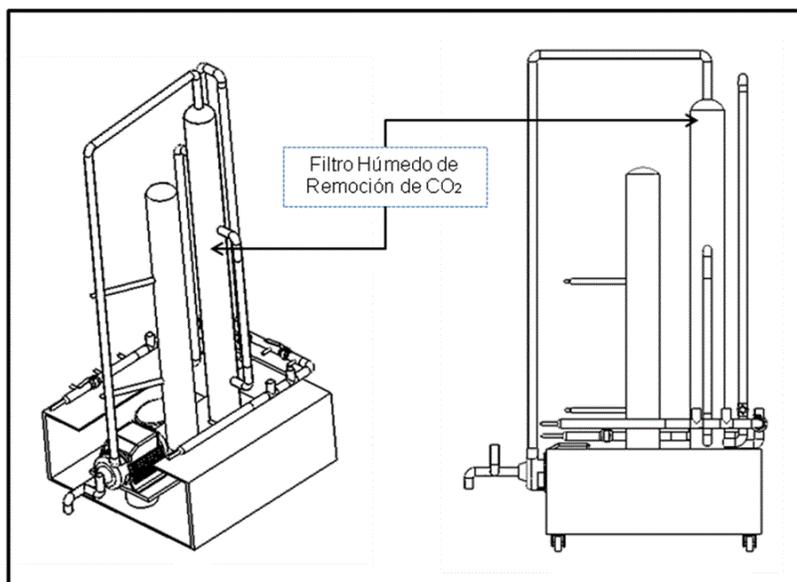


Figura 16. Ubicación del filtro húmedo en el sistema. Diseño, Gómez (2012).

---

---

El filtro húmedo, como se mencionó anteriormente consiste en un filtro de columna de agua a presión, y funcionará de la siguiente manera:

El tanque metálico, contiene Biogás con Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) en una proporción aproximada del 30% del volumen total, y se encuentra presurizado hasta una presión de  $14 \text{ kg/cm}^2$  (200 psi). Este gas a presión es liberado mediante una válvula que regula la presión de salida, y es enviado al filtro por debajo del mismo; al mismo tiempo, una bomba con capacidad de 0.5 W (0.5 H.P.) suministra agua a presión al filtro por la parte superior de éste, lo que ocasiona el burbujeo que absorbe el Dióxido de Carbono. El gas ya purificado con un porcentaje de por lo menos 90% de Metano ( $\text{CH}_4$ ), sigue su camino por la tubería hacia el compresor 2 de 0.5 W (0.5 H.P.) el cual comprimirá finalmente el biogás en el tanque metálico 2 (Figura 17).

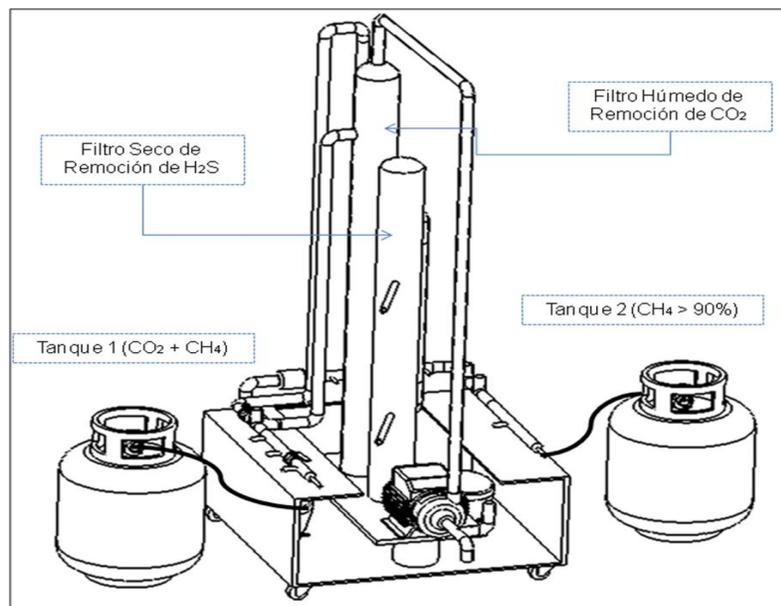


Figura 17. Ubicación de los tanques metálicos en el sistema. Diseño, Gómez (2012).

---

---

### 3.2.6 Especificaciones de funcionamiento del módulo completo de acondicionamiento y presurizado de Biogás.

En los puntos anteriores, se mencionó el funcionamiento de los filtros para remoción de Acido Sulfhídrico ( $H_2S$ ) llamado “filtro seco” y el de eliminación de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) denominado “filtro húmedo”, sin embargo; estos filtros no funcionan de manera autónoma, sino que pertenecen a un “Módulo” que independientemente de purificar el Biogás, lo comprime en tanques metálicos de alta presión. Para tal fin, el módulo diseñado contará con un compresor 1 de 0.25 W (0.25 H.P.) que es el que succiona el biogás de la bolsa reservorio, lo hace pasar por el filtro seco y luego lo comprime en el tanque metálico 1. Y el compresor 2 de 0.5 W (0.5 H.P.), que succiona el biogás ya purificado y lo comprime en el tanque metálico 2 a una presión máxima de  $35 \text{ kg/cm}^2$  (500 psi).

A continuación se presentan diagramas, en donde se especifican cada uno de los componentes que integran por completo el Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás (Software utilizado, SOLIDWORKS 2011):

En la figura 18, se muestra la vista frontal del sistema diseñado:

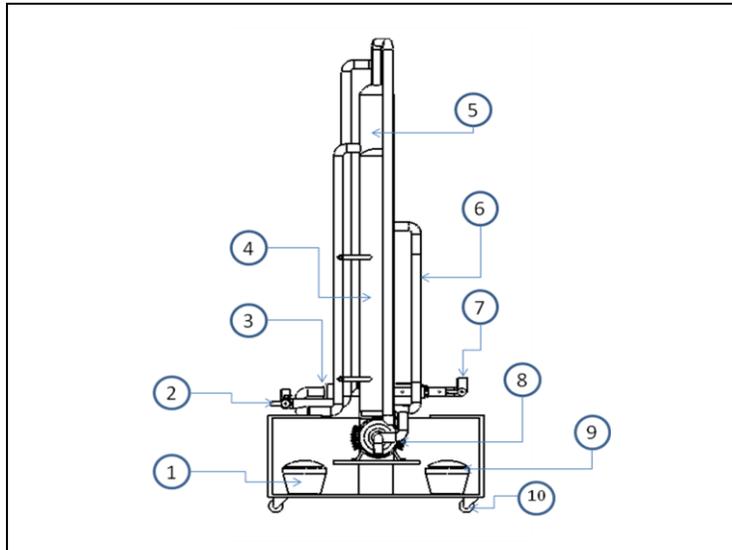


Figura 18. Vista frontal. Diseño, Gómez (2012).

En la figura siguiente (Figura 19), se muestra una vista superior del módulo diseñado.

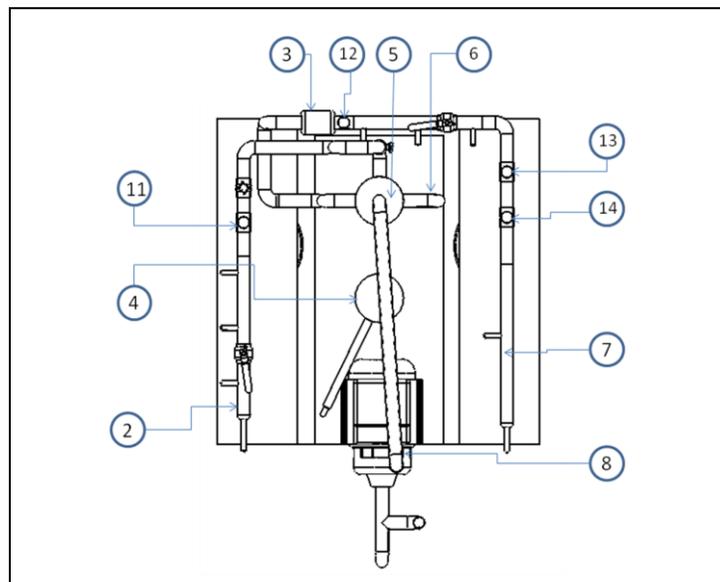


Figura 19. Vista superior. Diseño, Gómez (2012).

---

También, para entender de mejor manera el módulo diseñado, en esta sección se muestra una vista isométrica del módulo de acondicionamiento y presurizado de biogás.-

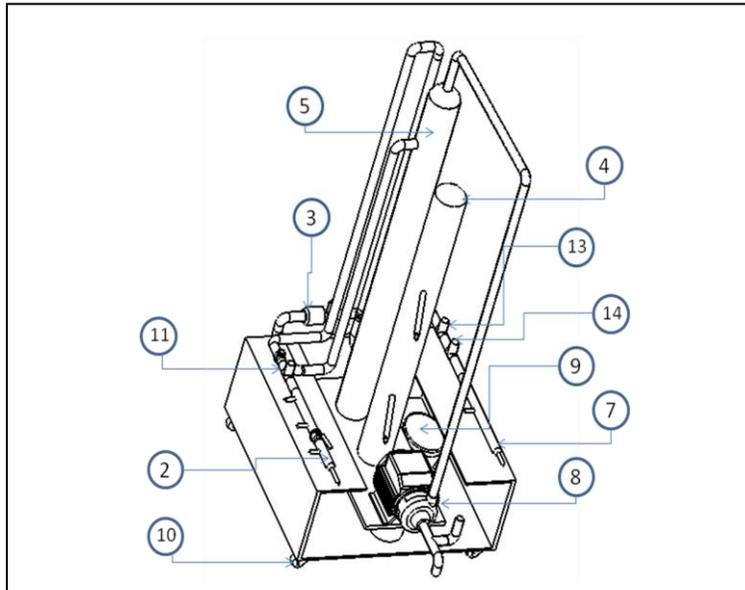


Figura 20. Vista isométrica. Diseño, Gómez (2012).

Cada una de las figuras anteriores, tiene enumerada cada una de las partes que componen el sistema, con el objeto que con la tabla siguiente (Cuadro 4) se puedan identificar de mejor manera.

Entonces:

---

|   |  |    |  |
|---|--|----|--|
| 1 | Compresor 1 capacidad 0.25 W (0.25 H.P.)       | 8  | Bomba de Agua de capacidad de 0.5 W (0.5 H.P.) |
| 2 | Válvula de entrada de biogás                   | 9  | Compresor 2 capacidad 0.5 W (0.5 H.P.)         |
| 3 | Filtro de Humedad                              | 10 | Llantas para desplazamiento del equipo         |
| 4 | Filtro Seco                                    | 11 | Indicador de Presión                           |
| 5 | Filtro Húmedo                                  | 12 | Indicador de Temperatura                       |
| 6 | Indicador de Nivel de Agua en el Filtro Húmedo | 13 | Indicador de Temperatura                       |
| 7 | Válvula de salida de biogás purificado         | 14 | Indicador de Presión                           |

Cuadro 4.- Características del Módulo

---

### 3.3 Análisis de forma comparativa de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) emitido por los diferentes combustibles usados en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas.

En esta sección, se presenta la metodología que se utilizará para determinar de manera analítica, la cantidad de de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) que se genera al utilizar madera (leña) y aceite lubricante gastado como combustibles en los hornos de ladrillo típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. Los cuales son los combustibles usados en mayor proporción en la zona (leña 46% y aceite gastado 22%), de acuerdo a los resultados reportados por Gómez et al (2011).

Además, se presenta la forma en la que se realizarán las inferencias de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) generada por el uso del Biogás como combustible en los hornos de ladrillo. Debido a que este proyecto de investigación, propone el uso de biogás, como una alternativa de energía renovable para sustituir otros combustibles en la industria ladrillera de la región antes mencionada.

---

3.3.1 Determinación analítica de la cantidad de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) producido al usar madera (leña) como combustible.



Figura 13. Leña utilizada para cocer ladrillo. Fotografía, Gómez (2012).

En la Figura 13, se muestra el tipo de madera que se utiliza para cocer ladrillo en la zona, por lo que para poder determinar de manera analítica el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) generado por el uso de leña en la cocción de ladrillos, usaremos como aproximación, la hipótesis planteada por Carazo (2006), la cual establece que:

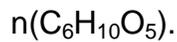
Ho: Madera = Celulosa

Y debido a que la madera es celulosa en su mayor parte (García et. al, 2006; Orea et al, 2004). Además esta es un polímero natural cuya macromolécula tiene la fórmula empírica  $n(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)$ .

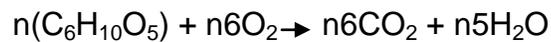
---

---

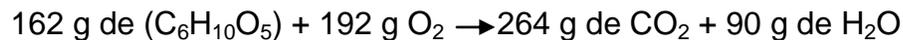
Entonces, para nuestro caso, la madera será únicamente celulosa y su fórmula simplificada es:



Por lo tanto, la Reacción química fundamental de la combustión de madera es:



Por lo que 1 mol de celulosa reacciona exactamente con 6 moles de oxígeno para dar 6 moles de dióxido de carbono y 5 moles de agua. Entonces:



Si se dividen estos pesos entre 162 se tendrá la reacción ajustada para 1 kg de madera (celulosa):



Por lo tanto, si se usan 1.00 kg de Madera se generarán 1.63 kg de CO<sub>2</sub>.

Esta será la razón que utilizaremos para calcular el CO<sub>2</sub> por uso de leña, si conocemos la cantidad de leña, que se utiliza al cocer ladrillo en un horno típico de la región.

---

---

### 3.3.2 Cálculo de la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en un horno de ladrillo, por el uso de Aceite Lubricante Gastado.

Con relación a la cantidad de Dióxido de Carbono generado por el uso del sistema de combustión de Aceite Lubricante Gastado (Figura 14) , no se encontró información en la literatura científica. Por lo tanto, no se podrán hacer comparaciones con respecto a la madera y al biogás. Sin embargo en Figura 15, se presentan las mediciones de otros factores emitidos a la atmósfera que se han hecho con respecto a la combustión de aceite gastado en hornos de ladrillo, únicamente con el objeto de conocer el tipo de contaminación que el aceite gastado emite durante el proceso de cocción en horno típico de ladrillo



Figura 14. Equipo de aceite lubricante gastado, utilizado para cocer ladrillo. Fotografía, Gómez (2012).

| Parámetros a medir | Referencia 1 (Puntual) (Comimsa, 2002) | Referencia 2 (Perimetral) (IHNyE, 2005) | Referencia 3 (Perimetral) (IHNyE, 2006) | PARAMETROS DE NORMA   | NORMA APLICADA O APLICABLE NOM´s-XX-SSA1-1993 |
|--------------------|--|---|---|-----------------------|---|
| PST´s              | 16 (mg/m <sup>3</sup> )                | 288.7 µg/m <sup>3</sup>                 | <b>41.7 µg/m<sup>3</sup></b>            | 120 µg/m <sup>3</sup> | <b>NOM-024- SSA1-1993</b>                     |
| NO <sub>2</sub>    | 93 (ppm/v)                             | No medido                               | <b>12.49</b>                            | 210 ppb               | <b>NOM-023- SSA1-1993</b>                     |
| SO <sub>2</sub>    | 34 (ppm/v)                             | 16.5 (ppb)                              | <b>* N-D</b>                            | 130 ppb               | <b>NOM-022- SSA1-1993</b>                     |
| CO                 | <b>13</b> (ppm/v)                      | No medido                               | <b>0.4</b>                              | 11 ppm                | <b>NOM-021- SSA1-1993</b>                     |
| O <sub>3</sub>     | <b>No medido</b>                       | No medido                               | <b>2.72</b>                             | 110 ppb               | <b>NOM-020- SSA1-1993</b>                     |

Figura 15. Tabla. Tomada del “Plan de Manejo para el uso de aceites usados como combustible en los hornos para la producción de ladrillos, tabiques y tejas de arcilla no refractarios”. Registro SEMARNAT 07-PMR-IV-0005-2007. Gómez (2011).

3.3.3 Cálculo de la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en un horno de ladrillo, por el uso de Biogás como combustible.

Recordando que el proceso de purificación del Biogás mencionado en este proyecto de investigación tiene el objetivo de que el Biogás contenga Metano (CH<sub>4</sub>) en más del 95% de su volumen, entonces podríamos afirmar que el comportamiento del combustible purificado (Biogás) será muy similar al del hidrocarburo (Metano).

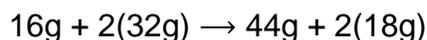
Con esta consideración, podemos hacer inferencias sobre la cantidad de Dióxido de Carbono generada en un horno de ladrillo al utilizar Metano (CH<sub>4</sub>) como combustible.

Para estos fines, tenemos que basarnos en la Reacción de combustión del Metano, la cual establece lo siguiente:



En esta reacción, una molécula de Metano reacciona con dos moléculas de Oxígeno para dar una molécula de Dióxido de Carbono y dos moléculas de agua.

Ahora, con base en los pesos moleculares, se establece lo siguiente:



Entonces si queremos saber la cantidad de Dióxido de Carbono generada por 1 kg (1,000 gramos) de Metano, realizamos el siguiente balanceo:



Por lo tanto, si se usan 1,000 gramos de Metano ( $\text{CH}_4$ ) se generan 2,750 gramos de  $\text{CO}_2$ .

Una vez que se conozca la cantidad requerida de Biogás para operar un horno de ladrillo, en la sección de resultados de esta trabajo, se podrá determinar el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) generado.

---

## 4. RESULTADOS

En este capítulo, se presenta cada uno de los resultados obtenidos durante este proyecto de investigación. Primeramente se muestran los datos generados por la evaluación del biodigestor instalado y puesto en marcha, posteriormente se muestran los resultados del módulo construido para purificar y comprimir el biogás que se generó en el biodigestor; y finalmente, se muestran los cálculos de inferencias de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) que se obtuvieron al comparar el uso de leña y el probable uso de biogás en la operación de un horno de ladrillo típico de la región.

### 4.1 Implementación y evaluación de un digestor anaeróbico alimentados por excretas de ganado vacuno para generar biogás.

Para fines prácticos y experimentales, la opción de instalar el biodigestor en el Rancho Nueva Esperanza como se había planeado, fue desechada; por lo que, se optó por rehabilitar un Biodigestor fuera de operación (Figura 16), ubicado en la ciudad universitaria de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, cuya ubicación se encuentra en el Libramiento Norte Poniente Número 1150, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; México.



Figura 16. Biodigestor instalado dentro de la UNICACH, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Fotografía, Gómez (2013).

El biodigestor evaluado, es el denominado DM-1 (Farrera, 2011), el cual fue rehabilitado y puesto en operación, bajo las condiciones climatológicas de ciudad universitaria de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, las cuales son las mismas que existen en el rancho Nueva Esperanza, debido a que la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en donde se encuentra la Universidad, comparte el clima con el municipio de Chiapa de Corzo, lugar de ubicación del rancho (INEGI, 2010). Esto con el objeto de darle certeza a los cálculos de producción de biogás realizados en el capítulo anterior de metodología. Debido a que como se mencionó en el marco teórico, la temperatura ambiental juega un papel muy importante en la producción de biogás.

---

---

#### 4.1.1 Procedimiento de Operación del Sistema de Producción de Biogás.

En esta sección se describe la metodología llevada a cabo para la producción de Biogás, el cual será utilizado para las pruebas relativas a este proyecto de investigación.

Se utilizó el biodigestor rígido DM-1 (Farrera, 2011), instalado en la Ciudad Universitaria de la Universidad y Ciencias de Artes de Chiapas, pero alimentado con excremento llevado desde el Rancho Nueva Esperanza, de acuerdo al problema planteado originalmente:

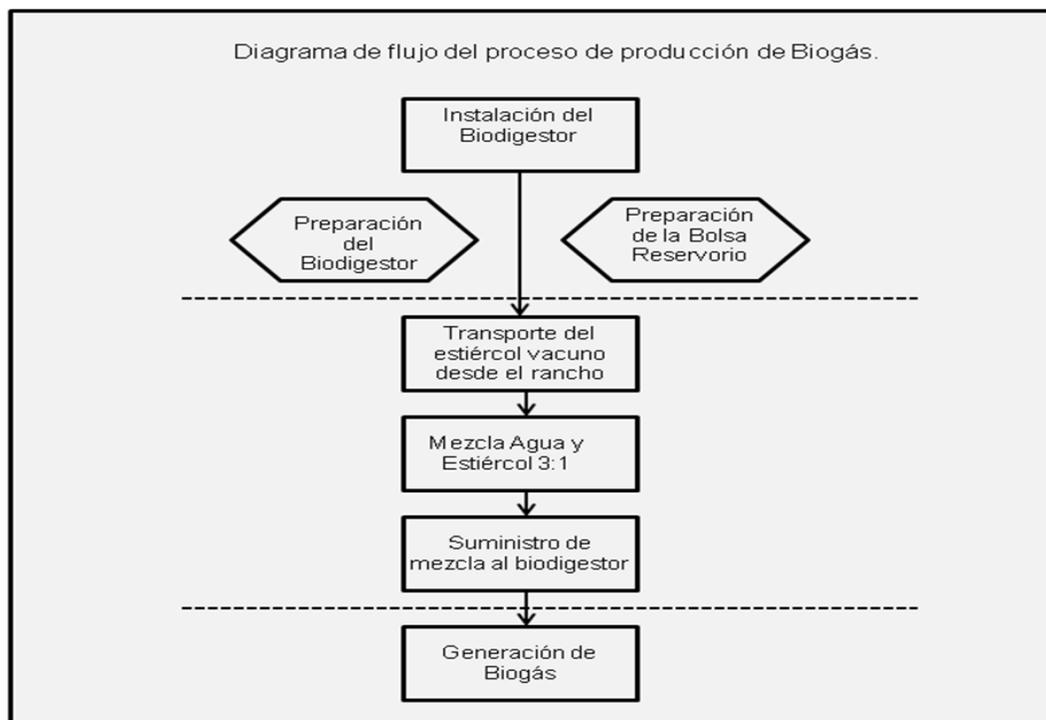


Figura 17. Proceso de producción de Biogás. Diagrama, Gómez (2013).

---

---

El proceso de producción de biogás (Figura 17), inició con la rehabilitación del biodigestor rígido, previamente instalado en la Unicach, por lo que se realizaron los trabajos pertinentes para sujetar el sistema de homogenización y para sellar herméticamente la cubierta (Figura 18). También se hicieron los trabajos para colocar la bolsa reservorio con capacidad de 3.5 m<sup>3</sup> fabricada con geomembrana (Figura 19).



Figura 18. Biodigestor dentro de la UNICACH, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Fotografías, Gómez (2013).



Figura 19. Bolsa de geomembrana de 3.5 m<sup>3</sup>. Fotografía, Gómez (2013).

Posteriormente se procedió a elaborar la mezcla de alimentación del biodigestor, utilizando estiércol vacuno procedente del Rancho Nueva Esperanza (Figura 20). Por lo que se fueron realizando las mezclas utilizando cubetas con capacidad de 20 L, utilizando la proporción de 3 de agua por 1 de estiércol (3:1), para ir vaciando la mezcla al interior del biodigestor a través de la tubería instalada para tal fin (Figura 21).



Figura 20. Estiércol procedente del rancho Nueva Esperanza. Fotografías, Gómez (2013).



Figura 21. Vaciado de la mezcla de estiércol con agua, dentro del biodigestor. Fotografía, Gómez (2013).

Una vez que se hubieron vaciado 300 L de estiércol, con 900 L de agua dentro del biodigestor, se procedió a terminar el proceso de alimentación. Y a partir de ahí, cada tercer día se realizaba el proceso de homogenización de la mezcla, utilizando el sistema instalado para tal fin. De tal forma que se fueron tomando mediciones del volumen generado de biogás, y al llenarse la bolsa de geomembrana de 3.5 m<sup>3</sup> de capacidad (Figura 22), se desinstaló, y se transportó al laboratorio de ingeniería, para las pruebas posteriores.



Figura 22. Bolsa de geomembrana con biogás, capacidad 3.5 m<sup>3</sup>. Fotografía, Gómez (2013).



Figura 23. Bolsa de geomembrana llena de biogás. Capacidad 1.5 m<sup>3</sup>. Fotografía, Gómez (2013).

En total, para las mediciones de Biogás se utilizaron dos bolsas reservorio de Geomembrana. La primera con una capacidad de 3.5 m<sup>3</sup> y la segunda de 1.5 m<sup>3</sup> (Figura 23).

---

#### 4.1.2 Resultados de producción de Biogás

Finalmente se presentan los resultados obtenidos, debido a la operación del biodigestor:

Se realizaron cuatro recargas al biodigestor utilizando una proporción de 3 medidas de agua por 1 de estiércol (3:1), y se tomó la cantidad de producción de biogás generada a los 7 días después de cada recarga, obteniéndose los siguientes datos:

| Producción de Biogás en el Biodigestor Rígido DM-1 |  |                                     |  |
|--|--|-------------------------------------|--|
| Cantidad de Estiércol alimentados (Litros)         | Cantidad de Estiércol alimentados (Kg) | Volúmen de Biogas (m <sup>3</sup> ) | Rendimiento del Biodigestor (kg/m <sup>3</sup> ) |
| 200  | 180                                    | 3.5                                 | 0.0194   |
| 200  | 180                                    | 5.0                                 | 0.0277   |
| 100  | 90                                     | 3.5                                 | 0.0388   |
| 100  | 90                                     | 3.5                                 | 0.0388   |
|  |  | <b>Promedio de Producción</b>       | <b>0.0311 (m<sup>3</sup>/kg)</b>                 |

Cuadro 5.- Producción de Biogás en el Biodigestor Rígido DM-1

---

---

## 4.2 Construcción e implementación del Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás.

Esta sección corresponde a la parte esencial de esta tesis, pues describe el desarrollo tecnológico que se llevó a cabo para la construcción de un módulo portátil de acondicionamiento y presurizado de Biogás, innovador en México y con grandes ventajas competitivas por su tamaño, costo y desempeño, con relación a los existentes a nivel internacional.

Primeramente se presentan las especificaciones y características técnicas del diseño mecánico del módulo, en esta sección se detallan cada uno de los elementos que integran al sistema completo. Posteriormente, se cuenta con una memoria fotográfica del módulo, con imágenes captadas de diferentes ángulos, esto con el objeto de dar a conocer cada uno de los detalles del sistema. Después de manera general, se relatan las pruebas de funcionamiento del sistema de purificación y compresión, para después mostrar los resultados del desempeño del sistema, en términos de presión alcanzada, masa de biogás almacenada en los tanques metálicos; así como, la medición de la energía eléctrica consumida, durante el proceso completo de purificación y almacenamiento presurizado del biogás. Finalmente, se realizaron cálculos del potencial calorífico del biogás, usando otro gas con capacidad calorífica

---

---

conocida como referencia. Para concluir, con la determinación de la capacidad de producción y almacenamiento real del biogás, en tanques metálicos convencionales.

#### 4.2.1 Descripción del Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás

En esta sección, se presenta el Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás (Figura 23 y 24), el cuál como se mencionó anteriormente, está diseñado para purificar el biogás a concentraciones mínimas de 95% de Metano ( $\text{CH}_4$ ) y a presurizar al combustible en tanques metálicos a una presión máxima de  $38 \text{ kg/cm}^2$ .

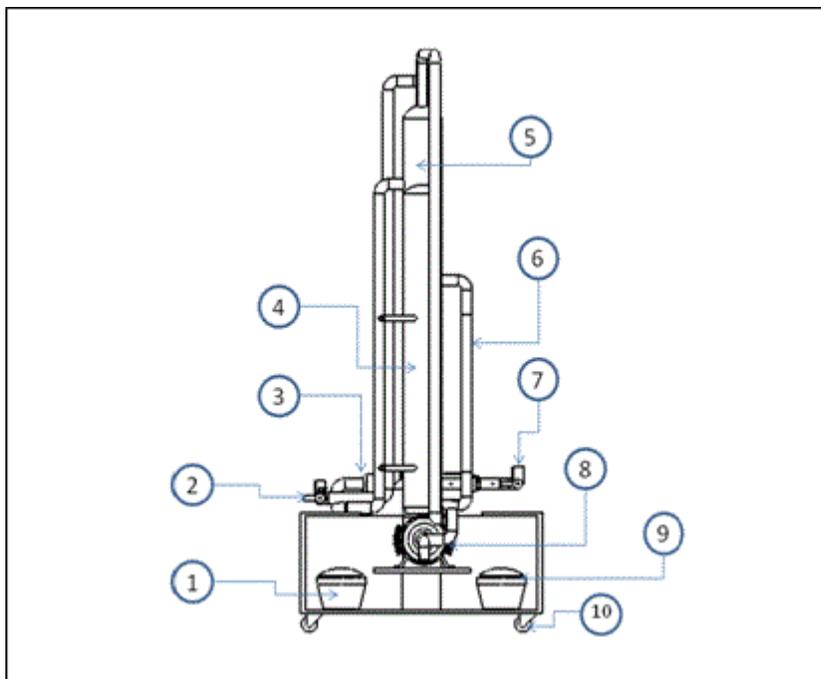


Figura 23. Vista frontal del Módulo. Diseño, Gómez (2012).

En las figuras 23, 24 y 25 encerrados en círculos, se encuentran números, los cuales deberán servir de referencia para detectar en la siguiente tabla (Cuadro 6), el nombre de cada uno de los elementos señalados por dicho sistema:

|   |  |    |  |
|---|--|----|--|
| 1 | Compresor 1 capacidad 0.25 W (0.25 H.P.)       | 8  | Bomba de Agua de capacidad de 0.5 W (0.5 H.P.) |
| 2 | Válvula de entrada de biogás                   | 9  | Compresor 2 capacidad 0.5 W (0.5 H.P.)         |
| 3 | Filtro de Humedad                              | 10 | Llantas para desplazamiento del equipo         |
| 4 | Filtro Seco                                    | 11 | Indicador de Presión                           |
| 5 | Filtro Húmedo                                  | 12 | Indicador de Temperatura                       |
| 6 | Indicador de Nivel de Agua en el Filtro Húmedo | 13 | Indicador de Temperatura                       |
| 7 | Válvula de salida de biogás purificado         | 14 | Indicador de Presión                           |

Cuadro 6.- Especificaciones del módulo de acondicionamiento y presurizado

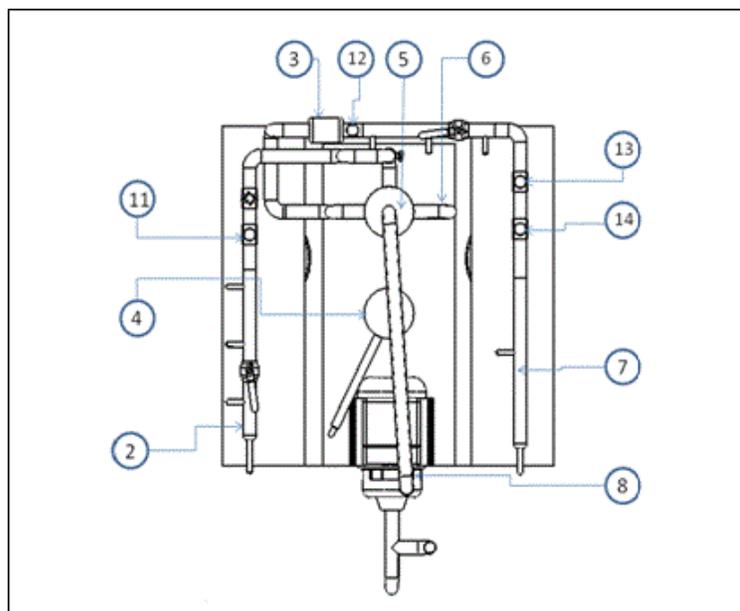


Figura 24. Vista superior del módulo. Diseño, Gómez (2012).

---

El módulo portátil de acondicionamiento y presurizado de biogás, es un sistema de bajo costo, compacto, ligero y de fácil manejo para su transporte hacia los sistemas de producción de biogás, integra en menos de 2 m<sup>2</sup> dos sistemas de acondicionamiento de biogás y un sistema de compresión que permite almacenar biogás presurizado en tanques convencionales de gas L.P. El módulo portátil de acondicionamiento y presurizado de biogás está diseñado para succionar el biogás desde el biodigestor, posteriormente hacerlo pasar por el sistema de filtrado; para finalmente, presurizarlo en tanques convencionales de gas. Debido a la naturaleza compacta del módulo, el cual tiene dimensiones de 1.10 m de largo, 0.75 m de ancho y 1.86 m de altura y con un peso de 90 kg; se puede transportar directamente a la zona de producción del biogás, debido a que cuenta con ruedas (10), que permiten el fácil desplazamiento por arrastre del equipo. Una vez que el equipo se encuentra alimentado con energía eléctrica de 120 volts contiguo al biodigestor, se conecta mediante manguera convencional de gas LP a la válvula de entrada de biogás (2), la cual a su vez está conectada a la válvula de succión del compresor de 0.5 W (1), quien fuerza al biogás desde el biodigestor, a pasar por el filtro seco (4), el cual tiene en su interior virutas de acero tratadas convertidas en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Oxido Férrico) que reacciona rápidamente con el Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) formando Sulfuro Férrico (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>). Este filtro lleva de una concentración promedio de 60 ppm de Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) a menos de 10 ppm. La válvula de salida del compresor de 0.5 W (1) está conectada a una de las salidas de la válvula de entrada de biogás (2), la cual

---

---

a su vez se conecta a un tanque metálico en donde se realiza el primer proceso de compresión, almacenando el biogás que todavía contiene Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) y Humedad. Una vez que el primer tanque metálico, se ha llenado, lo cual se verifica a través del indicador de presión 1 (11) instalado en la tubería principal, el biogás comprimido se libera y se hace pasar por el filtro húmedo (5), el cual utiliza agua a presión en filtro de columna, en donde el agua es aplicada desde la parte superior impulsada por una bomba convencional de agua de 0.5 W (8), y por la parte inferior se suministra el biogás, lo que ocasiona burbujeo en la solución que absorbe el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), la cantidad de agua suministrada se monitorea con el indicador de nivel (6) instalado en este filtro húmedo (5). Con este proceso de purificación y acondicionamiento de biogás mediante absorción por agua a presión, se obtienen concentraciones de por lo menos 95% de Metano ( $\text{CH}_4$ ) en el Biogás. Posteriormente, el biogás se hace pasar por el filtro de humedad (3), el cual captura el agua que pudiera contener el biogás ya purificado. Sobre la misma tubería en donde se encuentra instalado el filtro de humedad (3), se tiene instalado el termómetro 1 (12), el cual tiene la función de monitorear la temperatura del biogás antes de entrar a la válvula de succión del compresor de 1 W(9), el cual toma el biogás con un contenido de Metano de por lo menos del 95%, y lo hace pasar por la válvula de salida (7) conectada a un tanque convencional de gas L.P., en donde finalmente se almacena el biogás a una presión máxima de  $38 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual se verifica mediante el indicador de presión 2 (14), instalado a un costado del

---

---

termómetro 2 (13) el cual también funciona para monitorear la temperatura de trabajo.

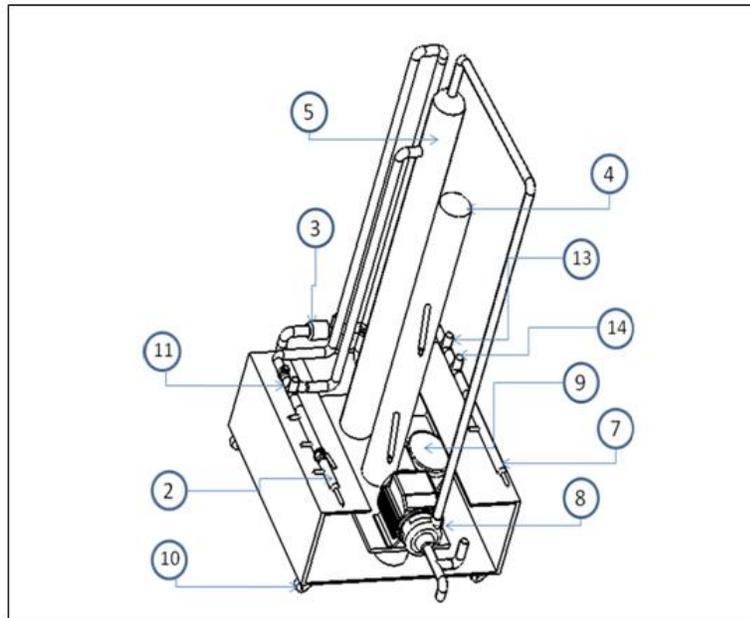


Figura 25. Vista isométrica del módulo. Diseño, Gómez (2012).

#### 4.2.2 Memoria fotográfica del módulo de acondicionamiento y presurizado de biogás.

En esta sección, se muestran algunas fotografías del módulo construido, con el objeto de evidenciar, cada uno de los elementos físicos que integran el módulo completo de acondicionamiento y presurizado de biogás. La mayor parte del sistema está construido con material de PVC hidráulico y material de cobre (Cu).

---

En las figuras 26 y 27, se muestran fotografías de la parte frontal del sistema, en donde se pueden observar ambos compresores, la bomba de agua, etc.



Figura 26. Vista frontal del módulo construido. Fotografía, Gómez (2013).



Figura 27. Vista frontal del módulo construido (2). Fotografía, Gómez (2013).

La figura 28, muestra una vista frontal inferior del módulo construido, en donde claramente se puede observar la distribución de los compresores, de la bomba de agua y de las conexiones.

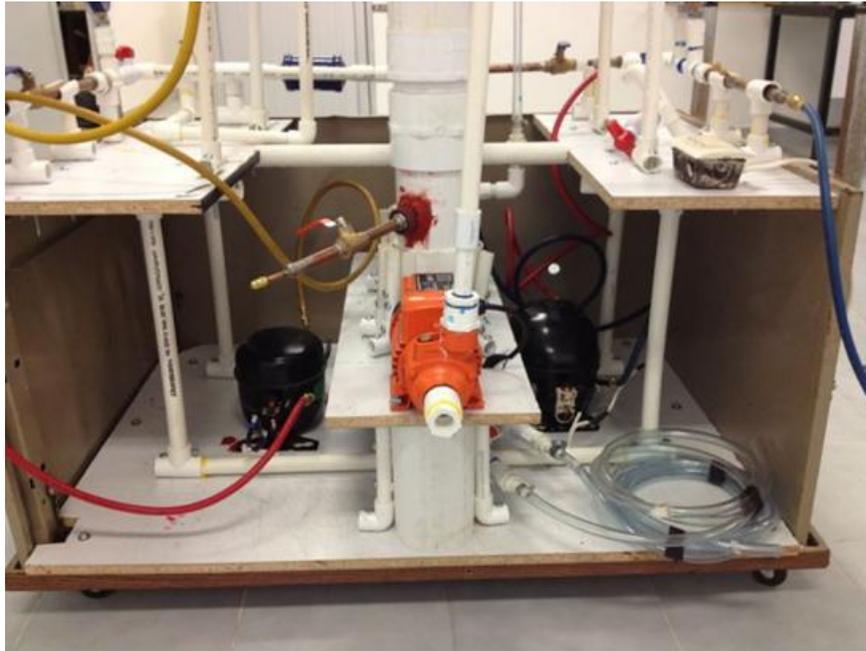


Figura 28. Vista frontal inferior del módulo construido. Fotografía, Gómez (2013).

La figura 29, muestra el equipo totalmente terminado, debido a que una vez que se hubo probado el funcionamiento correcto del mismo, se procedió a pintar el equipo, utilizando 3 colores para distinguir algunas características del mismo.

El color amarillo se utilizó para denotar la tubería por donde pasaría el biogás. El color verde indica la tubería por donde pasa el agua para lavado del biogás. Y el resto del equipo se pintó de blanco.

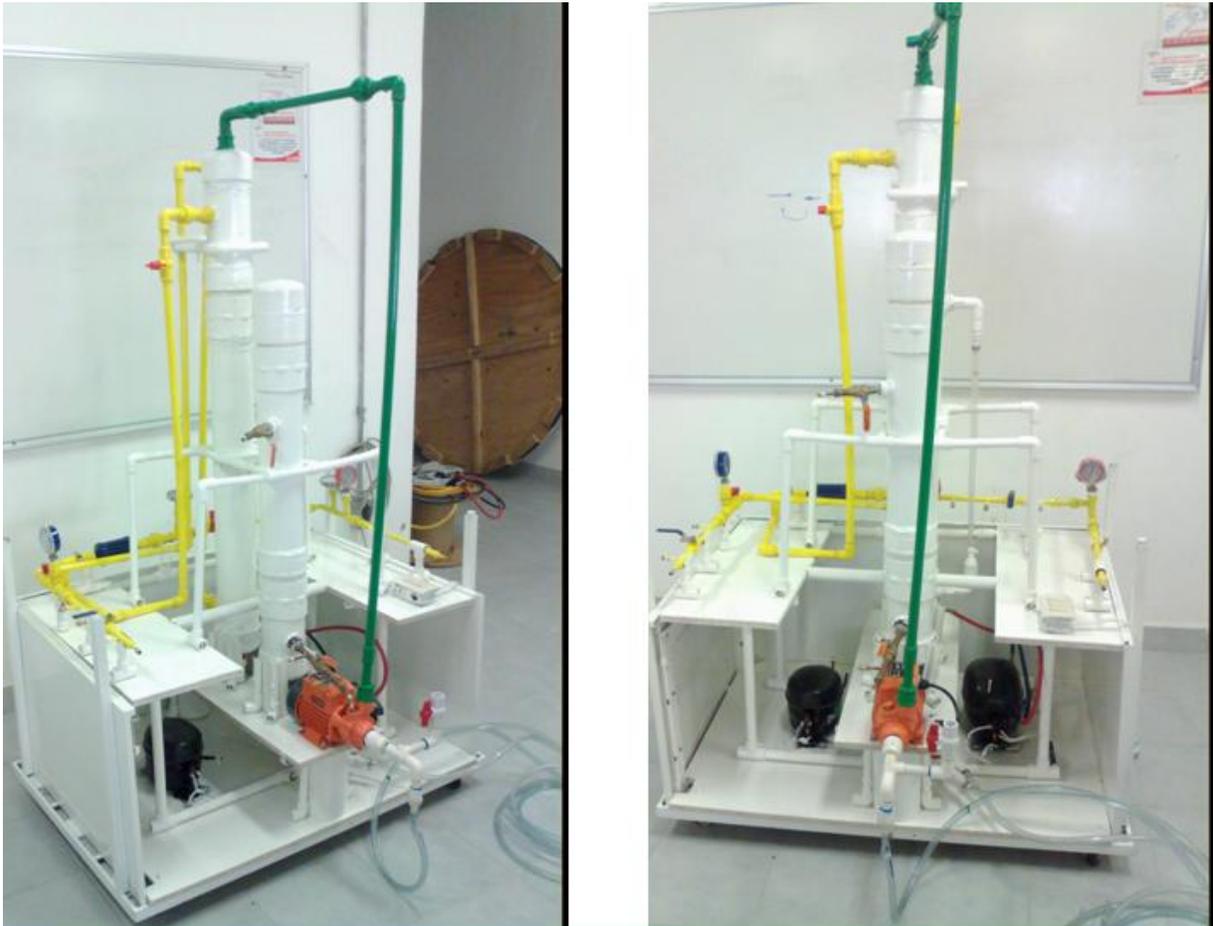


Figura 29. Vistas del módulo construido y pintado. Fotografía, Gómez (2013).

Posteriormente, el sistema completo se trasladó al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), en donde se instaló de manera temporal, para poder concluir con las pruebas. (Figura 30).



Figura 30. Vista del módulo construido instalado en la UNICACH, Fotografía, Gómez (2013).

---

#### 4.2.3 Proceso de purificación y compresión de Biogás.

En esta sección se describen las pruebas y los resultados obtenidos durante el proceso de purificación y presurizado de biogás. De manera general se relatan las pruebas de funcionamiento del equipo y los resultados obtenidos.

Primeramente la bolsa de 3.5 m<sup>3</sup> de geomembrana llena de Biogás extraído directamente del biodigestor, se llevó al laboratorio y se conectó a la válvula de entrada del filtro seco del módulo (Figura 31).



Figura 31. Bolsa de geomembrana instalada al módulo de acondicionamiento y presurizado de biogás. Fotografía, Gómez (2013).

---

Posteriormente, una vez instalado todo el equipo se enciende el compresor de 0.25 W de capacidad, el cual empieza a succionar el biogás desde la parte superior del filtro seco, forzando al biogás a pasar por el sistema de filtración de Ácido Sulfhídrico ( $H_2S$ ), consistente el Óxido de Hierro ( $Fe_2O_3$ ) para posteriormente comprimir el biogás en el primer tanque a una presión de 110 psi (7,73 kg/cm<sup>2</sup>). (Figura 32).



Figura 32. Módulo para acondicionamiento y presurizado en operación. Fotografía, Gómez (2013).

---

La presión y la masa se podían constatar a través de instrumentos de medición, diseñados para tal fin. (Figuras 33 y 34).



Figura 33. Manómetro (medidor de presión) con el equipo en operación. Fotografía, Gómez (2013).



Figura 34. Báscula (medidor de masa) con el equipo en operación. Fotografía, Gómez (2013).

---

Posteriormente, se apaga el compresor de 0.25 W, y se enciende la bomba de agua (Figura 35), la cual empieza a recircular el líquido a través del filtro húmedo, el cual debe eliminar el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ).



Figura 35. Sistema en funcionamiento, purificación y compresión. Fotografía, Gómez (2013).

---

El nivel del agua se debe mantener en equilibrio, es decir; se debe mantener a un nivel aproximado a la mitad del filtro húmedo, debido a que en ese momento se iguala la cantidad de agua que entra contra la que sale. Cuando se logra este estado, se abre la válvula del tanque que contiene comprimido el Biogás que todavía contiene Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), y se enciende el compresor de 0.5 W. Este compresor es el que comprime el Biogás ya purificado en el tanque 2. Para fines de estas pruebas se llenó el tanque a una presión máxima de 235 psi ( $16.52 \text{ kg/cm}^2$ ).

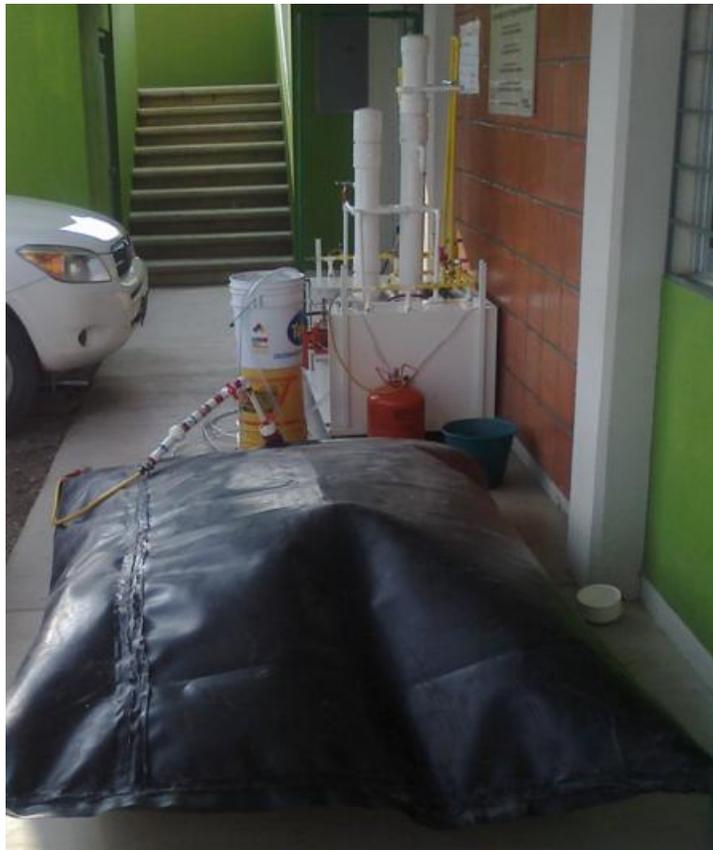


Figura 36. Sistema en funcionamiento, purificación y compresión. Fotografía, Gómez (2013).

---

Durante el proceso de compresión final (Figura 36), como se mencionó anteriormente, se realizaron medidas de presión y de peso del biogás dentro del tanque (Figuras 37 y 38), utilizando manómetros y una báscula digital. Esto se realizó con el objetivo de poder determinar la relación entre la presión y la masa contenida en el tanque.



Figura 37. Mediciones de peso con el equipo en operación. Fotografía, Gómez (2013).



Figura 38. Mediciones de peso con el equipo en operación. Fotografía, Gómez (2013).

---

#### 4.2.4 Resultados del desempeño del módulo de acondicionamiento y presurizado de Biogás.

Para poder comprender mejor los resultados obtenidos, con relación a la presión y al peso de biogá almacenado, se realizaron algunos análisis utilizando software de estadística industrial. Por lo que a continuación, se muestran los resultados obtenidos (Figura 39):

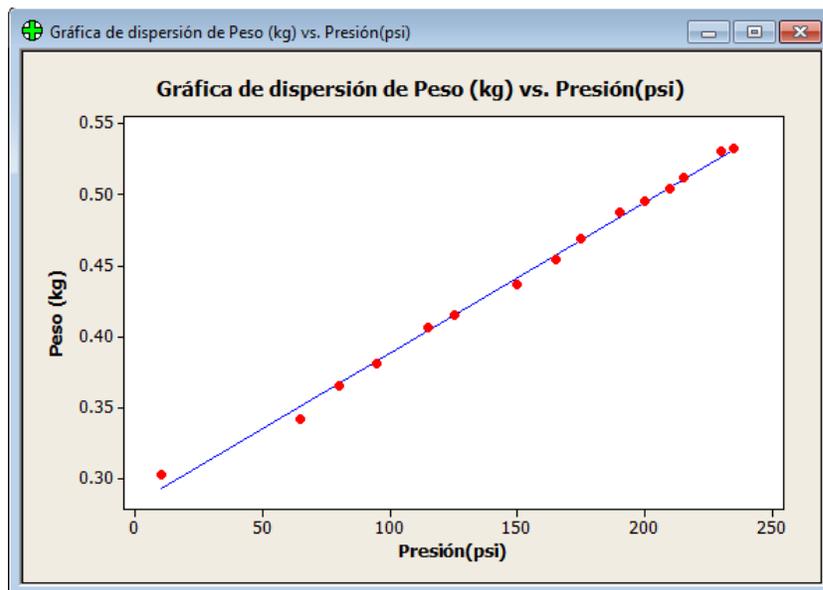
| ↓  | C1           | C2        |  |
|----|--------------|-----------|--|
|    | Presión(psi) | Peso (kg) |  |
| 1  | 10           | 0.303     |  |
| 2  | 65           | 0.342     |  |
| 3  | 80           | 0.365     |  |
| 4  | 95           | 0.381     |  |
| 5  | 115          | 0.406     |  |
| 6  | 125          | 0.415     |  |
| 7  | 150          | 0.437     |  |
| 8  | 165          | 0.454     |  |
| 9  | 175          | 0.469     |  |
| 10 | 190          | 0.487     |  |
| 11 | 200          | 0.495     |  |
| 12 | 210          | 0.504     |  |
| 13 | 215          | 0.512     |  |
| 14 | 230          | 0.530     |  |
| 15 | 235          | 0.532     |  |

Figura 39.- Tabla de presión contra peso durante la operación del módulo. Gómez (2013).

---

Con los datos de presión y temperatura, utilizando el software MINITAB 16, se determinó la ecuación de regresión y se obtuvieron los gráficos correspondientes (Figura 40):

$$\text{Peso (kg)} = 0.282 + 0.00106 \text{ Presión (psi)}; \text{ con } R^2 = 99.6\%.$$



**Análisis de regresión: Peso (kg) vs. Presión(psi)**

La ecuación de regresión es  
Peso (kg) = 0.282 + 0.00106 Presión(psi)

| Predictor    | Coef       | SE Coef    | T     | P     |
|--------------|------------|------------|-------|-------|
| Constante    | 0.282114   | 0.002917   | 96.72 | 0.000 |
| Presión(psi) | 0.00106208 | 0.00001778 | 59.72 | 0.000 |

S = 0.00446351    R-cuad. = 99.6%    R-cuad. (ajustado) = 99.6%

Figura 40. Tabla y Ecuación de Regresión Lineal obtenida (software, Minitab 16).

---

---

Donde se observa que, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es alto (99.6%), lo que significa que el modelo se ajusta a los datos extremadamente bien, por lo tanto al usar la ecuación de regresión para predecir el peso de biogás a presiones dadas, los resultados serán confiables.

También se realizaron otras mediciones, como la potencia eléctrica consumida por el equipo en operación, mediciones de la temperatura de trabajo, y además se midió el tiempo promedio que se requiere para purificar y comprimir 0.500 kg de biogás.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

|                                       |                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Volumen del tanque                    | 10 L                                |
| Presión Máxima alcanzada              | 235 psi (16.52 kg/cm <sup>2</sup> ) |
| Masa de biogás contenida en el tanque | 0.532 kg                            |
| Temperatura Inicial de trabajo        | 30 ° C                              |
| Temperatura Final de trabajo          | 35 ° C                              |
| Tiempo total de proceso               | 35 min.                             |
| Potencia eléctrica consumida          | 720 W                               |

Cuadro 7.- Resultados del proceso de acondicionamiento y presurizado de biogás.

---

---

Por lo tanto, con los resultados anteriores se calculó el costo de la energía eléctrica requerida para purificar y comprimir 0.532 kg de Biogás, a través de las siguientes relaciones:

$$\text{Tiempo de Operación (TO)} = (35 \text{ min} \times 1 \text{ h}) / 60 \text{ min} = 0.583 \text{ h}$$

$$\text{Consumo de Energía Eléctrica (CE)} = (720 \text{ Watt} \times 0.583 \text{ h} \times 1 \text{ kW}) / 1000 \text{ Watt}$$

$$\text{Consumo de Energía Eléctrica (CE)} = 0.42 \text{ kWh}$$

Por lo tanto el Consumo de Energía Eléctrica por Kilogramo de Biogás ( $CE_{\text{kg Biogás}}$ ) se obtiene por la regla de proporcionalidad simple:

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $(CE_{\text{kg Biogás}}) =$ | $(1 \text{ kg} \times 0.42 \text{ kWh}) / .532 \text{ kg} = 0.78 \text{ kWh}$ |
|-----------------------------|---|

#### Cuadro 8.- Consumo de Energía Eléctrica

Y si el costo de la Energía Eléctrica suministrada por Comisión Federal de Electricidad en México en Agosto de 2013 es de \$ 0.75/ kWh, entonces:

|   |  |
|---|--|
| Costo de Purificar y Comprimir un kilogramo de Biogás = | $0.78 \text{ kWh} \times (\$ 0.75 / \text{Kwh}) =$<br>$\$ 0.585 \text{ (Pesos Mexicanos)}$ |
|---|--|

#### Cuadro 9.- Costo de Purificar y Comprimir Biogás (pesos mexicanos).

---

---

Además, si el costo del dólar americano en pesos mexicanos en Agosto de 2013 es de \$13.18, entonces:

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Costo de Purificar y Comprimir un kilogramo de Biogás = | \$ 0.044 Dólares Americanos |
|---|-----------------------------|

Cuadro 10.- Costo de Purificar y Comprimir Biogás (dólares americanos)

#### 4.2.5 Cálculo del Potencial Calorífico del Biogás purificado y presurizado

Finalmente, una vez que se tuvieron varios tanques llenos de biogás , se realizaron pruebas del mismo en una parrilla convencional de gas L.P., esto con el objeto de comprobar de manera experimental la purificación del biogás. Por lo que con simple observación de la llama se debería notar que, en caso de contener todavía Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) la llama sería muy baja y de diversos colores, y si le hubiera quedado Ácido Sulfhídrico tendría un olor fuerte al quemarse.

Finalmente al hacer las pruebas de combustión del biogás, se empezaron a obtener llamas intensas de color azul (Figuras 41, 42 y 43); esto, daba señales cualitativas de que el biogás, había sido purificado y por lo tanto, contenía un gran porcentaje de de metano.



Figura 41. Equipo de trabajo de investigación del programa de Desarrollo Sustentable de la UNICACH, de izquierda a derecha. Dr. Neín Farrera, Ing. Luis A. Vázquez, Mtro. César Gómez.



Figura 42. Flamas de Biogás purificado y comprimido. Fotografía, Gómez (2013).

---



Figura 43. Flama obtenida con el Biogás purificado y comprimido. Fotografía, Gómez (2013).

Sin embargo, para poder realizar aseveraciones científicas sobre el grado de purificación del biogás, se llevó a cabo un experimento para medir de manera indirecta el Potencial Calorífico del Biogás, de tal forma que con los resultados obtenidos, podríamos inferir el porcentaje de metano contenido en el biogás, al compararlo con el potencial calorífico del metano puro (9,500 kcal/kg).

Esta experimentación se llevó a cabo usando el usando el método propuesto por Martina et al (2006), comparando la transferencia de calor del gas licuado del petróleo con poder calorífico conocido (10,900 kcal/kg), contra la transferencia de

---

calor debida a la combustión del biogás, al calentar un litro de agua con ambos combustibles en iguales condiciones de presión, masa y tiempo de calentamiento:

A. Mediciones del calentamiento de un litro de agua con biogás

A continuación, se presentan las mediciones de temperatura contra tiempo en el calentamiento de un litro de agua con biogás (Cuadro 11):

| Tiempo (min) | Temperatura (°C) |
|--------------|------------------|
| 0            | 22               |
| 2            | 25.5             |
| 4            | 37               |
| 6            | 41.2             |
| 8            | 48               |
| 10           | 57               |
| 12           | 61               |
| 14           | 63               |
| 16           | 67               |
| 18           | 72               |

Cuadro 11.- Temperatura contra tiempo al calentar biogás

Con los datos de temperatura y tiempo, se determinó la ecuación de regresión:

$$\text{Temperatura (°C)} = 2.845 \text{ tiempo} + 23.76 ; \text{ con } R^2 = 97.4\%.$$

---

Donde se observa que, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es alto (97.4%), lo que significa que el modelo se ajusta a los datos extremadamente bien, por lo tanto al usar la ecuación de regresión para predecir la temperatura del agua a en un tiempo determinado, los resultados serán confiables (Figura 44).

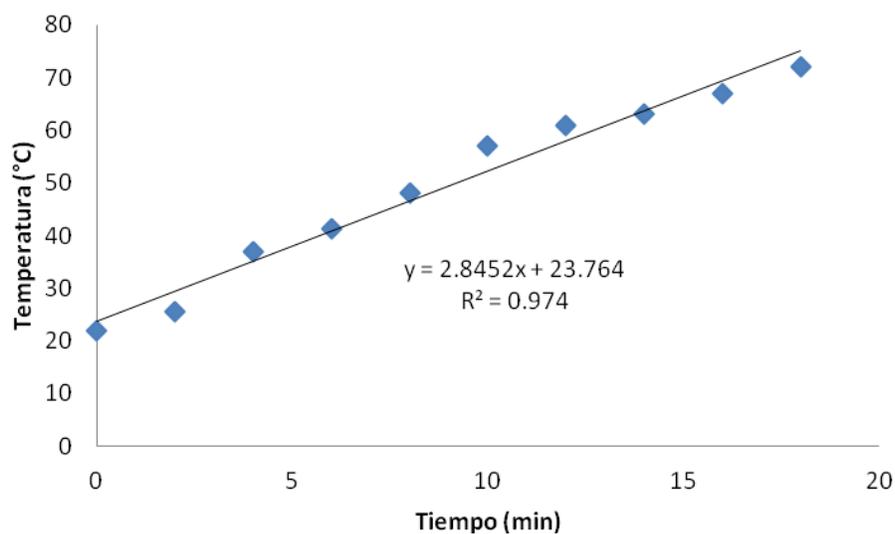


Figura 44. Grafica de temperatura contra tiempo. Gómez (2013).

#### B. Determinación del Potencial Calorífico del biogás

De acuerdo a Martina et al (2006), para calcular el potencial calorífico del biogás, debemos utilizar las siguientes ecuaciones:

---

$$Q_G = (PC_{\text{GAS L.P.}}) \times (\text{masa}_{\text{GAS L.P.}})$$

$$Q_{G,\text{Agua}} = \text{masa}_{\text{agua}} \times C_{e,\text{agua}} \times \Delta T$$

$$\text{Rend}_{\text{GAS L.P.}} = Q_G / Q_{G,\text{Agua}} =$$

$$Q_{\text{Biogás, Agua}} = \text{masa}_{\text{agua}} \times C_{e,\text{agua}} \times \Delta T$$

$$Q_{\text{Biogás}} = Q_{\text{Biogás, Agua}} / \text{Rend}_{\text{GAS L.P.}}$$

$$PC_{\text{Biogás}} = Q_{\text{Biogás}} / \text{masa}_{\text{Biogás}}$$

Donde:

$\Delta T$ : Diferencial de temperatura, de la inicial del calentamiento con la final.

$Q_G$ : Calor entregado por el Gas L.P. al quemarse.

$PC_{\text{GAS L.P.}}$ : Potencial Calorífico del Gas L.P. de acuerdo a la hoja de seguridad del material.

$Q_{G,\text{Agua}}$ : Calor recibido por el agua al calentarse con el Gas L.P.

$\text{Rend}_{\text{GAS L.P.}}$ : Rendimiento del proceso de calentamiento de agua con Gas L.P.

$Q_{\text{Biogás, Agua}}$ : Calor recibido por el agua al calentarse con Biogás.

$Q_{\text{Biogás}}$ : Calor entregado por el Biogás al quemarse

$PC_{\text{Biogás}}$ : Potencial Calorífico del Biogás.

Por lo tanto, con los datos de la temperatura y de tiempo medidos al calentar un litro de agua con ambos combustibles (biogás y gas L.P.), se obtiene la siguiente tabla:

|                                     | masa (kg) | $\Delta T$ (°C) | tiempo (min) | Potencial Calorífico (Kcal/kg) |
|-------------------------------------|-----------|-----------------|--------------|--------------------------------|
| Biogás                              | 0.013     | 50              | 8            | Desconocido                    |
| Gas Licuado del Petróleo (Gas L.P.) | 0.014     | 65.3            | 8            | 10,907.14                      |

Cuadro 12.- Calentamiento de un litro de agua (Gas L.P. y Biogás).

Por lo tanto, usando las ecuaciones de calor referidas anteriormente, se realizan los siguientes cálculos:

$$Q_G = (PC_{\text{GAS L.P.}}) \times (\text{masa}_{\text{GAS L.P.}}) = (10,907.14 \text{ kcal/kg}) \times 0.014 \text{ kg} = 152.7 \text{ kcal}$$

$$Q_{G,\text{Agua}} = \text{masa}_{\text{agua}} \times C_{e,\text{agua}} \times \Delta T = 1 \text{ kg} \times (1 \text{ kcal/kg}) \times 65.3 \text{ °C} = 65.3 \text{ kcal}$$

$$\text{Rend}_{\text{GAS L.P.}} = Q_G / Q_{G,\text{Agua}} = 42.8\%$$

$$Q_{\text{Biogás, Agua}} = \text{masa}_{\text{agua}} \times C_{e,\text{agua}} \times \Delta T = 1 \text{ kg} \times (1 \text{ kcal/kg}) \times 50 \text{ °C} = 50 \text{ kcal}$$

$$Q_{\text{Biogás}} = Q_{\text{Biogás, Agua}} / \text{Rend}_{\text{GAS L.P.}} = 50 \text{ kcal} / 0.428 = 116.91 \text{ kcal}$$

$$PC_{\text{Biogás}} = Q_{\text{Biogás}} / \text{masa}_{\text{Biogás}} = 8,993.67 \text{ kcal/kg}$$

---

Entonces, con este método obtenemos un Potencial Calorífico del Biogás de:

|                      |                  |
|----------------------|------------------|
| $PC_{\text{BIOGÁS}}$ | 8,993.67 kcal/kg |
|----------------------|------------------|

Cuadro 13.- Potencial Calorífico del Biogás calculado

Lo que significa, que el biogás purificado contiene por lo menos un 94.73% de Metano ( $\text{CH}_4$ ) debido a que el potencial calorífico del metano puro es de 9,500 kcal/kg;

#### 4.2.6 Capacidad de producción y almacenamiento de Biogás

Con base en los resultados obtenidos en el punto 4.1.2 en donde se calculó una capacidad de producción de biogás del biodigestor de 0.0311 m<sup>3</sup>/kg, y si sabemos que se tendrá un total de estiércol aprovechable de:

$$\text{TEA}=1,658 \text{ kg/día}$$

Entonces la producción diaria de biogás será de 51.4 m<sup>3</sup>/día (5,140 L/día), del cual por lo menos el 60% del volumen total es metano (3,084 L/día).

Sin embargo, esa cantidad de metano, se encuentra a presión atmosférica y tiene que ser comprimida en un tanque estacionario de 10,000 L para su transporte, por lo

---

---

que para calcular la cantidad de masa de metano (CH<sub>4</sub>) presurizada en el tanque, debemos hacer las consideraciones siguientes:

Primero determinamos el peso molecular del biogás purificado y presurizado con el sistema mencionado anteriormente, y posteriormente con el resultado obtenido, se calcula la cantidad de masa de Biogás que se tendría en un tanque de almacenamiento de mayor tamaño.

Ley de los Gases Ideales (Cengel, 2009):  $PVM=mRT$

Donde:

P: Presión de trabajo en el tanque =235 psi=15.98 atm

V: Volumen del tanque: 10 L

T: Temperatura de trabajo=35°C=308°K

R: Constante de los gases= 0.0821 L.(atm/mol).°K

m: masa ocupada por el metano: 0.532 kg

M: Peso Molecular del Biogás Purificado= Desconocido.

$$M = \frac{308^{\circ}K \times 0.532 \text{ kg} \times 0.0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}}}{15.98 \text{ atm} \times 10 \text{ L}} = 84.16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Con el dato calculado del peso molecular del biogás purificado (84.16 g/mol) y con la misma ley de los gases ideales pero cambiando el volumen del tanque, podemos

---

---

determinar la cantidad de masa de biogás presurizado que tendríamos en un tanque metálico de 10,000 L a 235 psi; la cual sería de 531.99 kg.

Por lo tanto, para contar con 1,610.5 kg la cual es la cantidad suficiente de metano para cocer 20,000 ladrillos, se requerirán de 3 días de producción de biogás en el rancho.

---

4.3 Cálculos para determinar la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) emitido por el uso de madera (leña) y de biogás como combustible en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas.

En esta última sección de resultados, se realizan algunos cálculos para obtener la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) generado por usar madera (leña) en hornos de ladrillo. Además se hacen inferencias, sobre el Dióxido de Carbono generado, en caso de que se usara el biogás purificado y comprimido, como combustible en los hornos tradicionales de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas; México.

4.3.1 Determinación de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) generado por un horno de ladrillo, usando madera (leña) como combustible.

Para la determinación de manera analítica de la cantidad de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) usando leña, tenemos que utilizar el dato presentado en el punto 3.3.1, la cual es una aproximación propuesta por Carazo (2006), de donde se determinó que:

Si se usa 1.00 kg de madera como combustible, se generarían 1.63 kg de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

---

Y si en un horno típico de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo Chiapas, se utilizan 5,517 kg de leña (Gómez et al, 2011), para cocer en promedio 20,000 piezas de ladrillo, entonces:

| Cálculos                        | Dióxido de Carbono generado por horno de leña (DCGLEña) |
|---------------------------------|---|
| $DCGLEña = 5,517 \times 1.63 =$ | 8,992.71 kg   |

Cuadro 14.- Dióxido de Carbono generado por horno de leña

#### 4.3.2 Cálculo de la cantidad requerida de Biogás para cocer un horno típico de ladrillo.

Finalmente el proyecto tiene la intención de usar el biogás como combustible alternativo en los hornos de ladrillo típicos de Chiapa de Corzo, Chiapas. De tal forma que, se disminuyan las emisiones a la atmósfera fundamentalmente de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) el principal gas de efecto invernadero.

Por lo tanto, si queremos conocer la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) que se generarían al usar biogás como combustible, primeramente necesitamos saber la cantidad de biogás requerido por un horno típico de ladrillo. Entonces utilizaremos el aceite lubricante gastado como referencia, para calcular el requerimiento energético de un horno de ladrillo, debido a que el Potencial Calorífico

---

de este combustible es conocido, así como la cantidad de este que se requiere para la cocción de ladrillo.

Entonces, si sabemos que en promedio la cantidad de aceite gastado requerida para cocer 20,000 ladrillos es de 1800 kg (Gómez et al, 2011), y que el aceite gastado tiene un potencial calorífico de 8,500 kcal/kg (COMIMSA, 2002 y González 2012); se pueden calcular entonces, las calorías requeridas para cocer 20,000 Ladrillos (CRC):

|   |   |
|---|---|
| Cálculos  | Calorías requeridas para cocer<br>20,000 pzas de ladrillo (CRC) |
| (CRC)= 1800 kg x 8500 kcal/kg (aceite gastado)= | 15,300x10 <sup>3</sup> kcal.                                    |

Cuadro 15.- Calorías requeridas para cocer 20,000 pzas de ladrillo

Ahora, para poder conocer la cantidad de biogás requerida para satisfacer la demanda de 15,300x10<sup>3</sup> kcal. Debemos recordar el potencial calorífico del biogás purificado y comprimido calculado en el punto 4.2.5 de esta tesis, el cuál es de 8,993.67 kcal/kg, entonces la cantidad requerida de Biogás para cocer 20,000 Ladrillos sería de:

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| CRC (Biogás) = (CRC / P.C. Biogás) = | 1,701.2 kg |
|--------------------------------------|------------|

Cuadro 16.- Cantidad requerida de Biogás para cocer 20,000 Ladrillos

---

4.3.3 Cálculo de la cantidad de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en un horno de ladrillo, al utilizar biogás.

Recordando, que el proceso de purificación del Biogás previamente mencionado en este proyecto, tiene el objetivo de que el Biogás contenga Metano (CH<sub>4</sub>) en más del 95% de su volumen, entonces podríamos afirmar que el comportamiento del combustible purificado (Biogás) será muy similar al del hidrocarburo (Metano).

Con esta consideración, podemos hacer inferencias sobre la cantidad de Dióxido de Carbono generada en un horno de ladrillo al utilizar Metano (CH<sub>4</sub>) como combustible.

Para estos fines, tenemos que basarnos en la Reacción de combustión del Metano, mencionada en el punto 3.3.3 de esta tesis:



De donde se determinó que al usar 1,000 gramos de Metano (CH<sub>4</sub>) se generarían 2,750 gramos de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, entonces si en nuestro caso utilizaremos 1,701.2 kg de CH<sub>4</sub> para cocer 20,000 piezas de ladrillo, entonces se generarán:

|  |  |
|--|--|
| Cálculos                               | Cantidad Generada de Dióxido de Carbono por Metano en un horno de ladrillo (DCGCH <sub>4</sub> ) |
| DCGCH <sub>4</sub> = 1,701.2 kg x 2.7= | 4,593.23 kg de CO <sub>2</sub>   |

Cuadro 17.- Cantidad de Dióxido de Carbono por Metano en un horno de ladrillo

4.3.4 Comparación de la cantidad de Dióxido de Carbono emitido por la leña y el biogás si se utilizan como combustible en los hornos típicos del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas.

Recordando entonces los cálculos técnicos realizados en los puntos anteriores, se tiene lo siguiente:

- La combustión de 1.00 kg de Metano (CH<sub>4</sub>) genera 2.75 kg de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>.)
- La combustión de 1.00 kg de Madera genera 1.63 kg de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>.)
- Además se calculó que para cocer 20,000 Ladrillos se requieren de 1,610.5 kg de CH<sub>4</sub>, por lo tanto:

---

|  |  |
|--|--|
| Cálculos                               | Cantidad Generada de Dióxido de Carbono por Metano en un horno de ladrillo (DCGCH <sub>4</sub> ) |
| DCGCH <sub>4</sub> = 1,610.5 kg x 2.7= | 4,593.23 kg de CO <sub>2</sub>   |

Cuadro 18.- Cantidad de Dióxido de Carbono por Metano en un horno de ladrillo

- Y si en un horno típico de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo Chiapas, se utilizan 5,517 kg de leña (Gómez, 2011). Entonces:

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Cálculos                 | Dióxido de Carbono generado por horno de leña (DCGLEña) |
| DCGLEña = 5,517 x 1.63 = | 8,992.71 kg de CO <sub>2</sub>                          |

Cuadro 19.- Cantidad de Dióxido de Carbono generado por horno de leña

Entonces, al usar Biogás en un horno típico de ladrillo del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. México. Se estarían emitiendo 4,399.48 kg de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) menos que si se usara leña; es decir, las emisiones a la atmósfera se reducirían en un 48.92% (Figura 45).

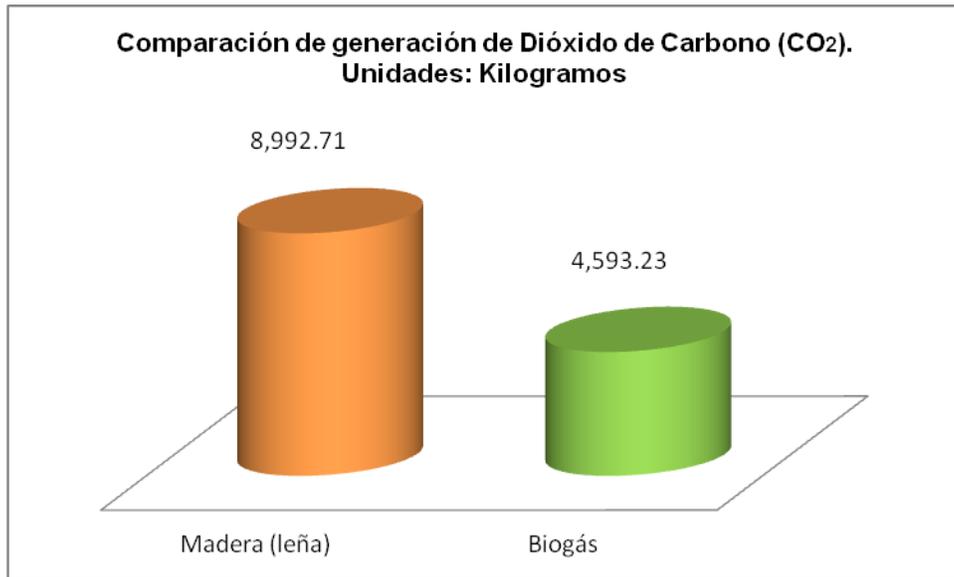


Figura 45. Gráfica de comparación entre el CO<sub>2</sub> emitido por la leña y el biogás. Gómez (2013).

---

## 5. DISCUSIONES

En esta sección, se presentan análisis comparativos de los resultados obtenidos con los descritos por otros autores. Los cuales están basados únicamente en los dos primeros objetivos particulares que se llevaron a la práctica:

- I. Implementación y evaluación de un digestor anaeróbico alimentado por excretas de ganado vacuno para generar biogás.
  
- II. Diseño, construcción e implementación de un sistema de purificación, compresión y almacenamiento de biogás.

Debido a que el tercer objetivo, planteaba el comparar la cantidad emitida de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) derivada de diversos combustibles usados en las ladrilleras; sin embargo, esta parte se realizó únicamente de manera teórica, por lo que no se pueden comparar con resultados que hayan sido obtenidos en otras investigaciones, de manera práctica.

---

## 5.1 Implementación y evaluación de un digestor anaeróbico alimentado por excretas de ganado vacuno para generar biogás.

Como se mencionó en el capítulo anterior, para la producción de biogás se utilizó un biodigestor rígido DM-1 (Farrera, 2011), con capacidad de 1,110 L y con una bolsa reservorio con capacidad de 3.5 m<sup>3</sup> fabricada con geomembrana. El sistema se instaló en la Ciudad Universitaria de la Universidad y Ciencias de Artes de Chiapas, y fue alimentado con excremento llevado desde el Rancho Nueva Esperanza, de acuerdo al problema planteado originalmente.

Posteriormente se procedió a elaborar la mezcla de alimentación del biodigestor, utilizando cubetas con capacidad de 20 L, manipulando la proporción de 3 de agua por 1 de estiércol (3:1), para ir vaciando la mezcla al interior del biodigestor a través de la tubería instalada para tal fin.

Se realizaron cuatro recargas al biodigestor y se tomó la cantidad de producción de biogás generada a los 7 días después de cada recarga, obteniéndose los siguientes datos:

| Producción de Biogás en el Biodigestor Rígido DM-1 |  |                                     |  |
|--|--|-------------------------------------|--|
| Cantidad de Estiércol alimentados (Litros)         | Cantidad de Estiércol alimentados (Kg) | Volúmen de Biogas (m <sup>3</sup> ) | Rendimiento del Biodigestor (kg/m <sup>3</sup> ) |
| 200  | 180                                    | 3.5                                 | 0.0194   |
| 200  | 180                                    | 5.0                                 | 0.0277   |
| 100  | 90                                     | 3.5                                 | 0.0388   |
| 100  | 90                                     | 3.5                                 | 0.0388   |
| <b>Promedio de Producción</b>                      |  |                                     | <b>0.0311 (m<sup>3</sup>/kg)</b>                 |

Cuadro 20.- Producción de Biogás en el Biodigestor Rígido DM-1

Con este resultado, podemos calcular la producción esperada diaria en el rancho, Nueva Esperanza:

|  |  |
|--|--|
| Cantidad de estiércol diaria aprovechable en el rancho | Producción diaria promedio de biogás, derivada de la cantidad de estiércol alimentada al biodigestor |
| 1,658 kg   | 51.4 m <sup>3</sup>  |

Cuadro 21.- Cantidad de estiércol aprovechable y producción de biogás.

Para comparar este dato, se realizó investigación documental, encontrando una gran variedad de capacidades de producción y de biodigestores, sin embargo se encontraron 3 investigaciones que demuestran la producción medida de biogás, en biodigestores instalados en regiones con climas muy similares al del centro del estado de Chiapas. Por ejemplo en 2010, se inició en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, el diseño, construcción y operación de un biodigestor anaerobio tipo cúpula (Laines, et al. 2011), obteniendo una producción promedio de 0.043 m<sup>3</sup> /kg. En la Provincia de Bolivar, en Ecuador un biodigestor produjo 0.032 m<sup>3</sup>/kg (Riquelme y Martinez 2006). También en Ecuador pero en la Provincia del Carchi, otro biodigestor presentó una capacidad de producción de 0.040 m<sup>3</sup> /kg (Pazmiño, 2012). Estos resultados se obtuvieron de investigaciones que presentaban biodigestores muy similares al propuesto en esta investigación, fundamentalmente en lo que se refiere al uso de:

1. Estiércol de ganado vacuno como materia orgánica de alimentación.
2. Temperaturas promedio anuales similares a la de Chiapa de Corzo (25° C)

A continuación se presenta una tabla comparativa de los resultados encontrados, tomando como base los resultados presentados por cada investigación y proponiendo que cada biodigestor se alimentara con la cantidad diaria promedio de materia orgánica recolectada en el rancho nueva esperanza (1,658 kg):

| Producción promedio esperada para cada tipo de Biodigestor: | Cantidad | Unidad         | Tasa de Producción | Unidad             |
|---|----------|----------------|--------------------|--------------------|
| Biodigestor Bolivar   | 53.0     | m <sup>3</sup> | 0.032              | m <sup>3</sup> /kg |
| Biodigestor Carchi  | 66.3     | m <sup>3</sup> | 0.040              | m <sup>3</sup> /kg |
| Biodigestor de cúpula Tabasco                               | 70.8     | m <sup>3</sup> | 0.043              | m <sup>3</sup> /kg |
| Capacidad de Producción del Biodigestor DM-1                | 51.4     | m <sup>3</sup> | 0.031              | m <sup>3</sup> /kg |

Cuadro 22.- Producción promedio esperada por tipos de Biodigestores.

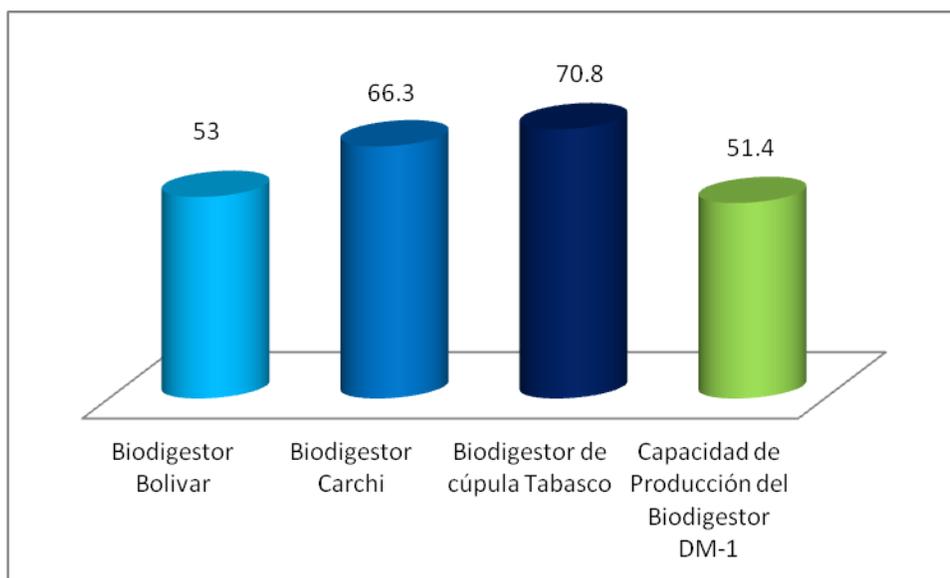


Figura 46.- Comparación de producción de diversos proyectos. Gómez (2013).

---

Por lo que con relación a otros biodigestores, la producción del biodigestor a usarse en este proyecto se encuentra dentro de los parámetros normales.

## 5.2 Diseño, construcción e implementación de un sistema de purificación, compresión y almacenamiento de biogás.

En capítulos anteriores, se hizo mención que por la naturaleza de este proyecto de investigación, se diseñó y se construyó un “Módulo de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás”, el cuál cumple con ambos objetivos en un solo dispositivo:

- I. Purificación
- II. Compresión

Por lo que en esta sección, se comparan los resultados obtenidos en este proyecto, con aquellos generados en proyectos similares de envasado de biogás; es decir, sistemas que busquen purificar primero el biogás, antes de almacenarlo a presión en tanques portátiles.

### 5.2.1 Resultados de este proyecto de investigación

En el capítulo anterior, se indicó que el Potencial Calorífico del Biogás purificado, se calculó de manera indirecta, al realizar una comparación entre el calor entregado por un gas con potencial calorífico conocido, como lo es el gas L.P. al calentar un litro de agua, con el calor entregado al calentar también un litro de agua con el biogás. Con

esta metodología se determinó el potencial calorífico del biogás, que al compararlo con el potencial calorífico del metano puro, nos indica el porcentaje de volumen de metano que contiene el biogás purificado por el sistema desarrollado.

|  |                  |
|--|------------------|
| Potencial Calorífico del Biogás Purificado<br>( $PC_{\text{BIOGÁS}}$ ) | 8,993.67 kcal/kg |
| Contenido de Metano ( $\text{CH}_4$ ) calculado                        | 94.73%           |

Cuadro 23.- Potencial Calorífico del biogás y contenido de metano en el mismo.

Además, con las pruebas realizadas de compresión, se obtuvieron los siguientes resultados:

|                                       |                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Presión Máxima alcanzada              | 235 psi ( $16.52 \text{ kg/cm}^2$ ) |
| Volumen del tanque                    | 10 L ( $0.01 \text{ m}^3$ )         |
| Masa de biogás contenida en el tanque | 0.532 kg                            |

Cuadro 24.- Presión, volumen y masa de biogás en un tanque metálico

Durante las pruebas de compresión se realizaron medidas de presión y de peso del biogás dentro del tanque, esto con el objetivo de poder determinar la relación entre la presión y la masa contenida en el tanque. Obteniéndose los resultados siguientes (Figura 47):

| ↓  | C1           | C2        |
|----|--------------|-----------|
|    | Presión(psi) | Peso (kg) |
| 1  | 10           | 0.303     |
| 2  | 65           | 0.342     |
| 3  | 80           | 0.365     |
| 4  | 95           | 0.381     |
| 5  | 115          | 0.406     |
| 6  | 125          | 0.415     |
| 7  | 150          | 0.437     |
| 8  | 165          | 0.454     |
| 9  | 175          | 0.469     |
| 10 | 190          | 0.487     |
| 11 | 200          | 0.495     |
| 12 | 210          | 0.504     |
| 13 | 215          | 0.512     |
| 14 | 230          | 0.530     |
| 15 | 235          | 0.532     |

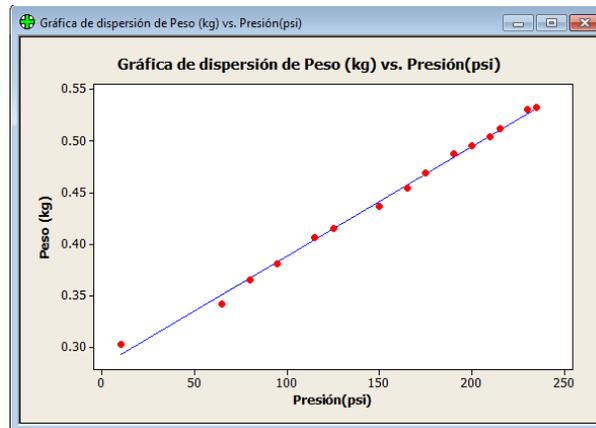


Figura 47. Datos y gráfica de presión ejercida, contra el peso del biogás dentro del tanque. Software, MINITAB 16.

Ecuación de regresión:  $\text{Peso (kg)} = 0.282 + 0.00106 \text{ Presión (psi)}$ ;  
con  $R^2 = 99.6\%$ .

Esta ecuación nos servirá para hacer inferencias con los resultados reportados por otros proyectos de investigación, y por lo tanto; poder compararlos contra los nuestros.

### 5.2.2 Resultados de otros proyectos de investigación

Iniciaremos exponiendo los resultados reportados por Chandra et al (2012), quien utilizó un sistema de lavado a presión para enriquecer el biogás, para posteriormente embotellarlo en tanques convencionales de gas natural (CNG). Este sistema fue

diseñado y desarrollado por el Instituto Hindú de Tecnología en Delhi India (Figura 48), y se utiliza para acondicionar el biogás para uso en automóviles:

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Presión Máxima alcanzada               | 145 psi (10.2 kg/cm <sup>2</sup> ) |
| Volumen del tanque                     | No reportado                       |
| Masa de biogás contenida en el tanque  | No reportado                       |
| Contenido de Metano (CH <sub>4</sub> ) | 97 %                               |

Cuadro 25.- Resultados de Chandra et al.(2012).

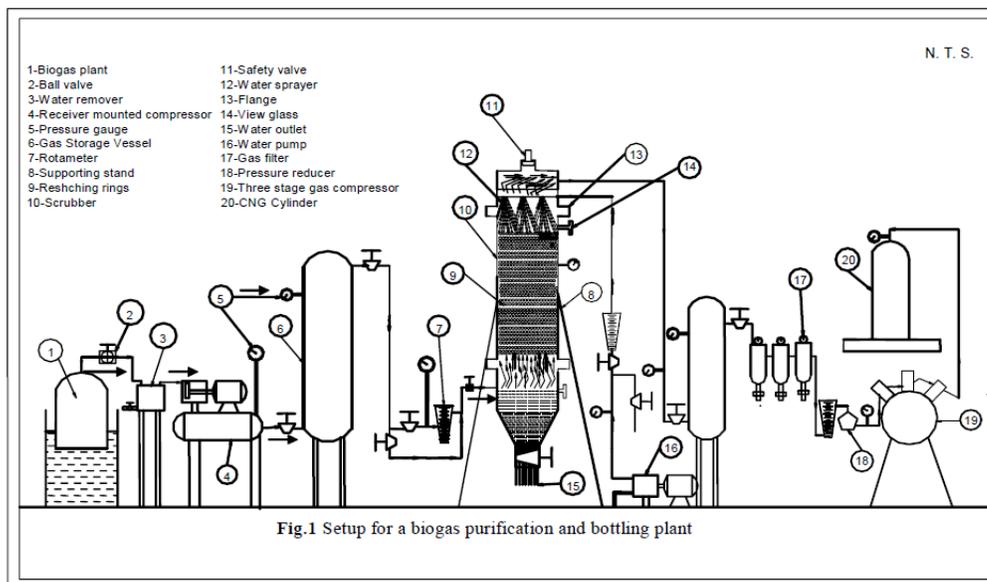


Figura 48. Planta de purificado y envasado de Biogás (India). Vijay (2006).

---

También Zafar (2006), en su caso de estudio para embotellar el biogás en cilindros como fuente de energía (“A Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders as Source of Power for Rural Industries Development in Pakistan”), reporta los siguientes resultados:

|  |  |
|--|--|
| Presión Máxima alcanzada               | 1450.38 psi (101,97 kg/cm <sup>2</sup> ) |
| Volumen del tanque                     | 21.5 L (0.0215 m <sup>3</sup> )          |
| Masa de biogás contenida en el tanque  | 3.5 kg                                   |
| Contenido de Metano (CH <sub>4</sub> ) | 95 %                                     |

Cuadro 26.- Resultados de Zafar (2006).

Estos datos se obtuvieron al analizar un sistema de lavado de biogás diseñado por la Universidad de Balochistan, en Quetta, Pakistán. Sistema que cuenta con dos subsistemas principales:

- I. Remoción de CO<sub>2</sub> mediante lavado a presión con agua
- II. Compresión del biogás purificado en cilindros

A continuación, presentamos el sistema propuesto por la Universidad de Balochistan, y publicado por Zafar.

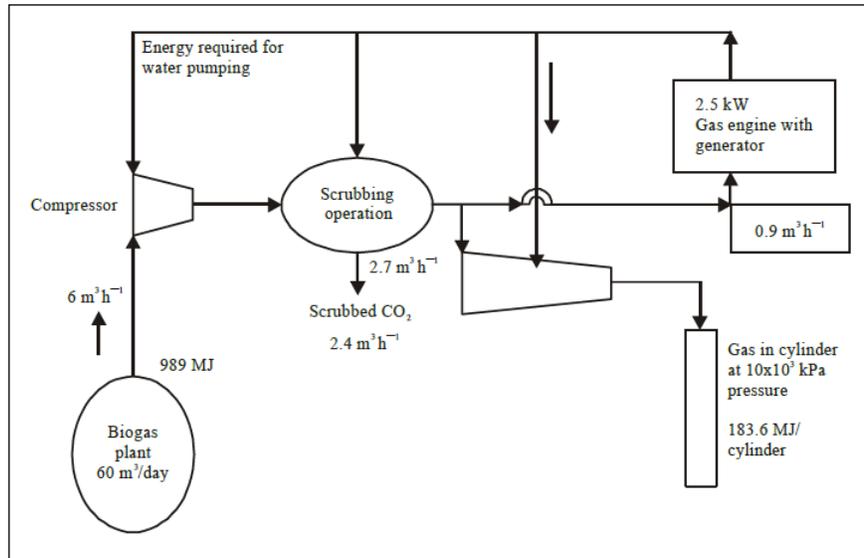


Figura 49. Balance de energía para purificación y compresión de biogás. Zafar (2006).

En años anteriores, Vijay (2006) también utilizó el sistema desarrollado por el Instituto Hindú de Tecnología en Delhi India, para acondicionar el biogás para uso en automóviles, pero realizó otras experimentaciones a mayores presiones de almacenamiento del biogás en tanques que lo realizado por Chandra et al (2012), reportando los siguientes datos:

|  |  |
|--|--|
| Presión Máxima alcanzada               | 1667.93 psi (117.27 kg/cm <sup>2</sup> ) |
| Volumen del tanque                     | No reportado                             |
| Masa de biogás contenida en el tanque  | 9.3 kg                                   |
| Contenido de Metano (CH <sub>4</sub> ) | 85 %                                     |

Cuadro 27.- Resultados de Vijay (2006)

Finalmente Yingjian, et al (2011), manifestó que en Nueva Zelanda, se ha purificado el biogás mediante lavado a presión y posteriormente almacenado en tanques de acero, con el objetivo de substituir el Gas Natural en la mayoría de sus aplicaciones y en algunos casos a la Gasolina, el Diesel y el Gas Licuado del Petróleo. Los datos, presentados son los siguientes:

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| Presión Máxima alcanzada               | 58.02 psi (4,08 kg/cm <sup>2</sup> ) |
| Volumen del tanque                     | 20 L (0.02 m <sup>3</sup> )          |
| Masa de biogás contenida en el tanque  | No reportado                         |
| Contenido de Metano (CH <sub>4</sub> ) | 90 %                                 |

Cuadro 28.- Resultados de Yingjian, et al (2011)

5.2.3 Comparación entre los resultados de este proyecto contra los presentados en las otras investigaciones.

A continuación, se presenta una gráfica (Figura 50) para comparar los distintos niveles de contenido de Metano (CH<sub>4</sub>) reportados por cada investigación. Para hacer referencia a esta investigación, denominaremos nuestro sistema como “Módulo de Biogás”:

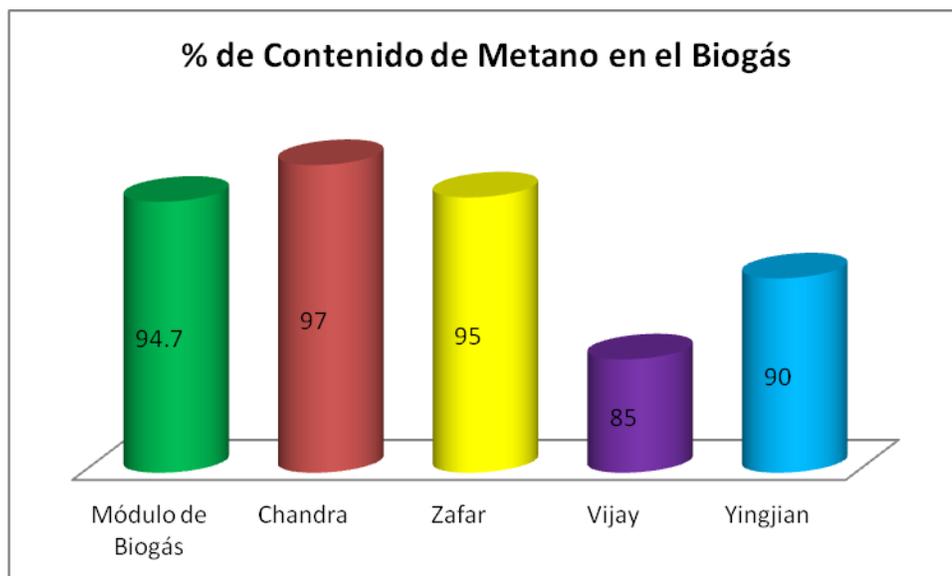


Figura 50. Comparación entre diferentes resultados reportados de porcentaje de Metano contenido en el Biogás. Gómez (2013).

En la siguiente tabla, se presenta la presión obtenida en cada investigación:

| Investigación    | Presión (psi) |
|------------------|---------------|
| Módulo de Biogás | 235           |
| Chandra          | 145           |
| Zafar            | 1450.38       |
| Vijay            | 1667.93       |
| Yingjian         | 58.02         |

Cuadro 29.- Resultados de presión de diferentes proyectos

---

Sin embargo a simple vista, existe una gran diferencia entre cada presión manifestada por los distintos autores, esto es debido a que los equipos utilizados en la compresión del Biogás no son similares, por lo que no podemos hacer una comparación entre las presiones, a menos que tengamos alguna otra variable que esté relacionada con la misma. Por lo tanto, de conformidad con los resultados obtenidos en esta investigación, la variable que está directamente relacionada con la presión, es la masa de biogás contenida en los tanques.

Por lo tanto, con la ecuación de regresión que obtuvimos en la parte de pruebas de compresión, haremos inferencias sobre la masa que obtendríamos en el equipo desarrollado si tuviéramos las presiones manifestadas con otros autores, y entonces sí, haremos la comparación con las masas reportadas por ellos.

Recordando que la ecuación de regresión obtenida es:

$$\text{Peso (kg)} = 0.282 + 0.00106 \text{ Presión (psi)}$$

Entonces, retomamos la tabla anterior (cuadro 29) para construir lo siguiente:

| <b>Investigación</b> | <b>Presión (psi)</b> | <b>Masa de Biogás reportada por el autor</b> | <b>Masa calculada para el Módulo, con ecuación de regresión:</b> |
|----------------------|----------------------|--|--|
| Módulo de Biogás     | 235                  | 0.532 kg                                     | 0.532 kg   |
| Chandra              | 145                  | No reportado                                 | No se puede comparar   |
| Zafar                | 1450.38              | 3.5 kg                                       | 1.81 kg  |
| Vijay                | 1667.93              | 9.3 kg                                       | 2.05 kg  |
| Yingjian             | 58.02                | No reportado                                 | No se puede comparar   |

Cuadro 30.- Comparación de embotellado de biogás de diferentes proyectos.

Por lo tanto, en el cuadro 30, tenemos la columna denominada.- “Masa calculada para el Módulo, con ecuación de regresión”, los resultados plasmados ahí, representan las inferencias de masa que tendríamos, en caso de que con nuestro sistema aplicáramos las presiones reportadas por cada investigación. De esta forma, podríamos generar una gráfica para comparar nuestro sistema con el de otras investigaciones, en materia de Presiones de Biogás contra Masa almacenada (Figura 51):

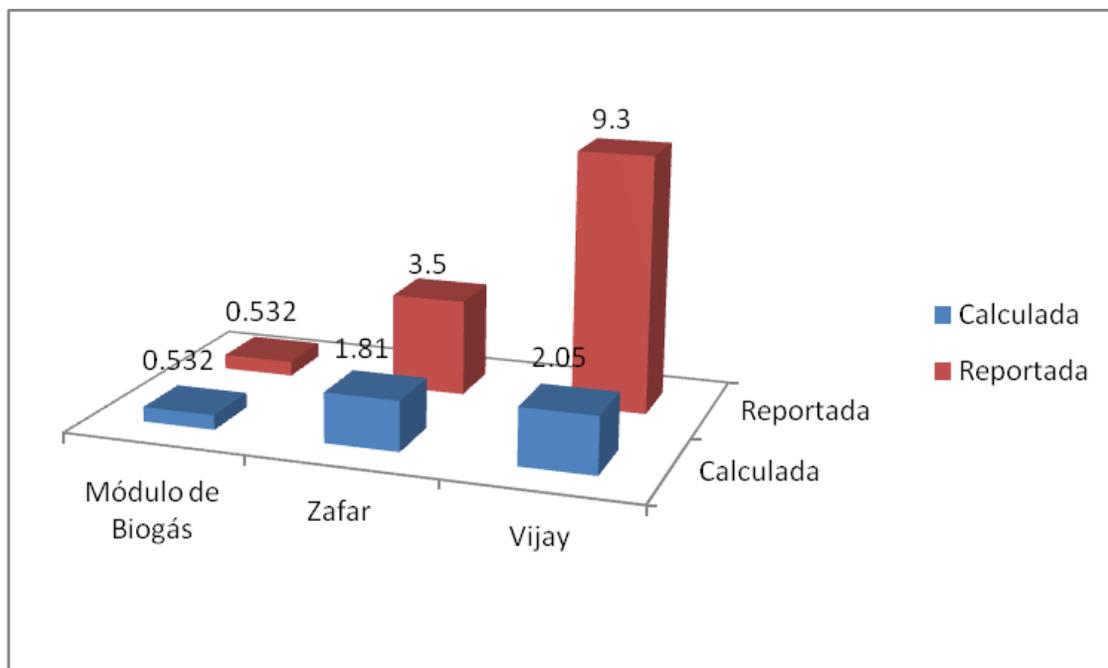


Figura 51. Gráfica de comparación entre los resultados reportados por otros proyectos de investigación y los resultados calculados con la regresión lineal, con relación a presión contra masa de biogás. Gómez (2013).

Podemos observar que con relación Vijay, el módulo de biogás desarrollado en este proyecto de investigación tendría una masa de 2.05 kg con 1667.93 psi de presión, lo cual es muy por debajo de la masa de biogás reportada de 9.3 kg a esa misma presión (78% menos en masa). Sin embargo, un punto a resaltar es que el porcentaje de contenido de metano reportado por Vijay es del 85% contra 94.7% de nuestra investigación, lo que significa que al estar menos purificado, el biogás puede contener otros elementos como el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), que podrían estar afectando el peso molecular del Biogás, y por lo tanto la masa total del biogás comprimido.

---

La afirmación anterior, se puede analizar también al comparar la masa de 3.5 kg reportada por Zafar a una presión de 1450.38 psi, contra la masa calculada por regresión para este proyecto: 1.81 kg. La cual representa el 52% de la reportada por Zafar. En ambos casos, el porcentaje de contenido de metano en el biogás es casi del 95%.

Se observa claramente que existen diferencias entre los resultados obtenidos, sin embargo tenemos que resaltar, que los sistemas están contruidos a escalas diferentes, mientras los de Pakistán y la India son plantas industriales de procesamiento de biogás; el sistema propuesto por esta investigación es un “Módulo Portátil”, lo que significa que los equipos con los que están contruidos tienen diferentes capacidades debido principalmente al tamaño de los mismos. Y por lo tanto, su desempeño tendrá que ser diferente.

---

## 6. CONCLUSIONES

En esta sección, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto de investigación, los cuales siguen la secuencia de los objetivos particulares planteados. Primeramente se muestran los datos registrados durante la evaluación del biodigestor implementado. Posteriormente se plantean los resultados del desempeño del módulo de acondicionamiento y presurizado de biogás. Finalmente, se presentan los cálculos obtenidos al proponer el uso del biogás, como combustible en los hornos típicos de ladrillo de la región analizada.

El biodigestor evaluado en este proyecto de investigación, fue el denominado Rígido DM-1(Farrera, 2011), con capacidad de 1,100 L; el cual se conectó a una bolsa reservorio de geomembrana con una capacidad 3.5 m<sup>3</sup>, de donde se extrajo el biogás. El biodigestor presentó un promedio de producción de 0.0311m<sup>3</sup> de biogás, por cada kilogramo de estiércol suministrado. El sistema fue alimentado con estiércol de ganado bovino de registro raza AFS (Australian Freisian Sahiwal), usando una mezcla con agua en una proporción de 3 medidas de agua por 1 medida de estiércol (3:1), durante los 30 días utilizados para la evaluación, se contó con una temperatura ambiental promedio de 28°C.

La aportación principal de este proyecto de investigación, fue el desarrollo tecnológico que se llevo a cabo para diseñar, construir y evaluar el “Módulo Portátil

---

---

de Acondicionamiento y Presurizado de Biogás”, sistema innovador en México y con grandes ventajas competitivas por su tamaño, costo y desempeño, con relación a los existentes a nivel internacional. Los resultados fundamentales del desempeño del “módulo” fueron: Primeramente que para purificar y comprimir un kilogramo de biogás, requiere de un consumo de energía eléctrica de 0.78 kWh a un costo calculado en Agosto de 2013 de \$ 0.044 dólares americanos. En segundo término, se registró que a una presión de 235 psi ( $16.52 \text{ kg/cm}^2$ ) en un recipiente metálico de 10 L de volumen, se puede almacenar de manera segura 0.532 kg de biogás purificado. Posteriormente se determinó el potencial calorífico del biogás purificado y comprimido, mediante la comparación de la transferencia de calor del gas licuado del petróleo con poder calorífico conocido, contra la transferencia de calor debida a la combustión del biogás, al calentar un litro de agua con ambos combustibles en iguales condiciones de presión, masa y tiempo de calentamiento; obteniéndose un potencial de 8,993.67 kcal/kg, lo que significa que nuestro sistema ofrece biogás purificado, con por lo menos 94.73% de Metano ( $\text{CH}_4$ ).

Finalmente, se determinó que un horno tradicional de 22,000 piezas de ladrillo, del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México; requiere de  $15,300 \times 10^3$  kcal, para completar el proceso de cocción del material mencionado. Por lo tanto, se requeriría de 1,610.5 kg biogás purificado y presurizado para satisfacer dicha demanda energética, lo que generaría 4,593.23 kg de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitidos a la atmósfera; es decir, cada horno que sustituya el uso de madera por biogás, emitiría

---

48.92%.menos de Dióxido de Carbono. Sin embargo, este proyecto de investigación no tuvo el alcance para implementar un sistema de cocción de ladrillo con biogás, debido a que en el mercado no existe tecnología específica para dicho fin. Por lo tanto, dicho desarrollo tecnológico quedará fuera de esta tesis y podrá ser tema a desarrollar en otros proyectos de investigación.

Con todos estos resultados, podemos concluir que se cumplió con el objetivo fundamental de este proyecto de investigación presentado al inicio de esta tesis; el cual manifestaba que, el proponer el uso de biogás como combustible en los hornos típicos de ladrillo de del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México, contribuye al desarrollo sustentable de la industria ladrillera de la región.

---

## 7. LITERATURA CITADA

1. Angélico H, Angélico U, Godoy U. 2013. X Jornadas de sociología de la UBA. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
2. Antequera T, Tolabín E, Camacho M, Gareca A, Ugarte A. 2002. Estudio de propiedades físicas y químicas de materias primas destinadas a la elaboración de productos estructurales. Informe Técnico. Congreso Regional de Ciencia y Tecnología NOA 2002. Universidad Nacional de Catamarca. Pp 3.
3. Ávila Soler E. 2009. Biogás: Opción real de seguridad energética para México. Tesis. Instituto Politécnico Nacional. México. 73 p.
4. Bradley Álvarez J. 2007. Efecto Genotóxico y a la Salud en Personal Expuesto a Contaminantes Emitidos por Ladrilleras en Durango, México. Tesis. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Durango, México. 4 p.
5. Carazo A. 2006. Cifras básicas de la relación Madera-Fijación de Carbono-CO<sub>2</sub> atmosférico. Montes: revista de ámbito forestal, 84: 48-52.

- 
6. Casado M. 2005. Procesos de producción más limpia en ladrilleras de Arequipa y Cusco: diagnóstico situacional. Informe técnico. Swiscontact Perú, COSUDE, Programa Regional de Aire Limpio (PRAL).
  
  7. Casado M. 2010. Elaboración de límites máximos permisibles de emisiones para la industria ladrillera. Recuperado el 10 de octubre 2011, desde [www.redladrilleras.net/documentos\\_galeria/LMPs%20Ladrilleras.pdf](http://www.redladrilleras.net/documentos_galeria/LMPs%20Ladrilleras.pdf)
  
  8. Casas-Prieto M, Rivas-Lucero A, Soto-Zapata M, Segovia-Lerma A, Morales-Morales H, Cuevas-González M, Keissling-Davison C. 2009. Estudio de factibilidad para la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de Delicias, Chihuahua. Cuarta Época, año 13, 24: 745-756.
  
  9. Chandra R, Vijay V, Subbarao P. 2012. Vehicular Quality Biomethane Production from Biogas by Using an Automated Water Scrubbing System. International Scholarly Research Network, Renewable Energy . 2012: 1-6.

- 
10. Codes, M, Robledo S, Moira, A, Maffei A. 2002. Impacto ambiental de las ladrilleras en el Algarrobal. Departamento de las Heras, Mendoza, Argentina. Informe Técnico. Recuperado desde [http://ffyl.uncu.edu.ar/IMG/pdf/Impacto\\_de\\_las\\_ladrilleras\\_El\\_Algarrobal.Pdf](http://ffyl.uncu.edu.ar/IMG/pdf/Impacto_de_las_ladrilleras_El_Algarrobal.Pdf)
11. COMIMSA, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales. 2002. Paquete tecnológico para la disminución de la contaminación en las ladrilleras del municipio de Saltillo. Informe Técnico. Recuperado desde <http://www.comimsa.com.mx/casos-e-01.html>
12. Corral-Avitia A, De La Mora-Covarrubias A, Cota-Espericueta A, Corral-Díaz R. 2009. La cartografía de riesgo como instrumento técnico para la reubicación de la industria ladrillera del municipio de Juárez, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 26: 17-26.
13. Elizondo J. 2005. El fósforo en los sistemas ganaderos de Leche, Agronomía Mesoamericana. 16: 231-238.

- 
14. Esquivel R, Méndez, Preston T, Pedraza O. 2002. Aspectos importantes al introducir biodigestores en explotaciones lecheras a pequeña escala. Informe Técnico. Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
15. Farrera N. 2011. Tecnologías Termosolares y Bioenergéticas y su contribución al Desarrollo Sustentable de Comunidades Rurales Marginadas de Chiapas. Tesis de Doctorado, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México. 125 p
16. Flotats X, Campos E, Bonmatí A. 1997. Aprovechamiento energético de residuos ganaderos. Informe Técnico. Lleida, España. Recuperado de <http://web.udl.es/dept/macscat/Apunts.pdf>
17. Foladori-G. 2006. La insostenibilidad social del desarrollo sostenible. Portularia, 6:7-20.

- 
18. Frías-Hernández J. 2009. Potencial y oportunidades de desarrollo de biocombustibles a partir de materiales no alimenticios en Guanajuato. *Ide@s CONCYTEG*, año 4, 54: 1271-1285.
19. García H, Martell O, Guyat M, Capote V, Aguirre B. 2006. Caracterización química del follaje, la corteza y la madera de cinco especies forestales de la sierra maestra, *Revista Forestal Baracoa*, 25: 57-64.
20. Gómez-Beltrán C, Farrera N, López P, Moreira J. 2011. Estudio exploratorio del impacto ambiental generado por la industria ladrillera del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México. *Lacandonia* 5 : 89-95.
21. González, L. 2012. Optimización del Proceso de Combustión para el tratamiento de la caliza en la obtención de cal y derivados de la corporación Los Nevados. Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 62 p.
22. Herrero J. 2008. Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares. GTZ-Energía. Bolivia.

- 
23. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2008. México. Censos Económicos, Micro, pequeña, mediana y gran empresa: estratificación de los establecimientos. Recuperado desde [http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/pdf/Mono\\_Micro\\_peque\\_mediana.pdf](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/pdf/Mono_Micro_peque_mediana.pdf)
24. Kaiser F. 2009. Producción de Energía a partir de residuos orgánicos y cultivos agrícolas. Seguridad y Eficiencia Energética. Un aporte científico para la generación de políticas públicas.
25. Kapdi-S, Vijay-V, Rajesh-S, Prasad-R. 2005. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. Renewable Energy 30: 1195-1202.
26. Laines J, Sosa J, Cámara K, Alejandro J, Olivares J. 2011. Diseño, construcción y operación de un biodigestor anaerobio tipo cúpula a escala real para la obtención de biogás. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. © 2011: 612-616.

- 
27. Manahan E. 2007. Introducción a la Química Ambiental. Editorial Reverté-UNAM, México. Pp. 401.
28. Mantilla-J, Duque-C, Galeano-U. 2007. Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. Ingeniería e Investigación, 27, Universidad Nacional de Colombia, 27: 133-142.
29. Martínez R, Chávez E, López I. 2008. Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna. Informe Técnico. V Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica, UCLV, Santa Clara, Cuba.
30. Masters G, Wendell E. 2008. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. Editorial Pearson. Prentice-Hall, España. Pp. 519.
31. Moreno P. 2003. Estimación de riesgos ambientales causados por la industria ladrillera Informe Técnico. Facultad de Ingeniería UNAM, México.

- 
32. Morero B, Gropelli E, Campanella E. 2009. Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos: revisión de las principales tecnologías de purificación. Informe Técnico. Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Universidad Nacional de Litoral, Argentina.
33. Nebel B, Wright R. 1998. Ciencias Ambientales. Ecología y desarrollo sostenible. 6ª edición. Pearson-Prentice Hall Editorial, México. Pp. 408.
34. Orea U, Carballo L, Cordero E. 2004. Composición química de tres maderas en la provincia de pinar del río, Cuba a tres alturas del fuste comercial. Parte 3: Eucalyptus Saligna Smith, Revista Chapingo, series ciencias forestales y del ambiente, 10: 71-75.
35. Pazmiño A. 2012. Diseño, construcción e implantación de un digester anaerobio de flujo continuo para el tratamiento de estiércol bovino en la finca "Rancho Santa Esther" del sector "La Delicia" parroquia Tulcán, Cantón Tulcán, Provincia del Carchi, Ecuador. Informe Técnico. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí. Ecuador.

- 
36. Pérez-Galindo J, Payán-Rodríguez L. 2003. Coeficientes de transferencia de calor y caída de presión en un horno de ladrillo. Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo, 2: 48-57.
37. Programa de Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para Mitigar el Cambio Climático-EELA. 2011. Determinación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en base a factores de emisión y monitoreos de eficiencia energética en la comunidad ladrillera “El Refugio”, León Guanajuato, México. 5 p. Recuperado desde [http://www.inecc.gob.mx/descargas/dqcenica/2011\\_informe\\_gei\\_ladrilleras\\_refugio.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/dqcenica/2011_informe_gei_ladrilleras_refugio.pdf)
38. Riquelme U, Martínez E. 2006. Diseño de un biodigestor para una finca del Recinto San Luís de las Mercedes del Cantón las Naves de la Provincia de Bolívar. Informe Técnico. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.
39. Romo-M, Córdova-G, Cervera-L. 2004. Estudio urbano-ambiental de las ladrilleras en el municipio de Juárez, México. Estudios Fronterizos, 5: 9-34.

- 
40. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. 2010. México. Crecimiento de la Industria de la Construcción en el año 2010. Recuperado el 2 de septiembre, desde [http://www.shcp.gob.mx/POLITICAFINANCIERA/FINANZASPUBLICAS/Estadisticas\\_Oportunas\\_Finanzas\\_Publicas/Informacion\\_mensual/Paginas/finanzas\\_publicas.aspx](http://www.shcp.gob.mx/POLITICAFINANCIERA/FINANZASPUBLICAS/Estadisticas_Oportunas_Finanzas_Publicas/Informacion_mensual/Paginas/finanzas_publicas.aspx)
41. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005. México. Diagnóstico de las condiciones de operación de los hornos ladrilleros ubicados en el municipio de Chiapa de Corzo. México. Departamento de Manejo Integral de Contaminantes, delegación Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Pp. 125.
42. Toctaquiza Naranjo Olga I. 2008. Optimización del proceso de cocción en la producción de ladrillos de cerámica roja en el Cantón Chambo. Tesis. ESPC, Ecuador. 18 p.
43. Vijay V, Chandra R, Subbarao P, Kapdi S. 2006. Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications. Informe Técnico. 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment, Bangkok Thailand.

- 
44. Viquez J. 2010. Generación eléctrica con biogás. Una alternativa de ahorro eléctrico para granjas lecheras y porcinas. Informe Técnico. Alianza de Servicios de Información Agropecuaria. Costa Rica.
45. Vivanco Sánchez K. M. 2011. Contaminación por ladrilleras en Papantla de Olarte, Veracruz. Tesis. Universidad Veracruzana, México. 20 p.
46. Wayllas J. 2010. Diseño de un biorreactor chino anaerobio a partir de estiércol vacuno en la comunidad El Olivo-Pallatanga, Tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Ecuador. 59 p.
47. Yáñez E. 2007. Producción de Energía Limpia "Bio-gas". Informe Técnico. VI Jornadas de Investigación, ESPOL Ciencia 2007, Universidad de Guayaquil, Ecuador.
48. Yingjian L, Qi Q, Xiangzhu H, Jiezhi L. 2011. Energy use project and conversion efficiency analysis on biogas produced in breweries. Informe Técnico. World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Suecia.

---

49.Zafar S. 2006. A Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders as Source of Power for Rural Industries Development in Pakistan, World Applied Sciences Journal 1: 127-130.

50.Zapata A. 1998. Utilización del biogás para generación de electricidad. Informe Técnico. Fundación CIPAV. Colombia.