



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Manual de operación de una
planta de biogás a nivel semi-
industrial para un restaurante en
Ciudad Universitaria**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Manuel Adrián Correa Bolaños

DIRECTORA DE TESINA

Dra. Alejandra Castro González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo

VOCAL: Dra. Alejandra Castro González

SECRETARIO: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

1er. SUPLENTE: Dr. David Morillón Gálvez

2º. SUPLENTE: M.I. Héctor Mora García

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González _____

SUSTENTANTE:

Manuel Adrián Correa Bolaños _____

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX
OBJETIVO GENERAL	X

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES.....	1
1.1 Biogás	1
1.2 Beneficios y usos del biogás.....	4
1.3 Algunos ejemplos en el mundo del uso del biogás.....	9
1.4 Parámetros de operación de una planta de biogás	12
1.4.1 Parámetros químicos	13
1.4.2 Parámetros físicos.....	13
1.5 Planta de biogás en Ciudad Universitaria.....	14
1.6 Trabajos realizados en la planta en Ciudad Universitaria.....	23

CAPÍTULO 2

MANUAL DE LA PLANTA DE BIOGÁS DE CIUDAD UNIVERSITARIA.....	25
2.1 Condiciones iniciales.....	25
2.2 Operación de la planta de biogás en Ciudad Universitaria.....	32
2.2.1 Protección personal	32
2.2.2 Mezclado	34
2.2.2.1 Sistema eléctrico de mezclado.....	34
2.2.2.2 Cierre y apertura de válvulas para mezclado en reactor anaerobio I	37
2.2.2.3 Cálculos	37
2.2.2.4 Salida de efluente.....	40
2.2.3 Alimentación.....	41
2.2.3.1 Cierre y apertura de válvulas para mezclado en reactor anaerobio II.....	44
2.2.3.2 Trituración	48
2.2.3.3 Enzimas anaerobias	49

2.2.3.4	Control de pH	49
2.2.3.5	Flujo de alimentación	49
2.3	Mantenimiento.....	51
2.4	Reparaciones.....	52
2.5	Re-arranque de la planta de biogás de biogás	55
2.5.1	Control de parámetros de operación.....	55
2.5.2	Fallas a encontrarse	56
2.5.3	Recopilación de datos.....	56
2.6	Recomendaciones para la mejora.....	59

CAPÍTULO 3

CONCLUSIONES	60
GLOSARIO.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62

Índice de figuras

Figura 1.1	Digestor para el tratamiento de basura orgánica con producción de biofertilizantes y biogás.....	3
Figura 1.2	Diagrama planta de elaboración de biogás.....	4
Figura 1.3	Quemadores de biogás.....	6
Figura 1.4	Lámparas de biogás.....	7
Figura 1.5	Motor de diésel modificado para funcionar con biogás.....	8
Figura 1.6	Obtención del biogás y sus usos.....	10
Figura 1.7	Dimensiones del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento.....	15
Figura 1.8	Vista isométrica del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento.....	15
Figura 1.9	Geometría y ubicación de los estanques de sedimentación y de la base para la bomba.....	16
Figura 1.10	Ubicación final de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio.....	18
Figura 1.11	Arreglo final de los componentes del sistema para el manejo del biogás.....	20
Figura 1.12	Ubicación relativa de los componentes para el manejo del biogás y del equipo de combustión.....	21
Figura 1.13	Localización de componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato.....	21
Figura 1.14	Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato.....	22

Figura 1.15	Vista frontal del habitáculo y de algunos otros componentes de la planta de biogás.....	22
Figura 1.16	Vista superior de la planta de biogás donde se distinguen los sistemas para el tratamiento anaerobio de los residuos, para el manejo del biogás y para su aprovechamiento energético.....	23
Figura 2.1	Diagrama de la planta de biogás en Ciudad Universitaria parte exterior y alimentación al restaurante “Cibarium”	25
Figura 2.2	Vista frontal del habitaculo y de algunos otros componentes de la planta de biogás	26
Figura 2.3	Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato	26
Figura 2.4	Arreglo final de los componentes del sistema para el manejo del biogás.....	27
Figura 2.5	Ubicación final de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio	27
Figura 2.6	Comportamiento del digestor con respecto al tiempo de mezcla en ambos reactores anaerobios y a la producción que debería de haber de biogás.....	30
Figura 2.7	Comportamiento del digestor con respecto al volumen de alimentación y a la producción que debería de haber de biogás	30
Figura 2.8	Comportamiento del TRH con respecto al pH del efluente.....	30
Figura 2.9	Bomba en jaula de protección	31
Figura 2.10	Máquina pre-trituradora de biomasa	31
Figura 2.11	Gaveta donde se guarda el equipo de protección	33
Figura 2.12	Personal con equipo de protección.....	34

Figura 2.13	Diagrama unifilar de la planta de biogás en Ciudad Universitaria	35
Figura 2.14	Tablero de pastillas interruptoras termomagnéticas en la planta generadora de biogás en Ciudad Universitaria	36
Figura 2.15	Las tres pastillas unidas por un alambre de aluminio de la parte superior que activan el motor del reactor anaerobio R-I.....	36
Figura 2.16	Diagrama de configuración de llaves abiertas para encender el motor de R-I y homogenizar la biomasa dentro de R-I.....	38
Figura 2.17	Ventanilla del reactor anaerobio R-I donde se aprecia el mezclado de la biomasa	39
Figura 2.18	Reactor anaerobio R-II	40
Figura 2.19	Salida de agua y lodos del reactor anaerobio R-II hacia el estanque de lodos y agua	41
Figura 2.20	Biomasa pre-triturada	42
Figura 2.21	Biomasa separada y cortada	42
Figura 2.22	Contenedor de 10 litros con biomasa y agua antes de ser ingresada al pre-triturador	44
Figura 2.23	Proceso de análisis y selección de biomasa en tarja de acero	45
Figura 2.24	Configuración de llaves que se deben abrir para recirculación en reactor anaerobio R-II.....	46
Figura 2.25	Pastillas interruptoras termomagnéticas para accionar la bomba.....	47
Figura 2.26	Báscula para pesar los contenedores con biomasa	47
Figura 2.27	Sustrato en el tanque de alimentación	48

Figura 2.28	Triturador de biomasa.....	48
Figura 2.29	Contenedores con cal para controlar pH	49
Figura 2.30	La llave 1 es la que permite paso de la biomasa del tanque receptor de sustrato hacia el reactor anaerobio R-I	50
Figura 2.31	Diagrama de volúmenes de los equipos	51
Figura 2.32	Primer tanque receptor de sustrato que muestra los signos de corrosión.....	53
Figura 2.33	Tanque receptor de sustrato actualmente instalado	53
Figura 2.34	Engranés y tuercas del motor del reactor anaerobio R-I sin mantenimiento	53
Figura 2.35	Engranés y tuercas del motor del reactor anaerobio R-I después del mantenimiento	54
Figura 2.36	Vista de una parte de la planta productora de biogás donde se pretende mostrar la tubería, de color amarillo, por donde circula el biogás.....	54
Figura 2.37	Corte de la manguera de biogás en la parte superior del reactor anaerobio R-II.....	54
Figura 2.38	Comportamiento del digestor con respecto al tiempo de mezcla en ambos reactores anaerobios y a la producción que debería de haber de biogás.....	58
Figura 2.39	Comportamiento del digestor con respecto al volumen de alimentación y a la producción que debería de haber de biogás.....	58
Figura 2.40	Comportamiento del TRH con respecto al pH del efluente.....	58

Índice de tablas

Tabla 1.1	Punto de vista calórico de un metro cúbico de biogás en estado bruto o depurado el CO ₂ , comparado con otros combustibles	2
Tabla 1.2	Cantidad de diésel que se ahorra al usar un motor de combustible dual de 5 HP con biogás	8
Tabla 1.3	Materias primas para la producción de biogás agroindustrial	12
Tabla 1.4	Parametros químicos relativos a la DA de la FORSU	13
Tabla 1.5	Parametros químicos relativos a la DA de la FORSU	13
Tabla 2.1	Problemas que comúnmente se tienen en la planta	25
Tabla 2.2	Bitácora de trabajo de la planta de biogás en Ciudad Universitaria	29
Tabla 2.3	Especificaciones de los materiales de la planta de biogás	32
Tabla 2.4	Resumen de materiales de seguridad personal	33
Tabla 2.5	Alimentación del sistema	43
Tabla 2.6	Alimentos que se desechan y que se alimentan al reactor	44
Tabla 2.7	Mantenimiento a realizar en la planta de biogás de Ciudad Universitaria	51
Tabla 2.8	Actividades de reparación en la planta de biogás en Ciudad Universitaria	52
Tabla 2.9	Parámetros de la planta de biogás de Ciudad Universitaria	55
Tabla 2.10	Anotaciones extraídas de la bitácora de trabajo de la planta de biogás en Ciudad Universitaria	57
Tabla 2.11	Recomendaciones de aplicación para mejora de la planta	59

Resumen

El presente trabajo expone resultados sobre la operación y el mantenimiento, así como sugerencias para la mejora de la planta a nivel prototipo para la obtención de biogás mediante la degradación anaerobia de los residuos sólidos orgánicos que se generan en dos restaurantes ubicados en las inmediaciones de la **Facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria**, campus central de la UNAM. Durante nueve meses se registraron las cantidades de desechos recaudados, obteniendo un promedio de 34.6 kg/día y con el cual se trabaja en modalidad de digestión húmeda, para lo cual se reduce la concentración de sólidos de los residuos con la adición de agua, obtenida del efluente del mismo proceso de la planta productora de biogás a nivel prototipo, en una proporción 1:1. Con los 34.6 kg/día se obtienen 66.68 L/día de sustrato.

Al ser una planta de tipo piloto, durante su operación han surgido ciertos inconvenientes típicos de cualquier sistema piloto, de los cuales se evaluaron sus posibles mejoras y se ejecutaron para restablecer operaciones y así continuar con la operación normal de dicho sistema. De igual manera se han propuesto ciertas modificaciones para ejecutar de manera más eficiente tanto la obtención de biogás como la operación de la planta de biogás tipo piloto. Esto con el objetivo de llegar pronto al objetivo principal para lo cual fue establecida la planta de biogás tipo piloto en Ciudad Universitaria, que es la obtención de biogás y reducción de uso de combustibles fósiles para el calentamiento de alimentos en el restaurante “Cibarium” en Ciudad Universitaria.

Introducción

En 2012, la producción mundial de residuos sólidos urbanos se calculó en alrededor de 1,300 millones de toneladas diarias, y se estima que podría crecer hasta los 2,200 millones en el año 2025 (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012). La generación global de RSU muestra una disparidad regional en cuanto a su volumen, determinada en general, por el desarrollo económico y la proporción de la población urbana. En el año 2010, cerca del 44% de los RSU producidos en el planeta correspondieron a los países con las economías más desarrolladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2010). En el caso de Latinoamérica y el Caribe, contribuyeron con el 12% del total, detrás de los países que integran las regiones del Pacífico y del este de Asia.

En México, según la cifra más reciente publicada en 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003. Si se expresa por habitante, alcanzó 1.2 kilogramos en promedio diariamente en el mismo año. El aumento en la generación de residuos sólidos urbanos puede explicarse como resultado de múltiples factores, reconociéndose entre los más importantes el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio en los patrones de consumo de la población, entre otras. En México, como en el caso de muchos otros países, el crecimiento de la generación marcha a la par del gasto del consumo final privados y el PIB nacional. Puesto en términos sencillos, esta relación que se ha observado también en otras regiones del mundo, se traduce en que a mayores niveles de consumo se producen un mayor volumen de residuos. En el caso Mexicano, entre 2003 y 2015, el producto interno bruto (PIB) y la generación de residuos crecieron prácticamente a la misma tasa (alrededor de 2.77% anual).

Esta misma relación puede encontrarse a nivel de entidad federativa: aquéllas que contribuyeron mayormente al PIB nacional también lo hicieron al volumen nacional de RSU. No obstante, en algunos casos la contribución a la producción total nacional de RSU de algunas entidades se desvía notablemente de la tendencia general, como en el caso del estado de México (que produce más residuos respecto a la tendencia) o Campeche (que produce menos de lo esperado). Esto se explica básicamente por la alta contribución al PIB del estado de México debida a su importante actividad industrial y a su alta población; mientras que en el caso de Campeche, su comportamiento se debe a su intensa actividad petrolera y a su baja población.

Las diferencias en la distribución de la población sobre el territorio provocan que la generación de residuos varíe geográficamente: los mayores volúmenes se producen en las zonas con mayor concentración de población. De acuerdo con la regionalización de la Sedesol, en 2012 la región Centro concentró el 51% de la generación de RSU, le siguió la región Frontera Norte con 16.4% y la Ciudad de México con el 11.8%. Dentro de las re-

giones, entre 1997 y 2012 el patrón de generación ha sido muy heterogéneo: en la región Frontera Norte aumentó 214%, en la zona Centro 53%, en la zona Sur 49% y en la Ciudad de México aumentó 20%. La única región que mostró una reducción del 25% en ese periodo fue la Norte, al pasar de 6 a 4.5 millones de toneladas de RSU (SEMARNAT, 2015).

Los conceptos mencionados repercuten directamente en emisiones contaminantes al ambiente, he ahí la prioridad de buscar revertir la situación con suma urgencia, y la importancia que existan proyectos como la planta de producción de biogás tipo piloto de Ciudad Universitaria. Por ello la importancia de la realización del presente trabajo, que busca mantener informado a los lectores sobre la importancia de la creación de plantas generadoras de biogás, no sólo a nivel piloto, como la existente en Ciudad Universitaria, sino que también a nivel nacional, para seguir aportando a la reducción de emisiones contaminantes en el planeta. Muchas gracias.

Objetivo general

Realizar un manual de operación de una planta de biogás a nivel semi-industrial para un restaurante en Ciudad Universitaria atendiendo a que los principales parámetros de equilibrio en el sistema sean adecuados para una óptima operación.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Biogás

La biomasa es una materia orgánica de origen vegetal y animal. Como tal, la materia orgánica está compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y cantidades diversas de otros elementos (oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo, etc.). En la atmósfera, en la corteza terrestre, en los cauces de agua, bosques, etc., existen microorganismos (bacterias, levaduras y mohos) que se alimentan de los residuos orgánicos, descomponiéndolos en otros compuestos más simples (metano y etanol, por ejemplo) y desprendiendo calor en las reacciones de descomposición.

Así se puede considerar dos casos de biomasa (según el producto final obtenido a partir de ellas) (Madrid, 2012):

- Madera, cosechas, basuras y semillas: Si se queman producen calor que se puede utilizar para calentar agua que se emplea en calefacción, o bien para producir vapor, que a su vez el vapor se puede utilizar para producir electricidad. El maíz y la caña de azúcar se emplean para producir etanol y combustible.
- Fermentación de basuras y desperdicios agrícolas y humanos: que se refiere a la biometanización para dar origen al gas metano (biogás).

La biometanización es un proceso anaeróbico (en ausencia de oxígeno) de la parte orgánica de los residuos y gracias a la cual se obtiene, por fermentación, tanto biogás como otra sustancia con propiedades fertilizantes (aumenta la retención de humedad y la infiltración del agua), de baja acidez ($\text{pH} = 7.5$) y estabilidad. La composición química de este compuesto es función directa de las basuras orgánicas que se van a tratar, pero de promedio suele estar comprendido por un 85% de materia orgánica. Entre las ventajas que presenta este procedimiento se destacaría la casi ausencia de olores desagradables y de microorganismos perjudiciales para el ser humano y los animales. Técnicamente precisa de unas estructuras selladas y en ausencia de oxígeno (reactores anaerobios) para tener bajo control determinados parámetros físico-químicos (presión, temperatura y pH) (Díaz, 2015).

Al biogás también se le conoce como “gas de granja” o “gas de los pantanos”, de la primera forma porque los residuos de granja eran generalmente el estiércol de los animales, desperdicios agrícolas, pajas y otros tipos de plantas en descomposición; y de la segunda forma porque en 1667 fue hallado imprevistamente en zonas pantanosas.

La característica más sobresaliente del biogás es el gran porcentaje de gas metano que contiene (entre 50 a 70%), cosa que le otorga importante rendimiento calorífico, estimado entre 5,000 y 5,500 kcal/m³, en función de las variaciones en los contenidos de metano; el gas así obtenido arde con llama azul y sin humo. Su peso específico es de 11.368 N/m³, en consecuencia más liviano que el aire con un valor de 12.005 N/m³ y su equivalente

con otros combustibles, en estado bruto o depurado de CO₂, se muestra en la **Tabla 1.1**. Además de metano, el biogás, contiene otros gases tales como hidrógeno (entre 1 a 3%), dióxido de carbono (de 30 a 40%), vestigios de anhídrido sulfuroso (menos del 1%), oxígeno y otros gases (entre 1 a 5%).

Tabla 1.1 Punto de vista calórico de un metro cúbico de biogás en estado bruto o depurado el CO₂, comparado con otros combustibles (Lemme, 1985)

Biogás	Estado bruto (5,500 kcal/m³)	Estado depurado (8,500 kcal/m³)
Nafta	0.73 litros	1.10 litros
Alcohol	1.10 litros	1.70 litros
Gasoil	0.65 litros	1.00 litros
Gas natural	0.62 litros	0.95 litros
Carbón mineral	0.82 kilogramos	1.25 kilogramos
Carbón vegetal	1.24 kilogramos	1.90 kilogramos

En 1920 Karl Imhoff consigue poner a punto un sistema de fabricación de gas metano en forma continua, al introducir periódicamente una determinada cantidad de sustancias orgánicas en una masa de fermentación anaeróbica. A partir de esta operación, se comprueba que el ciclo para el comienzo de la producción de gas metano se cumple en aproximadamente ocho días, tiempo en el cual comienza el burbujeo en la mezcla en fermentación, desprendiéndose el gas, que se va acumulando en un recipiente de campana (Lemme, 1985).

La presión va elevándose a medida que aumenta la cantidad de gas bruto producido, llegando a obtenerse de 75 a 150 mm de columna de agua, presión adecuada para su uso directo en artefactos como cocinas o lámparas de alumbrado, la cama de residuos líquidos sobrantes de la operación es un excelente fertilizante, que se aplica directamente como abono sobre el terreno.

En el caso de la fermentación anaeróbica mesofílica (bacterias que se desarrollan en temperaturas medias) es necesario incrementar, en los climas desfavorables, la temperatura del reactor anaerobio hasta los 35°C, considerada óptima para una mayor producción de biogás. Sin duda, la producción de biogás es mayor a mayor temperatura, pero ello requiere provisión adicional de energía externa.

Cuando son grandes los volúmenes diarios de residuos, se tiende a reducir el tiempo de retención en el proceso de fermentación, aumentando la temperatura. El biogás posee naturalmente un olor característico que lo identifica respecto a los demás gases y pone en evidencia su existencia en casos de escape del mismo; en consecuencia, no necesita ser odorizado (Lemme, 1985).

Para el caso del biogás es común encontrar las siguientes operaciones unitarias (MARM, 2010):

- a) **Pretratamiento:** En general, se pretende acelerar el proceso de hidrólisis de las materias orgánicas para incrementar la producción, la calidad del biogás, y se reduce el tiempo de residencia en el digestor, debido a un aumento de la biodegradabilidad, favoreciendo unas condiciones óptimas para el desarrollo microbiano.
- b) **Co-digestión:** Es la fermentación anaerobia de dos o más sustratos que se complementan químicamente, aumentando la estabilidad, la producción de biogás y el equilibrio del proceso.
- c) **Depuración y aprovechamiento:** Dependiendo del uso del biogás, la depuración deberá ser más o menos estricta. El biogás se almacena en gasómetros y puede valorizar en calderas, motores de cogeneración (sistema más generalizado), vehículos, su introducción en la red de transporte de gas natural o en pilas de combustible.
- d) **Lodo digerido y su aprovechamiento:** El lodo digerido es un material de composición homogénea, en el que los malos olores se han reducido prácticamente en su totalidad y que contiene todos los nutrientes que contenía la materia orgánica inicial. Puede utilizarse como fertilizante orgánico-mineral de los cultivos, ya sea directamente o tras ser sometido a un proceso de separación sólido-líquido y posteriormente la fracción sólida puede comportarse, bien sola o mezclada con otros sustratos.

La **Figura 1.1** ilustra un digestor donde se trata basura orgánica y se produce biofertilizantes y biogás. Mientras que en la **Figura 1.2** se aprecia una instalación industrial para la producción de gas metano (biogás) a partir de residuos.

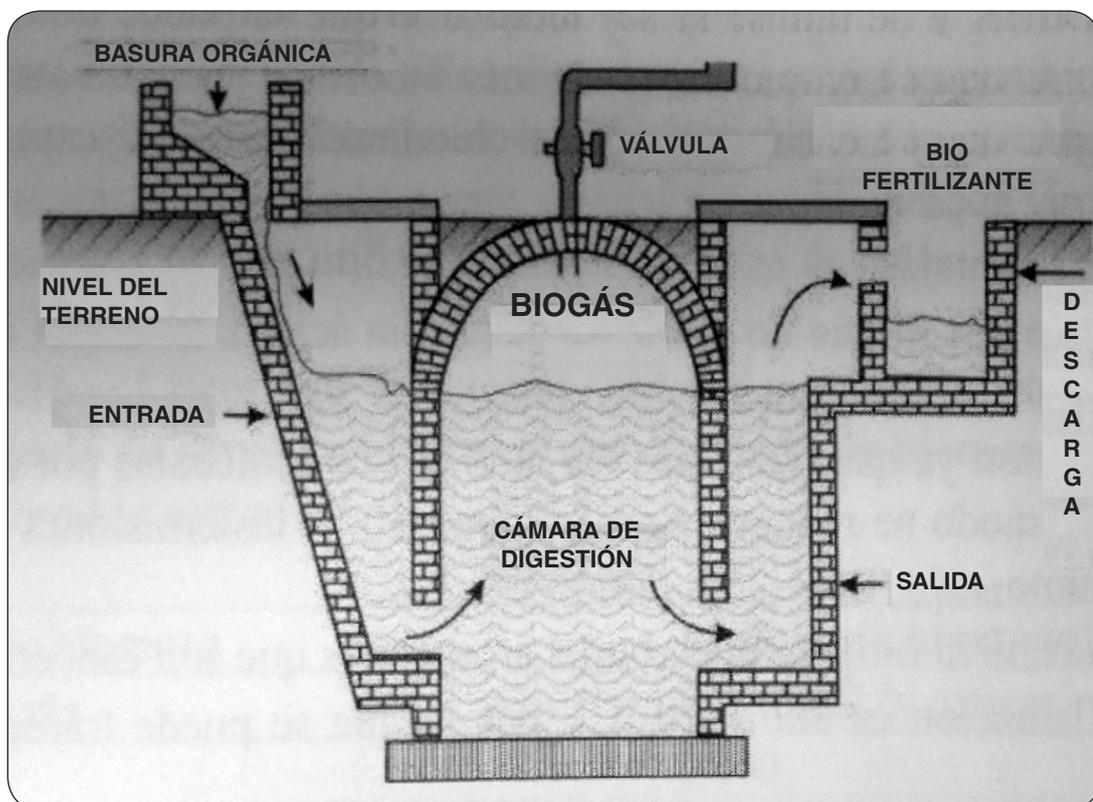
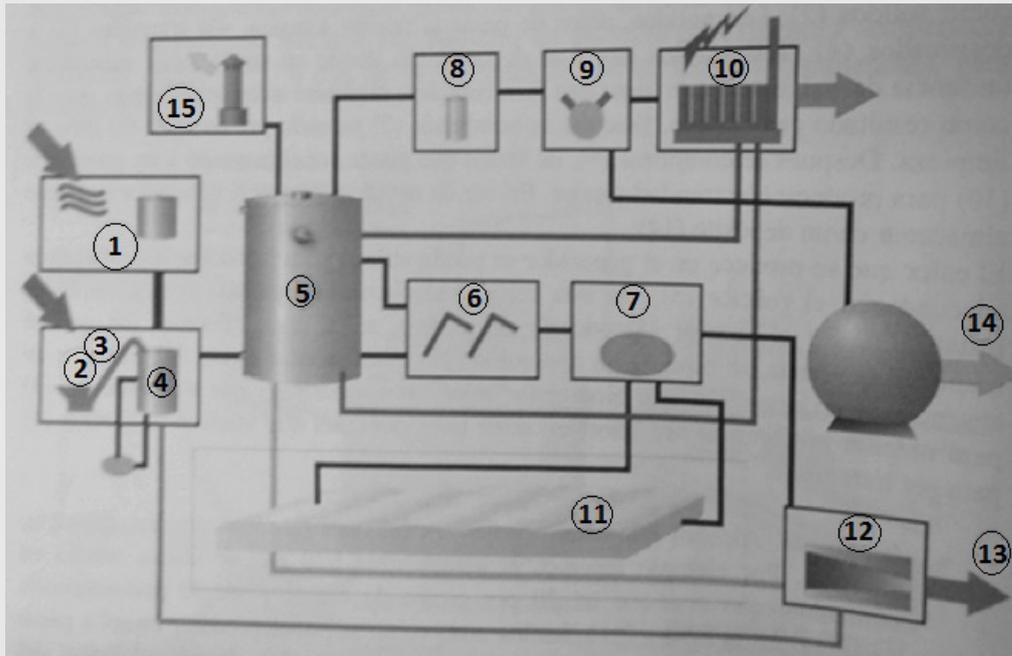


Figura 1.1 Digestor para el tratamiento de basura orgánica con producción de biofertilizantes y biogás (Madrid, 2012)



1. Entrada de residuos líquidos y semilíquidos. 2. Entrada de residuos sólidos. Triturador y dosificador. 3. Elevador de residuos sólidos. 4. Hidratador y dosificador. Toma de muestras. 5. Reactor anaeróbico termófilo. 6. Control y dosificador efluentes. 7. Sala de bombeo. 8. Filtro de biogás. 9. Sala de compresión. 10. Generador termoeléctrico. 11. Reactor anaerobio termófilo. 12. Tratamiento de lodos, separador de efluentes. 13. Salida de biofertilizante sólido. 14. Almacenamiento y salida del biogás. 15.- Antorcha.

Figura 1.2 Diagrama de la planta de elaboración de biogás (Madrid, 2012)
Beneficios y usos del biogás

1.2 Beneficios y usos del biogás

La creación y utilización del biogás de manera artificial se remonta a la segunda guerra árabe-israelí, a mediados de los años setenta del siglo XX, cuando el precio del petróleo subió ostensiblemente al ser utilizado como arma política, lo que hizo que se investigasen otras posibilidades de producir energía. Es entonces cuando se experimentó con reactores anaerobios, los llamados de alta carga, capaces de retener los microorganismos anaerobios y de tratar las aguas residuales mediante este proceso. En este último caso, se tienen las características de composición del agua y siempre que sea ventajoso frente a otras alternativas de tratamiento también se utiliza, aplicándose a los vertidos de la industria agroalimentaria, bebidas, papeleras, farmacéuticas, textiles, etcétera.

En un primer momento, el desarrollo del biogás fue más fuerte en la zona rural, donde se cuenta de manera directa y en cantidad con diversos tipos de desechos orgánicos, como el estiércol. De esta manera, el aprovechamiento de los residuos agrícolas se practica desde hace años en instalaciones individuales de tamaño medio que utilizan el biogás para cocinar o como fuente de iluminación. Según los expertos, esta manera de tratar los residuos es más efectiva, controlada y ecológica que las soluciones tradicionales de tratamiento, que en algunos casos pasan directamente por el vertido incontrolado. No obstante, el bio-

gás también tiene sus inconvenientes porque, además del metano y dióxido de carbono, aparecen los componentes minoritarios como el ácido sulfhídrico que es necesario eliminar. Por otra parte, si el residuo queda almacenado en condiciones de ausencia de aire, como ocurre en estercoleros, se formaría metano que escaparía a la atmósfera, produciendo efecto invernadero y destrucción de capa de ozono sin que se aproveche su energía.

El biogás producido a partir de procesos de digestión de residuos puede utilizarse (Fernández, 2009):

- Para generación de calor o electricidad en una caldera.
- Para generar electricidad con el empleo de motores o turbinas. Para su uso en pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H₂S y otros contaminantes de las membranas.
- Para introducirlo en una red de transporte de gas natural, para lo que es necesario antes realizar un proceso de purificación del biogás así como añadir los aditivos necesarios.
- Para su uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como el metanol o el gas natural licuado.
- Para su empleo como combustible de automoción. El biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final.

Los agricultores conciben la importancia de las unidades de biogás en términos de la disponibilidad de mayores cantidades de estiércol de mejor calidad. En general, entre un tercio y la mitad de todo el estiércol de ganado se quema como combustible y, por lo tanto, se pierde en el suelo. Una planta de biogás, en muchas situaciones, duplica la disponibilidad de abono orgánico. El estiércol producido a través de una unidad de biogás tiene una ventaja comparativa sobre el estiércol ordinario en términos de cantidad y calidad. Alrededor del 70-75% del peso original del estiércol del ganado se conserva en una unidad de biogás, mientras que en las fosas abiertas de compost se pierde el 50% o más. Del mismo modo, casi todo el contenido de nitrógeno en el estiércol del ganado se conserva en una unidad de biogás, mientras que una parte sustancial de este se pierde durante el compostaje. El estiércol de biogás, conocido como “purín digerido” contiene un mayor porcentaje de otros nutrientes vegetales también.

Es una buena fuente de micronutrientes como zinc, hierro, manganeso y cobre que se han convertido en un factor limitado en muchos suelos. Además, la digestión completa del estiércol del ganado en las unidades de biogás mata las semillas de malezas. Los organismos que causan enfermedades de las plantas también son asesinados.

Se ha observado que el uso de purines digeridos como abono mejora la fertilidad del suelo y aumenta el rendimiento del cultivo en un 10-20%. Se recomienda que el estiércol se aplique a razón de 10 toneladas por hectárea en las áreas irrigadas y 5 toneladas por hectárea en las áreas secas.

El estiércol se puede usar junto con dosis normales de fertilizantes químicos. Dicha práctica ayudará a obtener mejores rendimientos de los fertilizantes, minimizar la pérdida de fertilizantes del suelo y proporcionar una nutrición equilibrada a los cultivos. El lodo digerido se ha encontrado útil para criar peces. Los alevines comunes de carpa y los alevines alimentados con una mezcla de salvado de arroz y lechada digerida y torta de aceite de mostaza y salvado de arroz en igualdad de nitrógeno mostraron un crecimiento más rápido con la mezcla de salvado y lechada. Una unidad de biogás ayuda a eliminar la antigua práctica de la quema de estiércol de ganado para combustible. Es un combustible limpio y eficiente para cocinar. Ahorra el consumo de queroseno, carbón y madera. Evita la necesidad de recolectar leña y ramitas y así se ahorra el trabajo a las mujeres y niños de las zonas rurales que normalmente dedican una cantidad considerable de tiempo y energía para cubrir largas distancias diariamente para recolectar combustible. Eliminaría la práctica de la tala indiscriminada de los árboles y la consiguiente erosión del suelo. El mejor uso del biogás es para cocinar. Para obtener el valor máximo de calor del biogás, se debe quemar en una estufa diseñada adecuadamente (**Figura 1.3**). Para una estufa típica de 0.45 m³ (16 pies cúbicos) por hora, que es un tipo familiar común, y las dimensiones son las siguientes (Khandewal y Mahdi, 1993):

- Tamaño del quemador: 2.25 mm de diámetro
- Área del quemador: 3.98 mm²
- Tamaño del puerto de llama: 6.0 mm de diámetro
- Cantidad de puertos: 20
- Área total de los puertos: 565 mm²
- Relación entre el área del quemador y el área del puerto de llama: 1:142
- Longitud del tubo de mezcla de gas: 20 mm

Existe una gran demanda de lámparas de biogás en áreas rurales no electrificadas. Sin embargo, la luz producida no es tan buena como la de una bombilla eléctrica. Las lámparas de biogás son caras y consumen grandes cantidades de gas. Se requiere un mantenimiento regular de las lámparas y un buen suministro de mantos. Las lámparas de biogás de manto

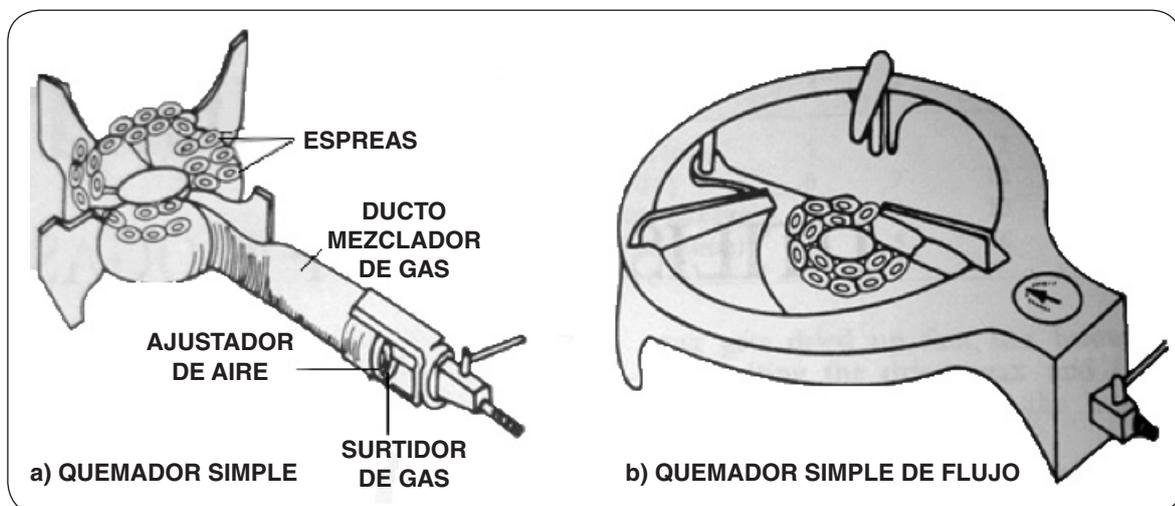


Figura 1.3 Quemadores de biogás (Khandewal y Mahdi, 1993)

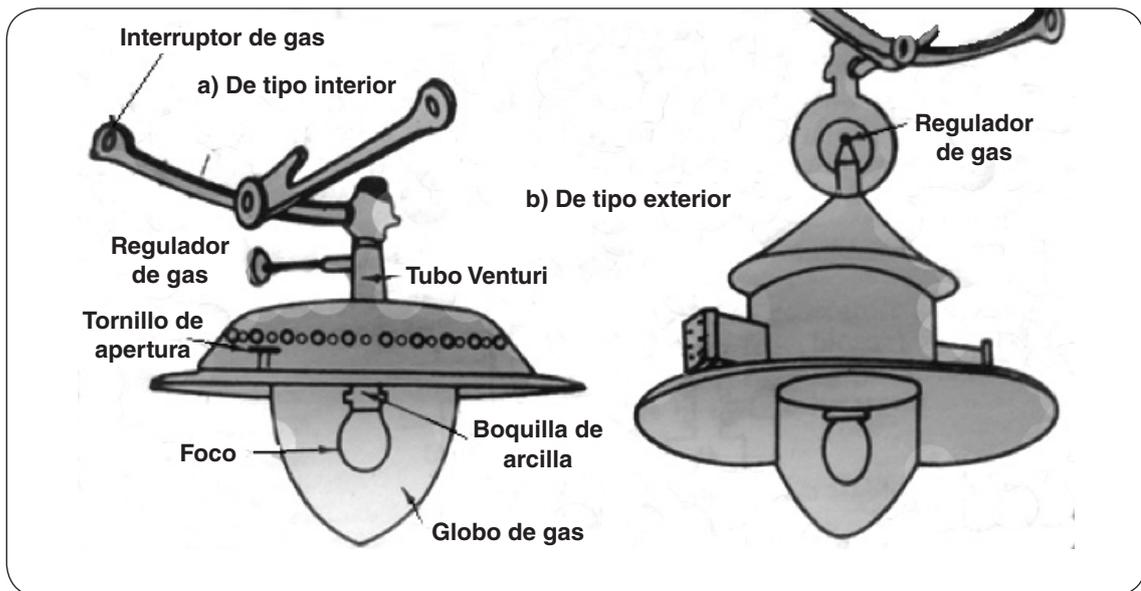


Figura 1.4 Lámparas de biogás (Khandewal y Mahdi, 1993)

único para uso dentro y fuera de las casas están disponibles en el mercado. Diferentes tipos de lámparas de biogás se muestran en la **Figura 1.4**.

Las unidades de biogás son medios efectivos para la eliminación sanitaria de excrementos humanos. En áreas con letrinas secas, la práctica de transportar tierra por las noches puede eliminarse mediante la instalación de letrinas con una unidad de biogás. Al colocar todas las excretas humanas y animales en una unidad de biogás, el problema de la eliminación de desechos se resuelve en el nivel familiar. Durante la descomposición del suelo nocturno en una unidad de biogás, la mayoría de los organismos causantes de enfermedades mueren. Esto puede servir como un control eficaz de enfermedades parasitarias, anquilostomas, lombrices intestinales, etc. La suspensión digerida permanece libre de mal olor y la mayoría de los patógenos. Los mosquitos y las moscas no se reproducen en purines digeridos. Por lo tanto las unidades de biogás mejoran el saneamiento.

La incidencia de enfermedades oculares entre mujeres y niños también se reduce, ya que la quema de biogás no causa humo en la cocina. El biogás es un combustible limpio, no causa contaminación del aire. Se considera un mejor combustible que el gas natural y el gas de petróleo licuado porque no contiene azufre. El azufre, al quemarse, se convierte en dióxido de azufre, que es responsable de muchas enfermedades pulmonares. El peligro de explosión del biogás es menor ya que contiene dióxido de carbono que actúa como un extintor de incendios.

El biogás es una fuente de combustible para la mecanización de la agricultura y las industrias locales, se puede usar para operar motores diésel y de gasolina (los motores de biogás están disponibles en el mercado) o para generar electricidad a partir de ella y el costo involucrado es bajo, lo que conduce a una mayor aceptabilidad. El biogás es un combustible excelente y económico para los motores de gasolina y diésel. Sin embargo, la potencia obtenida cuando se usa solo combustible líquido, a medida que los motores utilizan biogás se calientan más que los combustibles líquidos y su coagulación debe mantenerse en buenas condiciones.

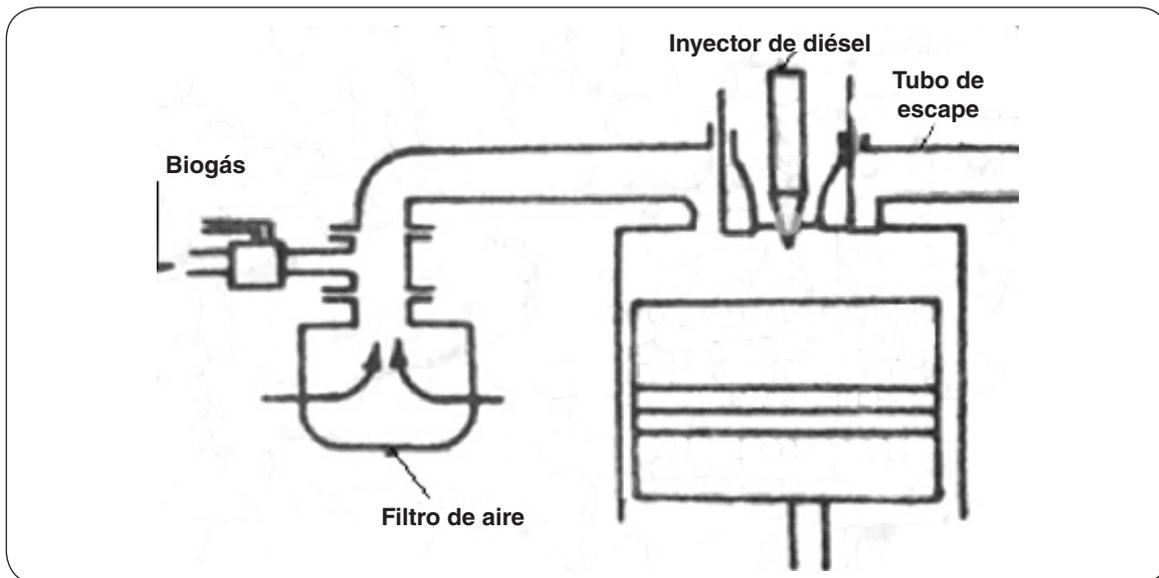


Figura 1.5 Motor de diésel modificado para funcionar con biogás (Khandewal y Mahdi, 1993)

Los motores de gasolina pueden funcionar al 100% con biogás, excepto que se consume más combustible (biogás) para arrancar. Los motores diésel se modifican a motores de combustible dual que usan tanto biogás como diésel. El biogás se introduce en la tubería de entrada después de que pasa a través del filtro de aire (Figura 1.5). Los dispositivos de entrada de gas están diseñados para adaptarse a diferentes diseños de motores y tuberías de entrada y para proporcionar la mezcla adecuada de biogás/aire. La inyección de un poco de diésel para encender las mezclas de gases en cada carrera es esencial para el funcionamiento normal del motor. Esto se debe a que en los motores diésel, la temperatura al final de la carrera de compresión generalmente no supera los 700 °C, ya que la temperatura de ignición de una mezcla de metano/aire es de 814 °C.

Los motores de combustible dual se comercializan como “motores de gas gobar”. Las capacidades de dichos motores varían de 3 a 96 B.H.P (Breake Horse Power, Potencia de freno). Como el consumo de biogás en los motores diésel es de aproximadamente 0.50 m³ de gas por hora por B.H.P., o 0.65 m³ de gas por hora por kW de electricidad, se requieren unidades de biogás de gran tamaño para hacer funcionar los motores. La cantidad de gasóleo ahorrado mediante el uso de biogás producido a partir de diferentes tamaños de unidades de biogás se indica en la Tabla 1.2 (Khandewal y Mahdi, 1993).

Tabla 1.2 Cantidad de diésel que se ahorra al usar un motor de combustible dual de 5 HP con biogás (Khandewal y Mahdi, 1993)

Tamaño de la unidad de biogás cm ³	Periodo de tiempo en el que el motor de 5HP está en funcionamiento a lo largo del día	Cantidad de diésel ahorrado litros/día
8	4 h	3.6
15	6 h y 30 min	5.8
25	12 h	10.8

Un uso muy común de las instalaciones de biogás es en plantas de cogeneración donde a continuación se explican dos tipos de instalaciones plantas de biogás en combinación con plantas de cogeneración (Madrid, 2012):

- **Instalación de biogás a partir de residuos orgánicos.** En este caso se parte de residuos vegetales y animales diversos. Los subproductos pasan en primer lugar a un molino donde se dividen finamente. Después pasan a dos estaciones de separación de materias inorgánicas y arena. La materia orgánica pasa entonces a la planta de biogás, donde en un digestor tiene lugar la fermentación anaerobia con producción de gas rico en metano (CH_4) o biogás. El biogás producido pasa a la planta de cogeneración, que produce electricidad que puede enviarse a la red de distribución o emplearse en la propia instalación. El calor útil que sale de la planta de cogeneración puede emplearse para calefacción o agua caliente de viviendas y edificios cercanos. Parte de ese calor útil también se utiliza en la planta de biogás en los procesos de calentamiento. Los materiales fermentados procedentes de la planta de biogás pasan a un separador, que envía la parte líquida a un depósito. Esas materias líquidas fermentadas se pueden utilizar como fertilizantes. Los productos sólidos del separador pueden sufrir una segunda descomposición.
- **Instalaciones de biogás a partir de productos vegetales cultivados (maíz, trigo, sorgo, etc.) y de purines de granjas de animales.** En este caso, los granos de cereal pasan a un sistema de preparación para acondicionarlos adecuadamente y poder sufrir la fermentación en el digestor. También los purines pasan a un depósito regulador antes de su entrada al citado digestor. El biogás obtenido, convenientemente tratado, pasa a la planta de cogeneración, para producir electricidad y calor útil. La electricidad se puede enviar a la red o bien se puede consumir en parte en la propia instalación. El calor útil se aprovecha para calefacción de edificios o viviendas, y otra parte se envía al digestor para los procesos de calentamiento. Los materiales fermentados procedentes del digestor pasan a un depósito y pueden emplearse como fertilizantes.

La **Figura 1.6** es la representación, de manera resumida, de lo que se describió a detalle en los puntos anteriores como las formas de obtención del biogás y comúnmente cómo es utilizado éste.

1.3 Algunos ejemplos en el mundo del uso del biogás

Los sistemas para la obtención del biogás toman importante difusión en Europa durante la Segunda Guerra Mundial, específicamente Francia y en Italia, si bien es cierto que instalaciones de estas características ya funcionaban en París, Estrasburgo, Múnich, Zúrich, Stuttgart, Haifa, etc., habiendo sido adoptado en Estados Unidos y otros países (Lemme, 1985).

En lo que se refiere al uso de biocombustibles gaseosos a nivel mundial destaca su introducción en Asia, que es el continente que más instalaciones de biogás ha construido.

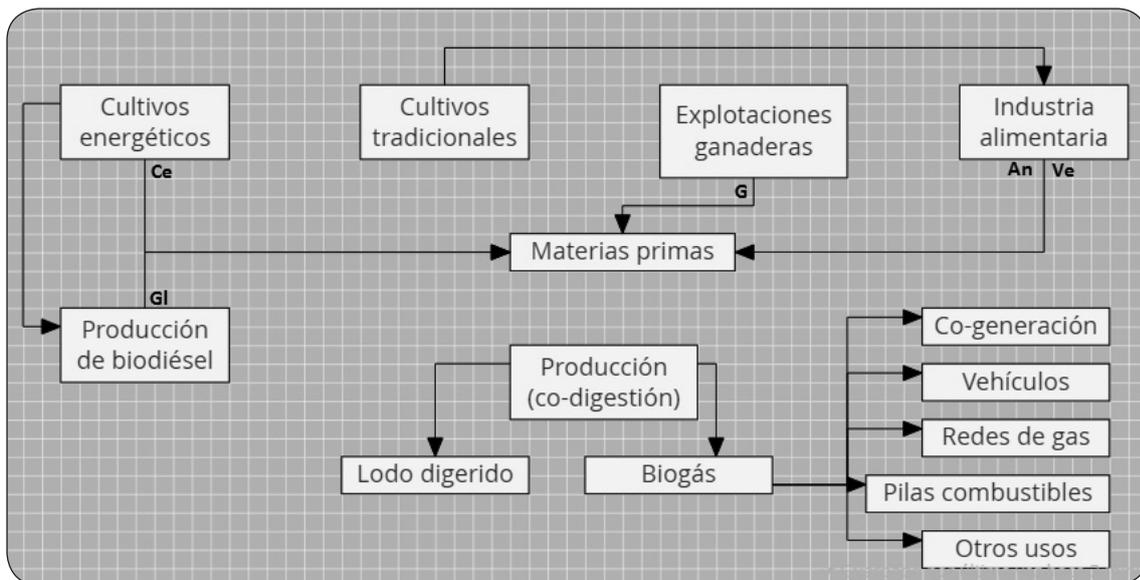


Figura 1.6 Obtención del biogás y sus usos (Madrid, 2012)

En China, el 70% del combustible para uso doméstico en las zonas rurales proviene de la descomposición de la paja y los tallos de cultivos. En India, más de medio millón de personas se han servido de plantas de biogás como combustible doméstico, y hoy en día existen plantas demostrativas multifamiliares donde el gas se hace llegar por tuberías a cada vivienda por un precio módico (Fernández, 2009).

La India dispone desde 1939 de una estación experimental exclusivamente dedicada a estudiar diseños de digestores, gasómetros y artefactos para uso de biogás, además del ensayo de distintas materias orgánicas que aumentan la eficiencia y el rendimiento de los sistemas tanto en climas cálidos como fríos. China es el país donde más se ha avanzado en la implementación práctica de los reactores anaerobios rurales, donde existen ya más de siete millones en funcionamiento (Lemmme, 1985).

En Japón, han desarrollado un sistema que consigue fermentar también el hidrógeno, además del metano, separadamente, lo que amplía los residuos a utilizar para la obtención de biogás, como los desechos de cocinas, por ejemplo (Fernández, 2009). En el área de la investigación pura se encuentran en los Estados Unidos equipos de prestigiosos investigadores que, en las universidades, están dedicados a dilucidar los más variados aspectos de la compleja fermentación anaeróbica en sus fases ácida y metanogénica, la relación entre ellas y optimización de procesos de producción de biogás (Lemmme, 1985).

En Estados Unidos, existen incluso algunas plantas de biogás de gran tamaño, mientras que en América Latina se hacen esfuerzos aislados en distintos países (Fernández, 2009). En septiembre de 2008, la ciudad de San Antonio en el estado de Texas en Estados Unidos, anunció un proyecto para ser la primera ciudad en el país en procesar en su totalidad de aguas residuales para producir biogás. La idea es procesar por lo menos el 90% de las aproximadamente 140,000 toneladas de residuos producidos por sus ciudadanos, en biogás, agua para irrigación, y residuos sólidos para uso como fertilizantes. El biogás será

utilizado para la generación de electricidad. Una vez completada, se espera que la planta genere entre 900,000 a 1.5 millones metros cúbicos de gas por día (Costa, 2013).

En Canadá, Francia y Alemania, así como también en Australia, se experimentan nuevos diseños y materiales para el diseño de las plantas de biogás, al par que se profundizan las investigaciones de los aspectos microbiológicos, con miras a optimizar los procesos y a la obtención de nuevas cepas que aceleren la fermentación metanogénica y reduzcan el tiempo de retención dentro del reactor anaerobio, así como también que no requieran de temperaturas elevadas para desarrollar plena actividad (Lemmme, 1985).

En Europa, existen más de 500 instalaciones productoras de este gas biológico, Holanda y Dinamarca son los países que marcan la pauta.

En España, la implantación es menor respecto al resto de Europa. En el campo de las aguas residuales existe en industrias azucareras o cerveceras. Concretamente con el estiércol, tanto como de vacuno como de porcino, ha habido algunas plantas piloto, pero ahora mismo a escala industrial no hay ninguna. En estos temas se investiga fundamentalmente desde las universidades. Su aplicación a escala industrial dependerá de las exigencias medioambientales y de los precios del coste de la energía (Fernández, 2009).

El biogás es prioridad nacional en Suecia. Este sector no sólo se dedica a la producción de electricidad (54 GWh en 2006) y calor (20.7ktep), sino también a la producción de combustible para vehículos. Un gran ejemplo es un tren de la ciudad de Linköping que funciona 100% con biogás, este proviene de la planta de extracción de biogás de la ciudad. Esta instalación tiene hoy la capacidad de extraer hasta 1,000 m³ de gas metano por tonelada de material orgánico, el tren llamado “Amanda” funcionaba originalmente con diésel y fue adaptado para trabajar con biogás, consiguiendo velocidades de hasta 128.7475 kph (Costa, 2013).

En Jaén, España, funciona una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos. Por el proceso de “biometanización” se fermentan los residuos. La planta es capaz de tratar unas 90,000 toneladas anuales de residuos sólidos, que se convierten en 16,000 toneladas de compost. De aquí se obtiene el gas y después la electricidad. Se producen así 800 kWh, equivalentes a 5.6 millones de kW año.

“El *proyecto singular y estratégico PROBIOGÁS* integra un conjunto de actividades de carácter científico y tecnológico que están interrelacionados entre sí y que tienen como objetivo común el desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás en entornos agroindustriales, así como la demostración de su viabilidad y promoción en España (Madrid, 2012).

Alcance del proyecto. Las actividades de PROBIOGÁS se centran en el biogás obtenido con materiales de origen agroindustrial, diferenciándose del que tiene su origen en vertederos o en depuradoras urbanas, e incluso del biogás producido con la fracción orgánica de residuos municipales.

El “entorno agroindustrial” definido en PROBIOGÁS engloba principalmente actividades de tipo agrícola, ganaderos y de las industrias alimentarias, así como otras actividades que podrían compartir este escenario en un futuro (cultivos energéticos o las industrias bioenergéticas). Las actividades desarrolladas en dicho entorno generan residuos biodegradables potencialmente utilizables en la producción de biogás.

Otro aspecto relevante a destacar en el alcance del proyecto PROBIOGÁS es que todas las técnicas de digestión que se van a estudiar emplean siempre el concepto de codigestión, que consiste en el tratamiento anaerobio conjunto de residuos orgánicos de diferente origen y composición (Figura 1.6), con el fin de aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de procesos más eficaces, compartir instalaciones de tratamiento, unificar metodologías de gestión, amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado, así como reducir costes de inversión y explotación.

PROBIOGÁS se centra en el estudio de la codigestión de combinaciones de residuos agroindustriales con mayor peso y potencialidad energética en España (Madrid, 2012).

Tabla 1.3 Materias primas para la producción de biogás agroindustrial (Madrid, 2012)

Grupo de materias primas	Ejemplos
Residuos ganaderos	Purín de cerdo, estiércol de vaca, gallinaza y restos de otras especies.
Residuos alimentarios de origen animal	Residuos cárnicos, lácteos y del pescado.
Residuos alimentarios de origen vegetal	Residuos hortofrutícolas (excedentes, no conformes, subproductos de su transformación, etc.). Ejemplos: residuos cítricos, del olivo y las almazaras, etc.
Cultivos energéticos	Cultivos energéticos terrestres o microalgas.
Residuos de industrias bioenergéticas	Glicerina, subproductos vegetales de la producción de biodiesel o bioetanol.

1.4 Parámetros de operación de una planta de biogás

La degradación anaerobia es un proceso que requiere de la colaboración de distintas especies bacterianas para llevar a cabo las tareas específicas en cada una de las fases de que consta este tratamiento. Al tratarse de seres vivos, las bacterias demandan un entorno adecuado para su supervivencia y reproducción, lo cual incide decisivamente en el desempeño global de la degradación anaerobia. Del conjunto de microorganismos, las bacterias productoras de CH_4 , sobre las que recae la mayor parte de la estabilización del sustrato por medio de la síntesis de ese gas, son las más delicadas y de lento crecimiento. Su adaptación a cambios repentinos en las condiciones de operación demora un tiempo considerable, de ahí la trascendencia de procurar que los parámetros básicos se mantengan los más estables posible (Juárez, 2012).

1.4.1 Parámetros químicos

En la **Tabla 1.4** se conjuntan una serie de valores de referencia de los parámetros químicos más relevantes de la degradación anaerobia cuando ésta es aplicada a la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) bajo distintas concentraciones de sólidos en el sustrato de alimentación.

Tabla 1.4 Parámetros químicos relativos a la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Tchobanoglous y col., 1994)

Parámetro	Sólidos de baja concentración	Sólidos de alta concentración
Concentración de sólidos %	8 a 10 (Típico: 4-8)	20 a 35 (Típico: 22 a 28)
Carga de sólidos kg/m ³ día	0.6 a 1.6	6 a 7
Producción de biogás m ³ /kg-SV	0.5 a 0.75 (CH ₄ , 55%; CO ₂ , 45%)	0.625 a 1 (CH ₄ , 50%; CO ₂ , 50%)
Destrucción de ST %	40 a 60	Variable según la composición del sustrato
Destrucción de STV %	60 a 80	90 a 98
pH	de 6 a 8	de 6 a 8

1.4.2 Parámetros físicos

En la **Tabla 1.5** se conjuntan una serie de valores de referencia de los parámetros físicos más relevantes de la degradación anaerobia cuando ésta es aplicada a la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) bajo distintas concentraciones de sólidos en el sustrato de alimentación.

Tabla 1.5 Parámetros físicos relativos a la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Tchobanoglous y col., 1994)

Parámetro	Sólidos de baja concentración	Sólidos de alta concentración
Temperatura °C	30 a 38 55 a 60	30 a 38 55 a 60
Tiempo de retención días	10 a 20	20 a 30

1.5 Planta de biogás en Ciudad Universitaria

La instalación de los elementos que conforman la planta generadora de biogás se efectuó, en términos generales, de forma aceptable. Se tuvieron en cuenta pautas y recomendaciones surgidas de autores y organizaciones especializadas en la producción y aprovechamiento de biogás en unidades sencillas a pequeña escala en distintas locaciones. De igual modo, se buscó profundizar en el entendimiento del fenómeno de la degradación anaerobia de materia orgánica con la intención de dilucidar una configuración de los equipos que favoreciera la estabilidad y eficiencia del proceso. Aunque al tratarse de un tema sumamente vasto, el nivel logrado de inmersión en él, fue más bien somero. Pudo conocerse tan sólo de los conceptos y fundamentos que describen y explican esta peculiar transformación bioquímica de la biomasa. Si bien ayudaron en buena medida a identificar las principales variables o parámetros de control, así como a advertir las más serias ventajas, inconvenientes y limitaciones del proceso de degradación anaerobia de biomasa residual.

De igual modo, se abordaron los tópicos referentes al manejo y aprovechamiento con fines energéticos del biogás. La composición y, por consiguiente, las propiedades específicas de este combustible alternativo imponen una serie de adecuaciones y medidas de seguridad particulares. Lo anterior no sólo con objeto de minimizar los riesgos físicos y toxicológicos asociados a la producción, almacenamiento y utilización del biogás, sino también para conseguir una conversión eficiente del biogás para los usos finales que se tengan previstos.

Por la disponibilidad de espacio y la nula interferencia con la realización de las actividades cotidianas del restaurante “Cibarium”, la sección posterior del establecimiento fue elegida para la edificación de la infraestructura de resguardo de la parte medular de la planta, esto es, los reactores anaerobios y los equipos para el procesamiento de los residuos orgánicos. Dicha infraestructura consistió básicamente en un pequeño habitáculo con las dimensiones indicadas en la **Figura 1.7** y la apariencia aproximada mostrada en la **Figura 1.8**. Con una altura de los muros de 3.0 m, el habitáculo cuenta con un único acceso de 2.60 m, anchura suficiente para permitir la ejecución de maniobras de distinta índole, como puede ser la entrada y retiro de equipos, por citar un ejemplo. La construcción del habitáculo se inició a comienzos de febrero del año 2011 y su conclusión demoró alrededor de tres meses.

Adicionalmente se construyeron los estanques de sedimentación, el primero con una capacidad de 0.80 m³ y el segundo de 0.40 m³, lo que hace un total de 1.20 m³. En el primer estanque se depositan los lodos digeridos extraídos directamente del reactor R-II, ahí mismo se separan sus fases sólida y líquida trasladando esta última al segundo estanque. También se encargó la construcción de pequeña base de concreto para el empotramiento de la bomba de cavidad progresiva. La ubicación de esta base así como la de ambos estanques de sedimentación, se aprecian en la **Figura 1.9**.

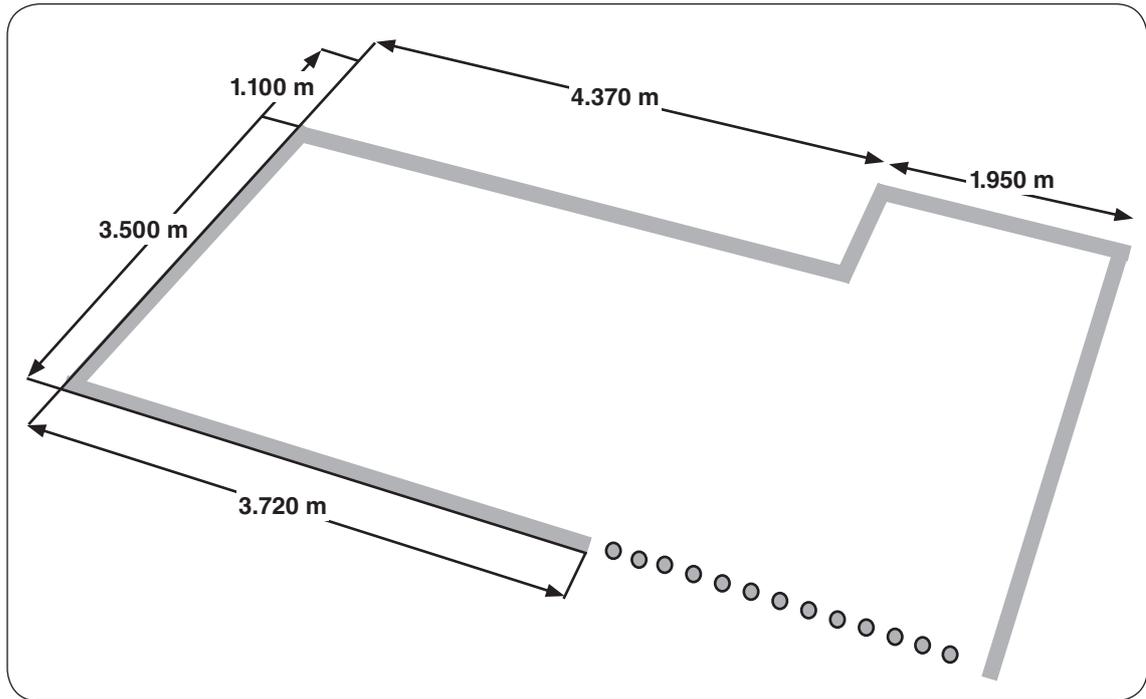


Figura 1.7 Dimensiones del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento (Juárez, 2012)

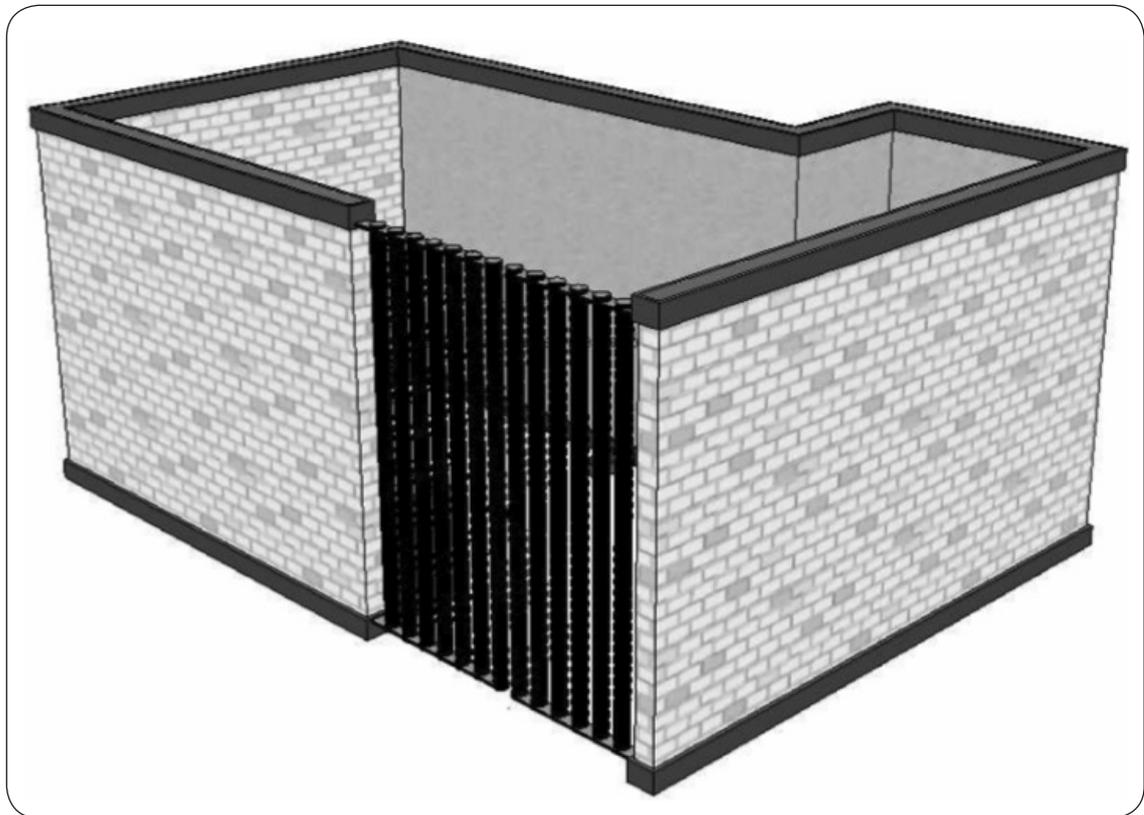


Figura 1.8 Vista isométrica del habitáculo para resguardar los componentes del tren de tratamiento (Juárez, 2012)

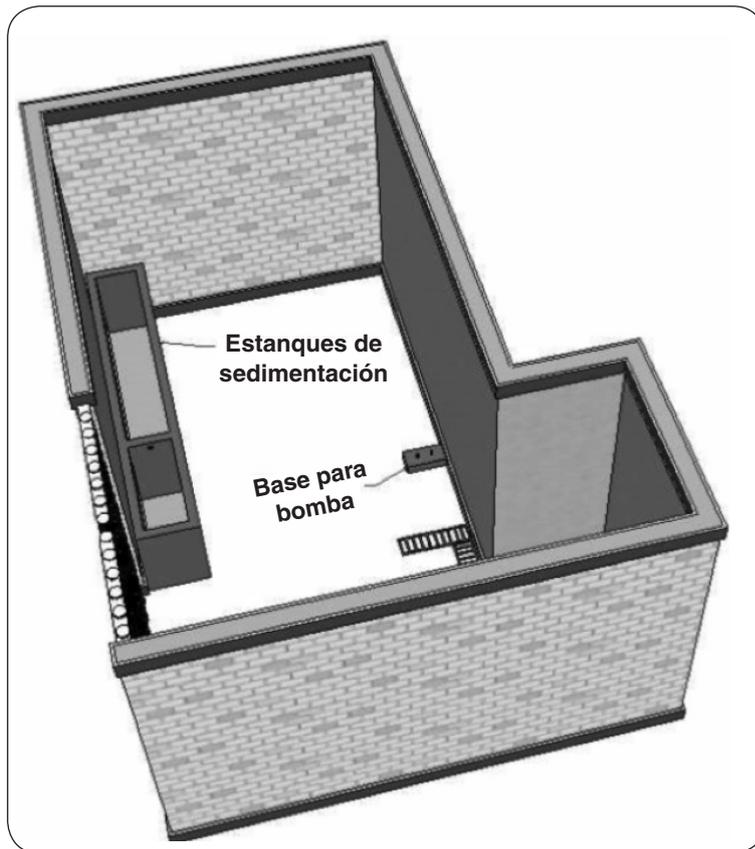


Figura 1.9 Geometría y ubicación de los estanques de sedimentación y de la base para la bomba (Juárez, 2012)

Concluido el habitáculo, se dieron instrucciones para efectuar el traslado de los reactores anaerobios y del resto de los equipos, junto con piezas de herrería diseñadas ex profeso para la instalación y aseguramiento de equipos como el triturador y la bomba para suministrar el sustrato a los digestores. Dado que se manipulan materiales de desecho, se consideró conveniente incluir una tarja para el lavado de los implementos de trabajo y el aseo del personal que esté en funciones en la planta. También se colocó una lámpara para iluminar por las noches, en caso de que se requiera atender algún asunto o contratiempo en esas horas.

Con los reactores anaerobios ubicados en sus sitios respectivos, se dio paso a la colocación de la tubería para la conducción del sustrato, que comunica entre sí a los digestores y a éstos con la bomba de alimentación, el tanque receptor de sustrato y los estanques de sedimentación de los lodos digeridos. Se colocaron también las terminales para la evacuación periódica del sustrato remanente en las líneas de conducción. Para la instalación de toda esta tubería se contó con el apoyo de estudiantes prestadores de Servicio Social. Su labor comprendió, entre otras cuestiones, la medición, corte y unión de los diferentes tramos de tubería con los conectores y válvulas de acuerdo al diagrama de flujo anteriormente presentado.

Gracias a que se empleó tubería de PVC, la instalación de los conductos fue relativamente sencilla. La tubería de PVC es fácil de cortar y unir, sin exigir demasiada pericia por

parte de quien lo realiza, esto permitió que se concluyera en tiempo más o menos breve la instalación de la línea de conducción de sustrato. En algunas secciones de esta línea de conducción se optó por utilizar manguera de PVC, ya que al ser flexible facilitó enormemente las conexiones que con tubo rígido se antojaban complicadas. La tubería de PVC tiene grandes ventajas como su bajo costo y fácil reparación, aunque su durabilidad se ve sensiblemente disminuida por la exposición a la radiación solar directa. No obstante, dado que se colocó una tubería de pared gruesa, es de esperarse que su deterioro se perciba, si acaso, al cabo de varios años.

El triturador de los residuos se colocó sobre una estructura de hierro que lo sitúa a una altura tal que permite que el sustrato obtenido se deposite directamente en el tanque receptor, sin que ello complique el vertido de los desechos en la tolva acoplada al aparato. El tanque receptor de sustrato consiste llanamente en un tambo metálico recortado a una altura aproximada de 50 cm. Su aforo máximo es cercano a 150l, esto es más del doble del volumen promedio diario de sustrato que se prevé producir con los residuos orgánicos del restaurante. Cerca de la base del tanque receptor de sustrato se hizo un orificio al que se le adaptó un conector plástico para que desde ahí la bomba succione el sustrato.

Asimismo, se le sobrepuso una tapa, también metálica, para evitar el salpique de sustrato y aminorar en alguna medida la propagación de olores. La bomba, en tanto, se afianzó en su base de concreto con un par de tuercas y tornillos ordinarios de la medida apropiada, Se vigiló que la relación de alturas de dicha base y la del tanque receptor de sustrato permitiera el cebado automático de la bomba, esto con la finalidad de agilizar el procedimiento de alimentación al reactor anaerobio R-I. La bomba quedó protegida con una estructura metálica tipo jaula para guarecerla de la lluvia e igualmente para disuadir posibles actos de pillaje. La **Figura 1.10** da cuenta de las posiciones al interior del habitáculo de la tarja, el triturador de residuos, del tanque receptor de sustrato, de la bomba de alimentación de sustrato, de los dos reactores anaerobios y de los estanques de sedimentación.

Una vez concluido el montaje de los componentes del sistema para el tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos, la siguiente etapa consistió en la instalación de la tubería para la evacuación del biogás de los digestores, su conducción a los dispositivos de remoción de impurezas y finalmente su almacenamiento en el reservorio. En el diseño preliminar de la planta de biogás se consideró una manguera de polietileno de alta densidad (PEAD) para la canalización del biogás. La elección respondió, entre otras razones, por su sobresaliente resistencia a la intemperie y tolerancia a los compuestos ácidos y corrosivos presentes en el biogás. Las uniones entre los diferentes segmentos de la tubería, así como con sus piezas accesorias, se llevaron a cabo mediante soldadura por termofusión. Durante la colocación de la tubería de conducción de biogás, se tuvo en cuenta dotar de la pendiente mínima necesaria a la tubería para no dar lugar a eventuales obstrucciones por acumulación de vapor condensado. Esta inclinación se observa tanto en la tubería a la salida de ambos reactores anaerobios como en el ramal principal. Se dispuso además una trampa de condensación con su respectiva válvula para la purga ocasional del líquido que se vaya depositando.

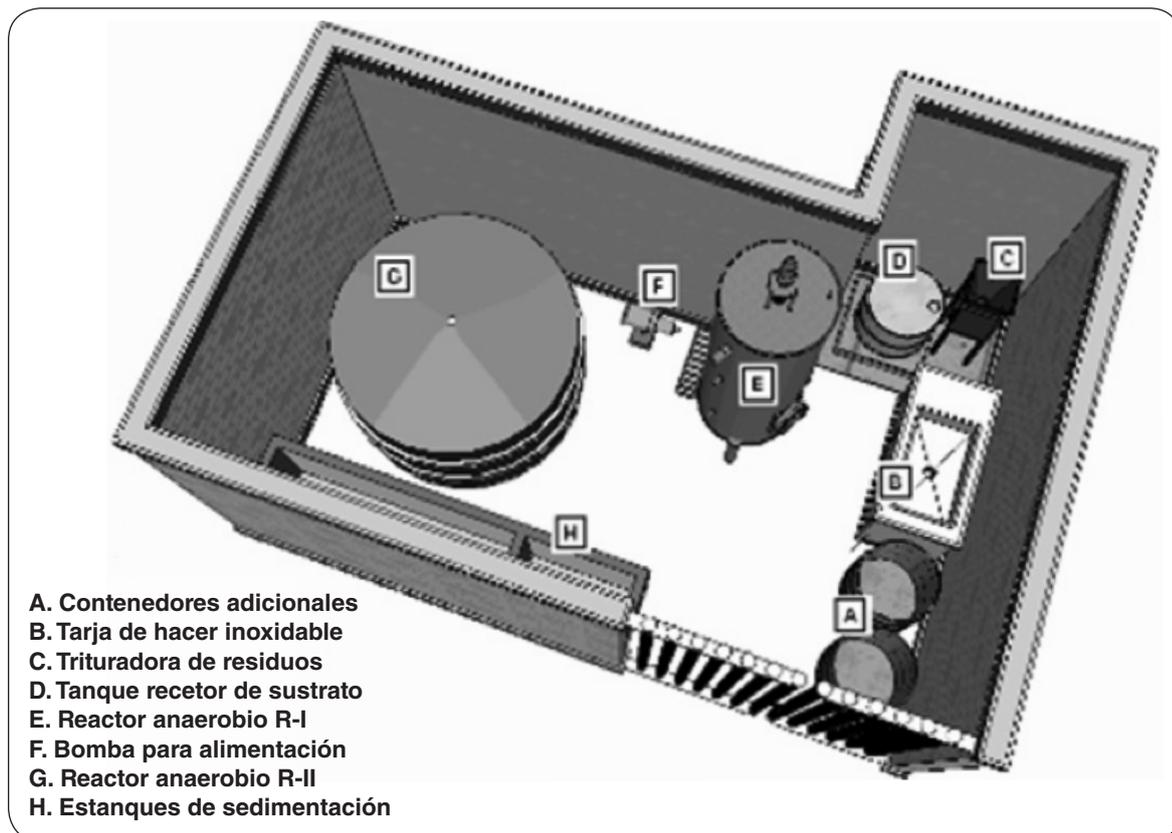


Figura 1.10 Ubicación final de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio (Juárez, 2012)

En la azotea vecina más cercana al habitáculo se instalaron los componentes para la limpieza y almacenamiento del biogás. El filtro para la remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S) se sujetó en el interior de una jaula de hierro de dimensiones proporcionales al tamaño del filtro. La utilización de la jaula responde a motivos similares a los que hicieron necesaria la protección la bomba de alimentación de sustrato. El lecho del filtro está formado por tres madejas idénticas de óxido de hierro (Fe_2O_3) en la forma de filamentos. Este es el lecho de Fe_2O_3 que se deberá regenerar y, en su caso, reemplazar teniendo presentes los tiempos pronosticados durante el diseño del sistema. Junto al filtro de H_2S , se instaló un serpentín metálico el cual se desempeña como un condensador del vapor de agua que no hubiese sido eliminado en la trampa de condensación o por expansión en frío en la cámara del lecho de remoción de H_2S . Tanto el serpentín como el desulfurador cuentan con tapones roscados para el drene del vapor de agua que eventualmente se condense.

El otro extremo del serpentín está conectado con el flujómetro de desplazamiento positivo tipo diafragma por medio del cual se registra el volumen diario de biogás que se obtenga de ambos reactores anaerobios. El flujómetro se aseguró con firmeza a una columna aleada y se envolvió igualmente con una malla metálica a modo de evitar en la medida de lo posible que sea hurtado. Luego del flujómetro viene el reservorio de baja presión. Éste se colocó directamente sobre la superficie del terrado. Cabe apuntar que el material del que está fabricado el reservorio, lona con recubrimiento de PVC, es sensible a la radiación so-

lar directa, lo cual obliga a inspeccionar de manera regular el estado del material en busca de agrietamientos en su superficie exterior. En contraparte, las picaduras en este material es posible repararlas con sólo aplicar una cantidad suficiente de adhesivo para tubería de PVC en la zona donde se localice la abertura.

Con respecto a la presión de almacenamiento del biogás, existe la posibilidad de incrementarla algunas unidades mediante la superposición de pesos sobre el reservorio. La fuerza debida a la masa de esos cuerpos y a la acción de la fuerza gravedad, provocaría un efecto moderado de compresión del biogás contenido en el reservorio. Con ese cambio en la presión del biogás podría lograrse, de ser necesario, el nivel óptimo para el correcto funcionamiento de los quemadores del equipo de combustión. A la salida del reservorio, mediante una derivación de la tubería principal, se montó el manómetro tipo U. Este manómetro está pensado para funcionar además como válvula de alivio para el control de la presión del biogás. El rango de dicho manómetro, que dicho sea de paso es una de las varias manualidades que improvisaron durante la instalación de la planta, se estableció en 1 metro de H₂O con una resolución de 0.01m de H₂O. Una vez puesta en marcha la planta, puede suceder que el umbral de activación de la válvula de alivio no sea el adecuado, muy bajo o demasiado alto. En ese caso bastaría con acortar el rango del manómetro para ajustar el umbral de activación al valor que convenga. En el mismo manómetro, se dejó una pequeña saliente para la toma de muestras de biogás que ayudarán en la identificación y cuantificación de sus componentes.

Para finalizar, se agregó un arresta-llamas o trampa de llama construido por cuenta propia del tesista. La posición en que se encuentra la trampa de llama con relación al resto de los componentes, tiene el propósito de protegerlos, primordialmente al reservorio y a los digestores, de un posible aunque poco probable retorno de una llama desde el equipo de combustión. Luego del arresta-llamas, el biogás se dirige a la estufa para ser utilizado en la producción de energía térmica. La **Figura 1.11** es una representación computacional que muestra la ubicación en el terrado los equipos que integran dicho sistema.

El último tramo de la instalación comprendió la colocación de los aditamentos para el suministro del biogás a los quemadores de la estufa situada en una sección exterior del restaurante. Del arresta-llamas se tendió otro segmento de tubería de PEAD hasta que se consiguió sortear la distancia hasta la estufa. Una vez ahí, se definió un lugar apropiado para la colocación del regulador de presión y el segundo manómetro, este último de tipo compacto y analógico. La mejor opción para la colocación de esos equipos fue una de las esquinas interiores del mueble de la propia estufa. No obstante, a recomendación del personal del establecimiento, el cual alertó de constantes robos en la zona, se decidió hacer desmontable esa porción de la instalación. De este modo, serán los propios empleados del restaurante los encargados de colocar y retirar tanto el regulador de presión como el manómetro, los cuales, convenientemente, están unidos en una sola pieza.

Enseguida, una manguera ordinaria de plástico para gas conecta la salida del manómetro con la tubería que suministra el biogás al trío de quemadores del equipo de combustión.

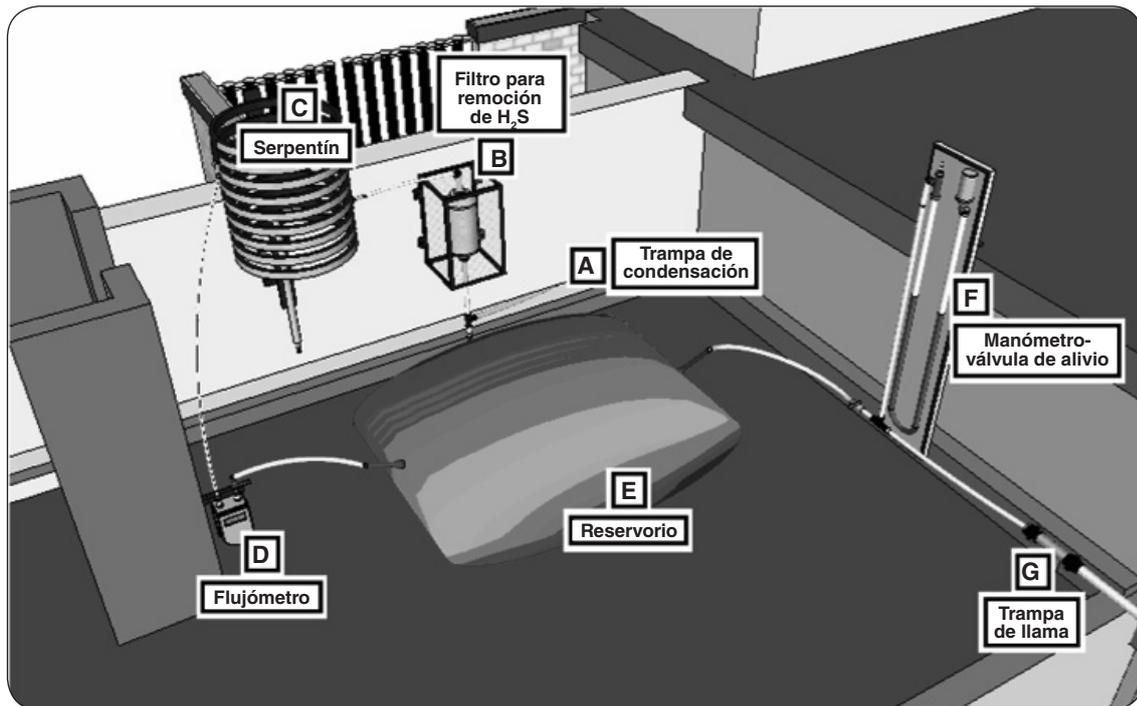


Figura 1.11 Arreglo final de los componentes del sistema para el manejo del biogás (Juárez, 2012)

Esta tubería es semejante a la que está montada en la estufa para el aprovisionamiento del gas LP a sus tres quemadores. Con aquella, el único inconveniente reside en el material con que están fabricadas las llaves que conectan con los quemadores. Al estar hechas de cobre, es posible que sean atacadas por algún compuesto o combinación de éstos que viaje en el biogás, como puede ser el ácido carbónico (H_2CO_3), formado de la comunión entre vapor de agua y dióxido de carbono. Para evitar correr este riesgo, hubiera sido deseable instalar llaves con idéntico diseño pero fabricadas con otro material, acero inoxidable, por ejemplo. Sin embargo, esto no pudo llevarse a cabo esencialmente por razones de tipo económico, pues la confección bajo pedido de dichas llaves sin duda resulta onerosa. En cambio, las llaves hechas de cobre son asequibles (su costo no suele exceder \$20.00) y fáciles de conseguir, de tal suerte que su eventual reemplazo no supone un asunto complicado. Los quemadores deberán ser calibrados en relación al diámetro del orificio del inyector y a la presión de alimentación del biogás, para así operar con seguridad y eficiencia el equipo de combustión. Una representación virtual de la posición del equipo de combustión con relación a los componentes que conforman el sistema para el manejo del biogás, se aprecia en la **Figura 1.12**.

Para terminar, la serie integrada por las **Figuras 1.13** a la **1.16** expone diversas perspectivas de un modelo virtual tridimensional donde es posible observar la ubicación de los diferentes sistemas que integran la planta generadora de biogás: El sistema para el tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos, el sistema para el manejo del biogás, y el sistema para el suministro del biogás a la estufa del restaurante (Juárez, 2012).

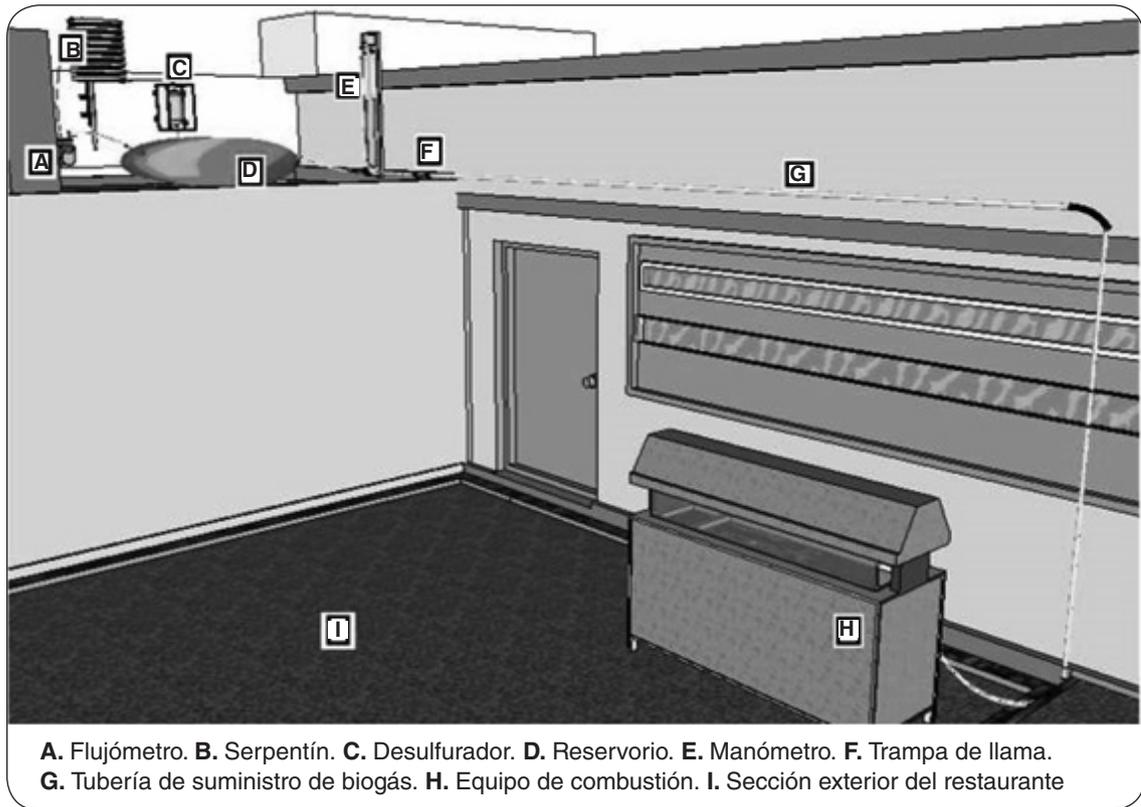


Figura 1.12 Ubicación relativa de los componentes para el manejo del biogás y del equipo de combustión (Juárez, 2012)

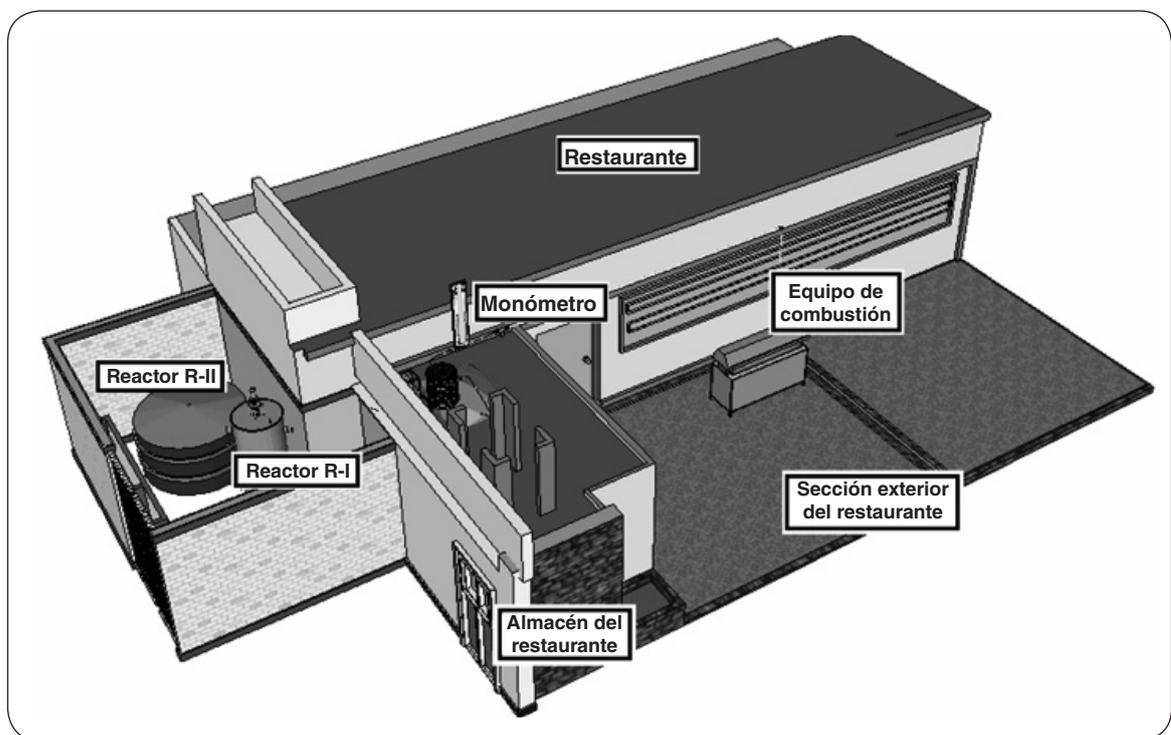


Figura 1.13 Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (Juárez, 2012)

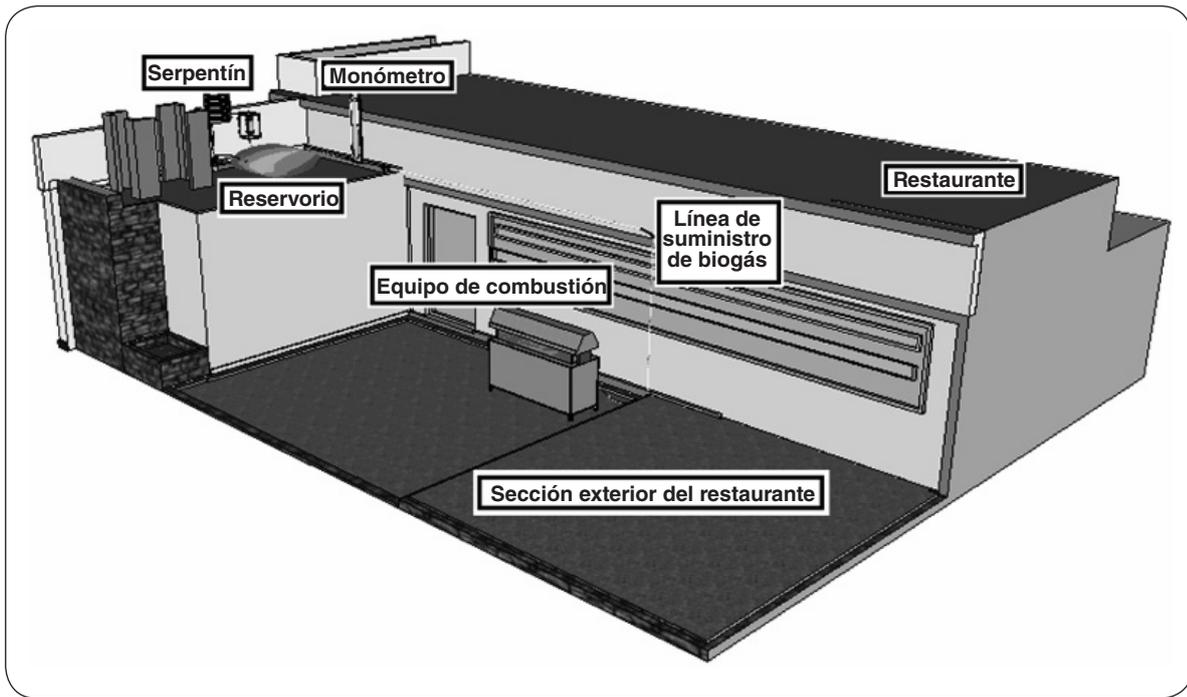


Figura 1.14 Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (Juárez, 2012)

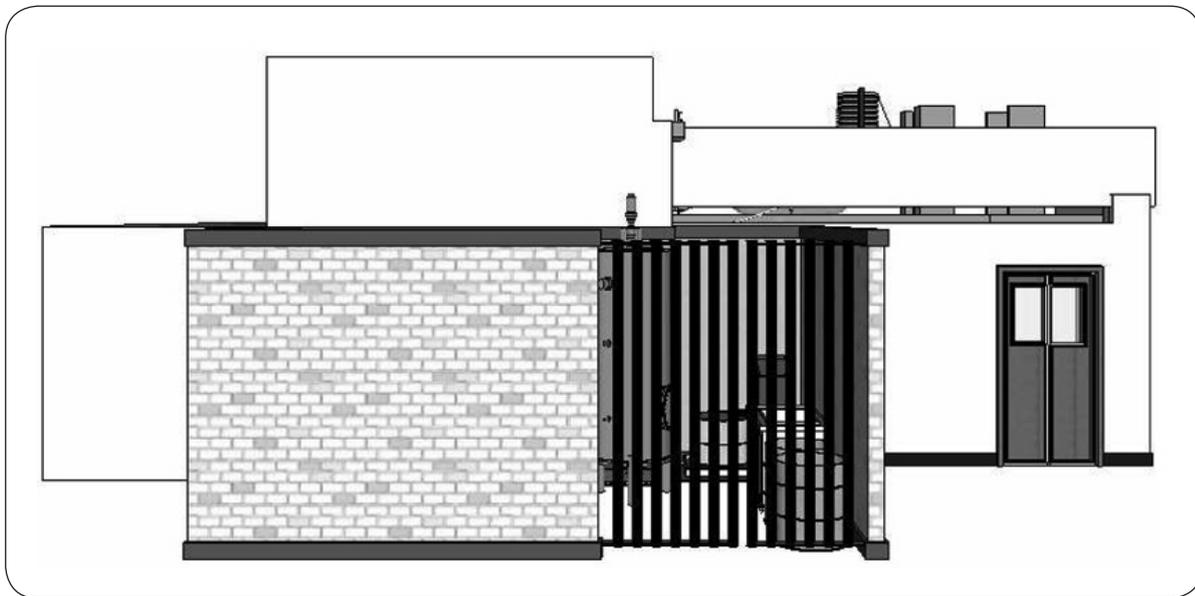


Figura 1.15 Vista frontal del habitáculo y de algunos otros componentes de la planta de biogás (Juárez, 2012)

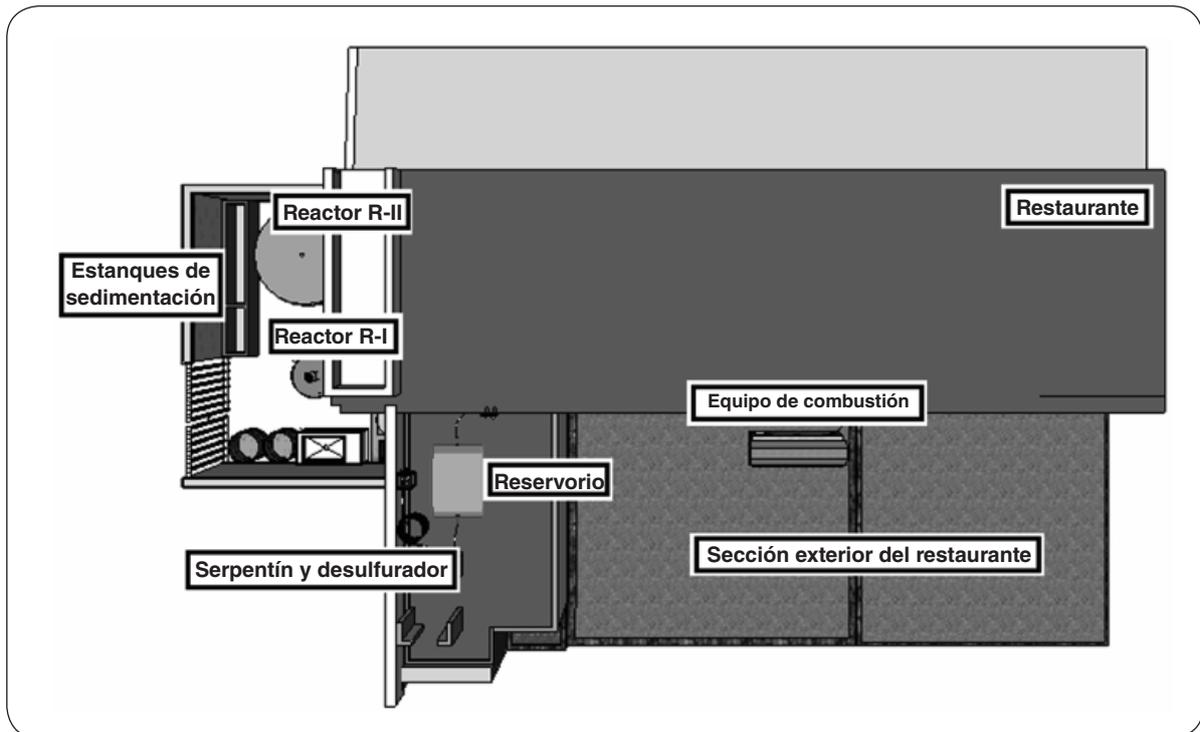


Figura 1.16 Vista superior de la planta de biogás donde se distinguen los sistemas para el tratamiento anaerobio de los residuos, para el manejo del biogás y para su aprovechamiento energético (Juárez, 2012)

1.6 Trabajos realizados en la planta de biogás en Ciudad Universitaria

Dentro de las instalaciones se llevan a cabo las actividades de recolección de biomasa, lo recomendable es ir a restaurantes cercanos a la planta, hay un convenio directo con un puesto de jugos, cocteles y ensaladas; ubicado frente al restaurante “Cibarium”, el cual consta de que los trabajadores reservan su basura orgánica y servible, esto es que separan en un bote la lechuga y la naranja ya que ésta no sirve en este tipo de planta debido a lo “fibroso” de estos productos y pueden atascar la tubería de la instalación de la planta productora de biogás y en otro bote de basura la basura orgánica servible para ser aprovechada dentro de la planta de biogás, entonces alguien de la planta pasa a recoger el bote con “basura” servible y lo transporta hasta la planta y de este modo los trabajadores del negocio de frutas se ahorran tiempo y energía al no tener que ir a depositar el bote hasta el contenedor designado para la basura orgánica.

Después de la recolección de la basura orgánica se hace una selección de lo servible para los reactores anaerobios y lo servible se corta en pequeños trozos como de 20 cm de perímetro y así luego se recolecta en contenedores especiales para ser pesados y después pasar al triturador junto con agua, que cabe destacar que el agua utilizada en el proceso es de la misma que se obtiene dentro de la producción de biogás; para lograr hacer una

biomasa de más o menos 60% consistencia líquida. Esta biomasa es depositada en el denominado tanque recolector de sustrato y ahí se revuelve con una pala especial para que quede una biomasa homogénea con un pH entre 6 y 8, de aquí es enviado mediante la tubería al reactor anaerobio R-I y ahí se activan las paletas especiales del reactor para que se sigan moviendo y esto último introducido sea una mezcla homogénea de biomasa dentro del reactor anaerobio, y así propiciar un gran ambiente para que las bacterias encargadas del proceso sobrevivan y se reproduzcan y así lograr una buena producción de biogás, de ahí en adelante es supervisar el proceso y la configuración de tuberías para que no existan riesgos de fugas de biogás o que afecte el proceso.

Por último se cambia la configuración de las tuberías y se hace recirculación dentro del reactor anaerobio R-II para que de igual manera se homogenice la biomasa y propiciar la buena producción de biogás y demás productos obtenidos, mientras se supervisa el proceso de mezclado también es importante liberar hacia el estanque los lodos digeridos y agua que sale del R-II, principalmente para tener una idea de cómo está resultando el proceso de producción de biogás en la planta, midiendo el pH que debe estar entre el 9 y el 11 en el medidor de pH y también visualizando que el agua a parte de obscura no contenga baba blanca, porque significaría que el biogás se está quedando dentro del reactor anaerobio y que hay obstrucción dentro de la tubería destinada al biogás.

Capítulo 2.

Manual de la planta de biogás en Ciudad Universitaria

2.1 Condiciones iniciales

La planta de biogás en Ciudad Universitaria fue diseñada para recolectar en los reactores anaerobios 40 kg/día (69.16 L/día) y así generar en promedio 6.1 m³/día de biogás (Juárez, 2012). La **Figura 2.1** se muestra el diagrama de la planta de biogás en Ciudad Universitaria parte exterior y alimentación al restaurante “Cibarium”, mientras que en la **Figura 2.2** se muestra el diagrama de la parte interior de la planta de biogás en Ciudad Universitaria, en la **Figura 2.3** se ilustra la planta prototipo de biogás dentro de las instalaciones del restaurante “Cibarium”, en la **Figura 2.4** se ilustra la disposición final de los elementos de la planta alta de la planta de biogás y por último la **Figura 2.5** es el diagrama de la planta baja de la planta de biogás y los elementos que la conforman. En la **Tabla 2.1** se ejemplifican algunos problemas típicos de la planta de biogás y efectos

Tabla 2.1 Problemas que comúnmente se tienen en la planta

Problema	Efecto
Bomba acoplada a motor trifásico de 1.35 kW	Debido al mal funcionamiento no hay recirculación adecuada
Transporte de biomasa	No hay forma de transportar fácilmente la biomasa y por lo tanto se limita la biomasa con que se alimenta al sistema
Control de pH	Debido a que no había recirculación adecuada del sustrato y que variaba mucho la alimentación no había un control adecuado de pH

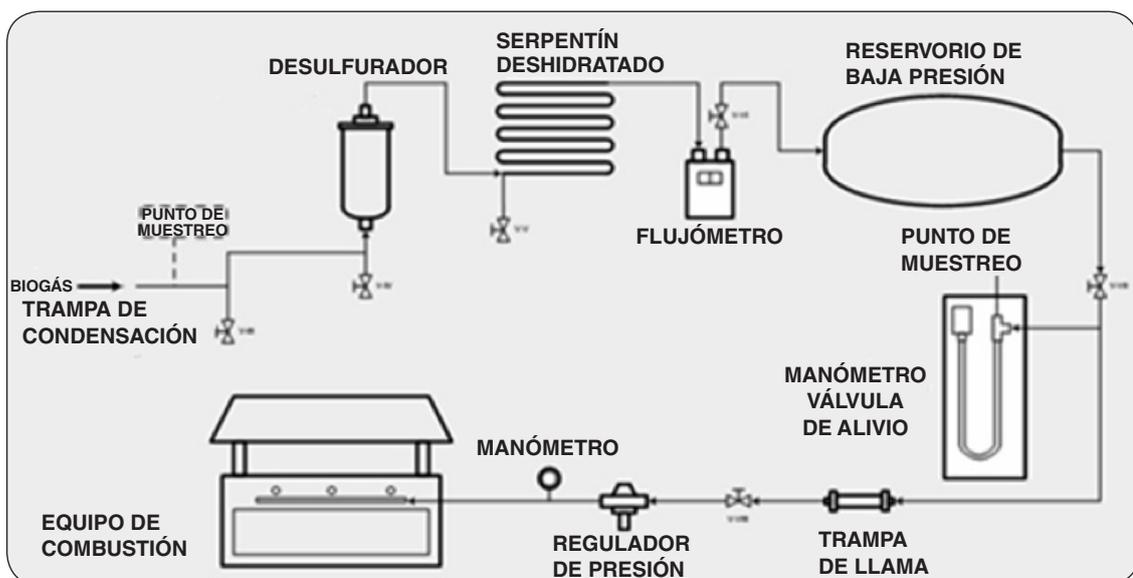


Figura 2.1 Diagrama de la planta de biogás en Ciudad Universitaria parte exterior y alimentación al restaurante “Cibarium” (Juárez, 2012)

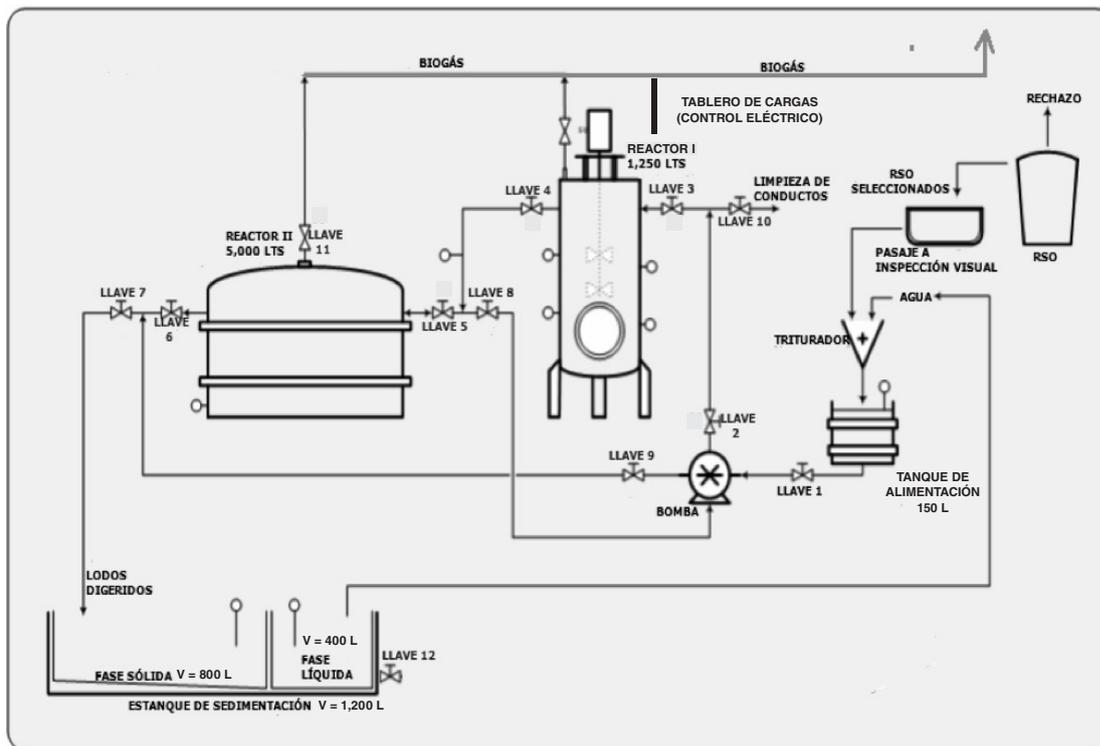


Figura 2.2 Vista frontal del habitáculo y de algunos otros componentes de la planta de biogás (Juárez, 2012)

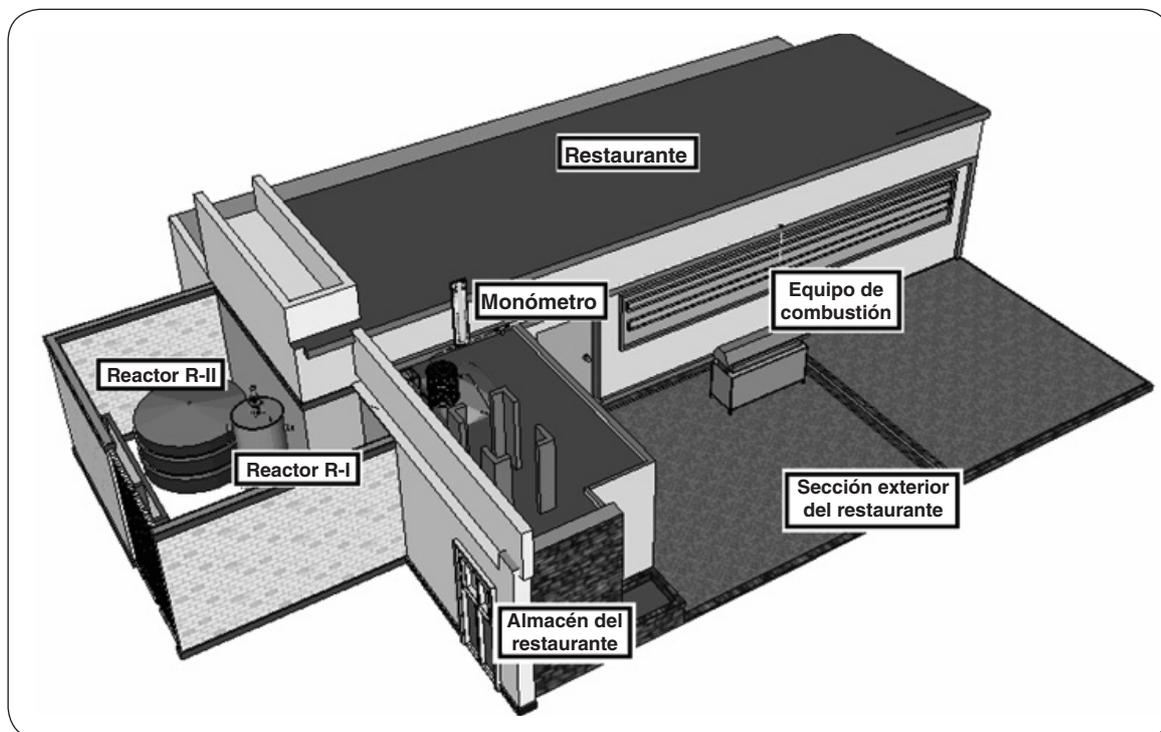


Figura 2.3 Localización de los componentes de la planta prototipo de biogás y elementos de su entorno inmediato (Juárez, 2012)

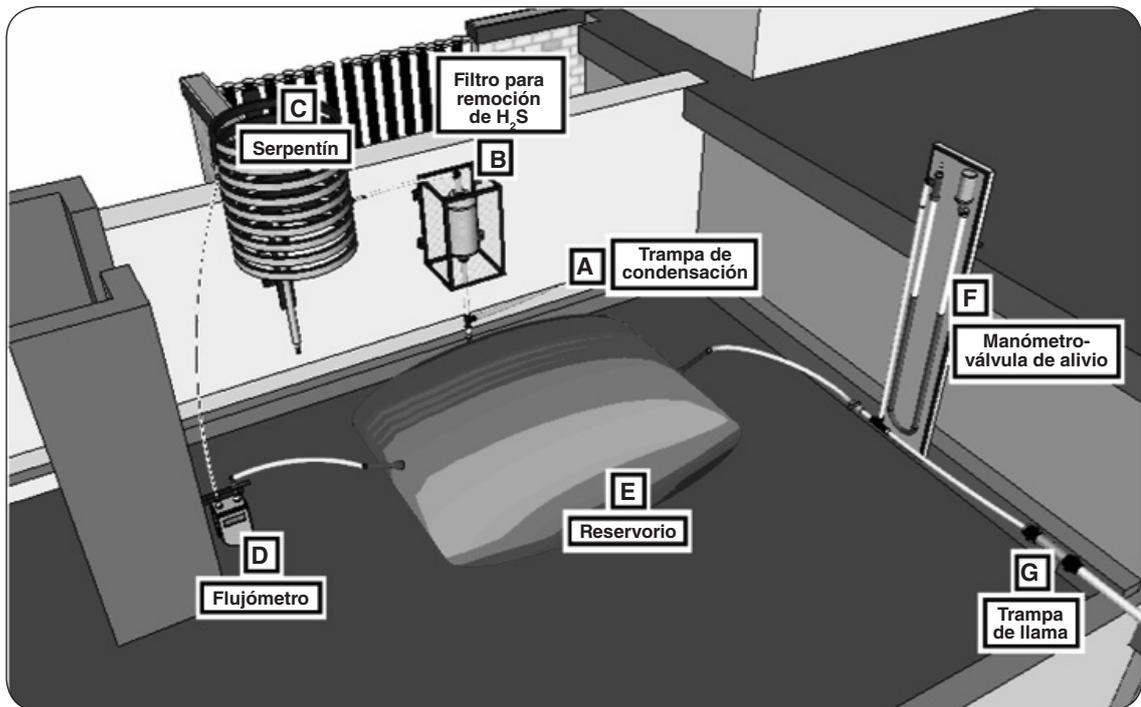


Figura 2.4 Arreglo final de los componentes del sistema para el manejo del biogás (Juárez, 2012)

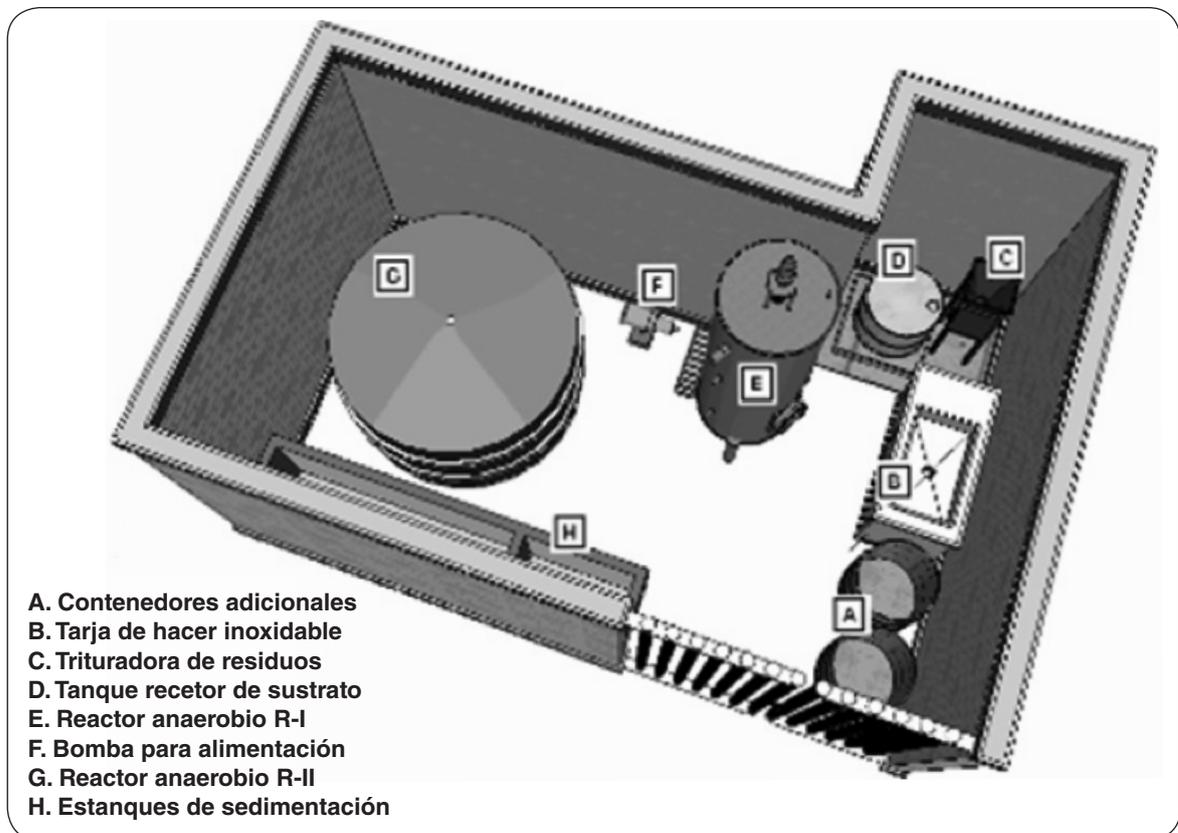


Figura 2.5 Ubicación final de los componentes del sistema de tratamiento anaerobio (Juárez, 2012)

Se debe iniciar anotando en bitácora las actividades en la planta (**Tabla 2.2**). Para ilustrarlo y analizarlo, en la **Figura 2.6** puede verse que el tiempo de mezclado es muy variable. Esto debido a que el funcionamiento de la bomba no es constante y tiene influencia en la producción de biogás promedio. Mientras en la **Figura 2.7**, se aprecia la alimentación, en litros, para cumplir con el objetivo de alimentar a los digestores con 69.16 L/día, por lo menos. En la **Figura 2.8** puede verse que apesar de que el TRH fue variable no hubo cambio en el pH del reactor, lo cual puede deberse a que se agregó una enzima anaerobia que mantuvo la operación constante.

El principal contratiempo por lo cual fue inestable la producción de biogás es que surgieron problemas con la bomba encargada de la recirculación dentro de la planta productora de biogás. La bomba, empezó a sobrecalentarse y a correr el riesgo de avería porque no era de la potencia ni de las características que especifica el proyecto, esto detuvo un tanto la producción y experimentación dentro de la misma planta productora de biogás.

La bomba (**Figura 2.9**) es de suma importancia para la planta, ya que es la encargada de introducir la biomasa al sistema, primero la introduce del tanque receptor de sustrato al reactor anaerobio R-I, donde también ayuda a recircular la biomasa en el reactor anaerobio R-II. La recirculación sirve para que haya homogeneidad en el proceso y así las bacterias encargadas de la fermentación de la biomasa tengan un ambiente apto para realizar su proceso de vida para de esta manera lograr una eficaz y próspera producción de biogás, por lo tanto la bomba debe tener un proceso de recirculación de entre una hora y media a dos horas y media; y así lograr la homogeneidad ideal y que no se quede de alguna manera “atrapado” el biogás dentro del sistema o se haga un ambiente donde las bacterias no sobrevivan y que no se produzca biogás, por eso la importancia del buen funcionamiento de la bomba.

Debido al mal funcionamiento de la bomba, por lo comentado por los compañeros anteriores, las labores principales de ellos fueron las de análisis de detección, corrección de problemas de la bomba y también el cálculo y análisis de sustitución para una bomba eficaz que sirva en el proyecto; concluyendo sustituirla por una bomba peristáltica, que es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo usada para bombear una gran variedad de fluidos y que precisamente su funcionamiento se asemeja al funcionamiento del aparato digestivo. Otra actividad primordial en la planta de biogás fue la de analizar cómo lograr acelerar el proceso de pre-trituración de la biomasa para que no se hiciera de manera manual y fuera más rápido el proceso, la conclusión de esto fue que se creó una máquina pre-trituradora de biomasa (**Figura 2.10**) y que sirvió de tesis de maestría de un compañero que laboraba en la planta productora de biogás.

Tabla 2.2 Bitácora de trabajo de la planta de biogás en Ciudad Universitaria

No. de día	Fecha	Tiempo de mezclado R-I min	Tiempo de mezclado R-II min	Volumen de alimentación L	pH del efluente	pH del influente	TRH semanas
1	29-feb-16	55	65	56	8	11	14.57
2	1-mar-16	55	65	50	8	11	16.29
3	2-mar-16	49	49	38	8	10	21.43
4	3-mar-16	55	65	54	8	11	15.14
5	4-mar-16	55	65	64	9	11	12.71
8	7-mar-16	55	65	63	8	11	13
9	8-mar-16	40	65	54	8	11	15,14
10	9-mar-16	49	49	41	8	10	19,86
11	10-mar-16	20	25	22	7	11	37
12	11-mar-16	20	25	27	8	11	30,14
15	14-mar-16	45	20	29	7	10	28.14
16	15-mar-16	55	65	55	7	11	14.86
17	16-mar-16	45	20	24	7	11	34
18	17-mar-16	55	65	75	8	11	10.86
19	18-mar-16	55	65	60	8	10	13.57
22	21-mar-16	55	65	58	7	11	14.14
23	22-mar-16	55	65	59	7	11	13.86
24	23-mar-16	49	49	25	8	10	32.57
25	24-mar-16	55	65	75	7	11	10.86
26	25-mar-16	55	65	65	7	9	12.57
29	28-mar-16	55	65	75	8	9	10.86
30	29-mar-16	50	55	54	8	11	15.14
31	30-mar-16	49	49	50	8	9	16.29
32	31-mar-16	25	20	20	7	11	40.71
33	1-abr-16	25	20	20	8	9	40.71
36	4-abr-16	40	25	35	7	9	23.29
37	5-abr-16	40	25	35	7	11	23.29
38	6-abr-16	20	20	24	8	11	34
39	7-abr-16	40	25	-	8	11	-
40	8-abr-16	55	65	-	8	11	-
43	11-abr-16	55	65	-	9	11	-
44	12-abr-16	55	65	-	9	11	-
45	13-abr-16	49	49	-	9	11	-
46	14-abr-16	55	65	-	9	12	-
47	15-abr-16	55	65	-	9	12	-
50	18-abr-16	55	65	-	9	12	-
51	19-abr-16	50	55	-	9	12	-
52	20-abr-16	49	49	-	9	11	-
66	4-mayo-16	10	15	-	9	11	-

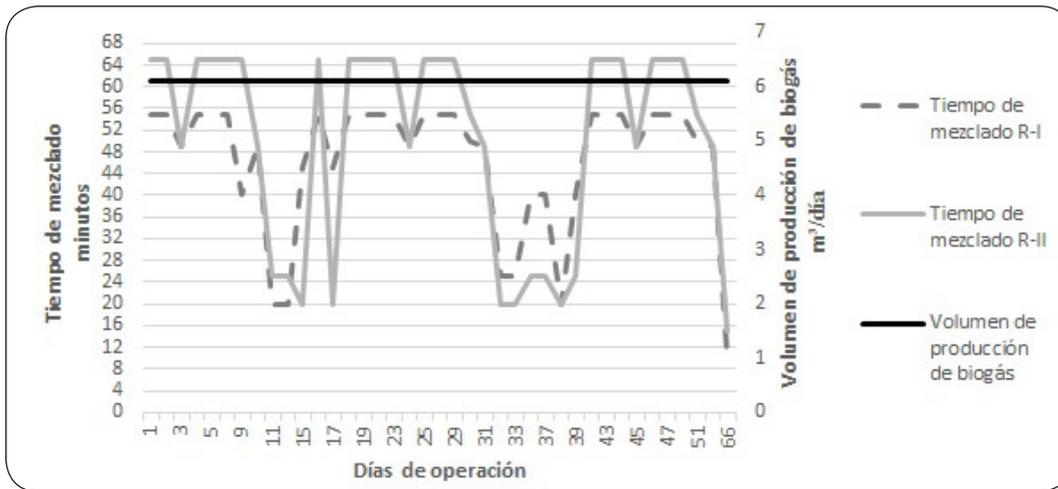


Figura 2.6 Comportamiento del digestor con respecto al tiempo de mezclado en ambos reactores anaerobios y a la producción que debería de haber de biogás

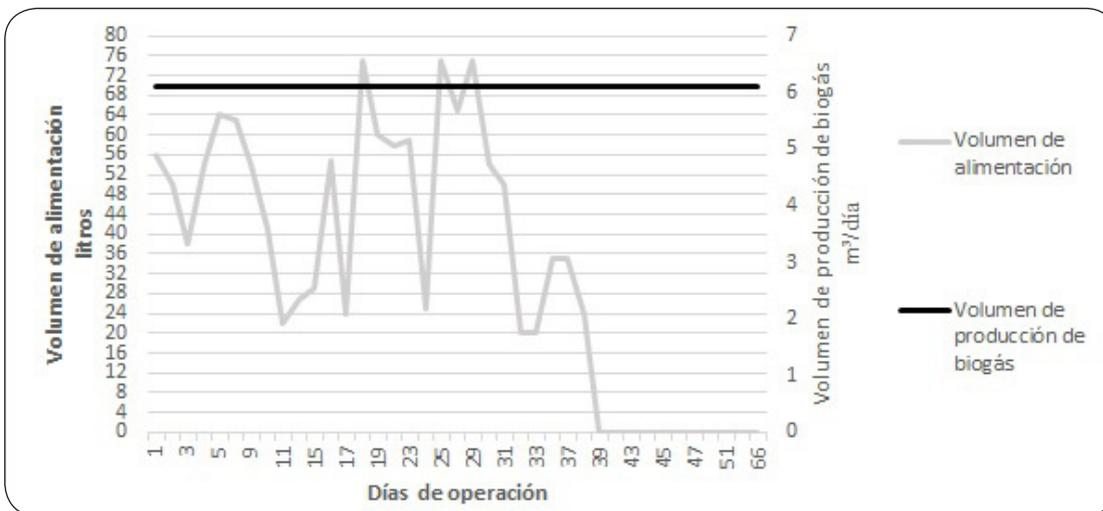


Figura 2.7 Comportamiento del digestor con respecto al volumen de alimentación y a la producción que debería haber de biogás

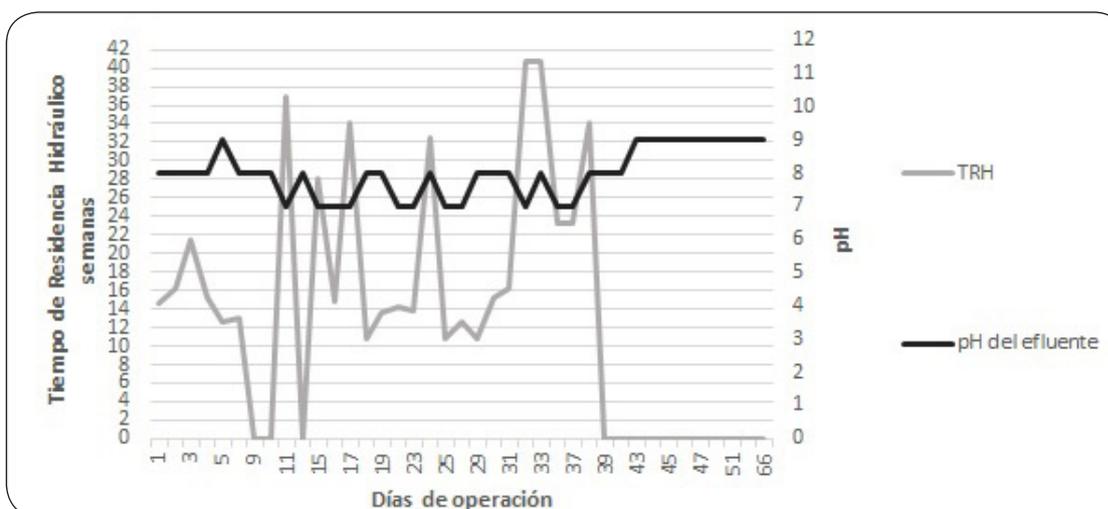


Figura 2.8 Comportamiento del TRH con respecto al pH del efluente



Figura 2.9 Bomba en jaula de protección



Figura 2.10 Máquina pre-trituradora de biomasa

En la **Tabla 2.3** se describen y enuncian los materiales con los que se cuenta en la planta de biogás, así como sus especificaciones técnicas.

Tabla 2.3 Especificaciones de los materiales de la planta de biogás

Concepto	Descripción
Triturador	Triturador doméstico de residuos orgánicos InSinkErator® capacidad de molienda de 1.1 kilogramo (40 oz); motor monofásico de 1.2 kW
Tanque de alimentación	Bote plástico de 150 litros, equipado con accesorios
Reactor anaerobio R-I 1,250 litros	Tanque vertical fabricado en acero inoxidable tipo 304 con mirilla de acrílico y mezclador accionado con motor trifásico de 3.43 kW, diámetro de 0.86 metros y altura de 2.16 metros
Reactor anaerobio R-II 5,000 litros	Tanque de almacenamiento Rotoplas® fabricado en polietileno, diámetro de 2.20 metros y una altura 1.77 metros
Bomba	Bomba de cavidad progresiva Moyno® modelo 35601, 1.5” succión, 1.25” descarga, flujo de 1.262 L/s; acoplada a motor trifásico de 1.35 kW
Báscula	Balanza de plataforma con rango de medición de 1-140 kg
Pre-triturador	Armazón de aluminio con cuchillas de acero inoxidable; motor monofásico de 1.119 kW
Carga total de equipos eléctricos instalados	7.099 kW

2.2 Operación de la planta de biogás en Ciudad Universitaria

El presente material se lleva a cabo mediante la ayuda de una serie fotográfica que muestra y explica paso a paso cómo llevar a cabo la operación de la planta generadora de biogás, con sus configuraciones correspondientes en la tubería para hacer una recirculación correcta de la biomasa, lodos digeridos y agua que se obtienen dentro del proceso de producción del biogás.

2.2.1 Protección personal

El primer paso al ingresar a la planta productora de biogás en Ciudad Universitaria es el de equiparse con el equipo de seguridad pertinente, el cual está ubicado dentro de unas gavetas ubicadas a la entrada de la planta productora de biogás. Se cuenta con guantes de tipo industrial de butilo (copolímero de isobutileno e isopropeno) para manejo de ácidos y protección contra agentes químicos en general y así proteger brazos y manos. También se cuenta con bata y/o overol para la protección de la ropa y el cuerpo. Se debe usar una mascarilla con filtros A1P2R, especiales para gestión de residuos y que protegen contra olores, bacterias y esporas. Y por último se cuenta, dentro del equipo de protección con lentes con mica de policarbonato con recubrimiento antiempañamiento para la protección

de los ojos. De ser posible se recomienda el uso de botas industriales con casco de acero o de poliamida (protección dieléctrica), hechas en piel y con suelas antiderrapantes, que sean resistentes a grasas y aceites. También se recomienda el uso de una cachucha de protección de alta visibilidad o el uso de un gorro desechable para la protección de la cabeza de algunos agentes químicos; pero que a su vez permita ventilación. Todo lo dicho anteriormente viene resumido en la **Tabla 2.4** para su sencillo entendimiento. Mientras que en la **Figura 2.11** se ilustra la gaveta donde es almacenado el equipo de seguridad y en la **Figura 2.12** se muestra a personal vistiendo con el equipo de protección descrito.

Tabla 2.4 Resumen de materiales de seguridad personal

Artículo de seguridad	Protección
Cofia o cachucha de protección de alta visibilidad	Cabeza y cabello
Lentes con mica de policarbonato y recubrimiento antiempañante	Ojos
Mascarilla con filtros A1P2R	Boca, parte de la cara y sistema respiratorio
Bata u overol de algodón de un color oscuro	Torso, brazos y piernas
Guantes industriales de butilo (copolímero de isobutileno e isopropeno)	Manos y brazos
Botas industriales con casquillo o poliamida con suelas antiderrapantes	Pies



Figura 2.11 Gaveta donde se guarda el equipo de protección



Figura 2.12 Personal con equipo de protección

2.2.2 Mezclado

Para proceder a activar o encender las paletas del reactor anaerobio R-I, esto para que dentro del reactor anaerobio toda la biomasa esté homogénea y las bacterias se encarguen, por igual en toda la biomasa, de hacer su proceso natural y así se logre una eficaz producción del biogás. En la **Figura 2.13** se muestra el diagrama unifilar de la planta de biogás en Ciudad Universitaria, en el que se especifican los componentes eléctricos con los que se cuenta dentro de la instalación.

2.2.2.1 Sistema eléctrico de mezclado

El motor que activa las paletas, para que se revuelva la biomasa dentro del reactor anaerobio R-I, se acciona desde el tablero de pastillas interruptoras termomagnéticas; donde el tablero cuenta con siete pastillas interruptoras para protección de la misma instalación eléctrica y para la protección de los equipos (**Figura 2.14**). El circuito en donde se acciona el motor del reactor anaerobio R-I está conformado por tres pastillas, unidas por un alambre del lado derecho del tablero; ya que se deben accionar al mismo tiempo para que funcione correctamente, al tratarse de un motor trifásico. La **Figura 2.15** muestra las pastillas y simplemente para accionarlas basta con moverlas hacia el lado izquierdo para ponerlas en modo encendido (ON).

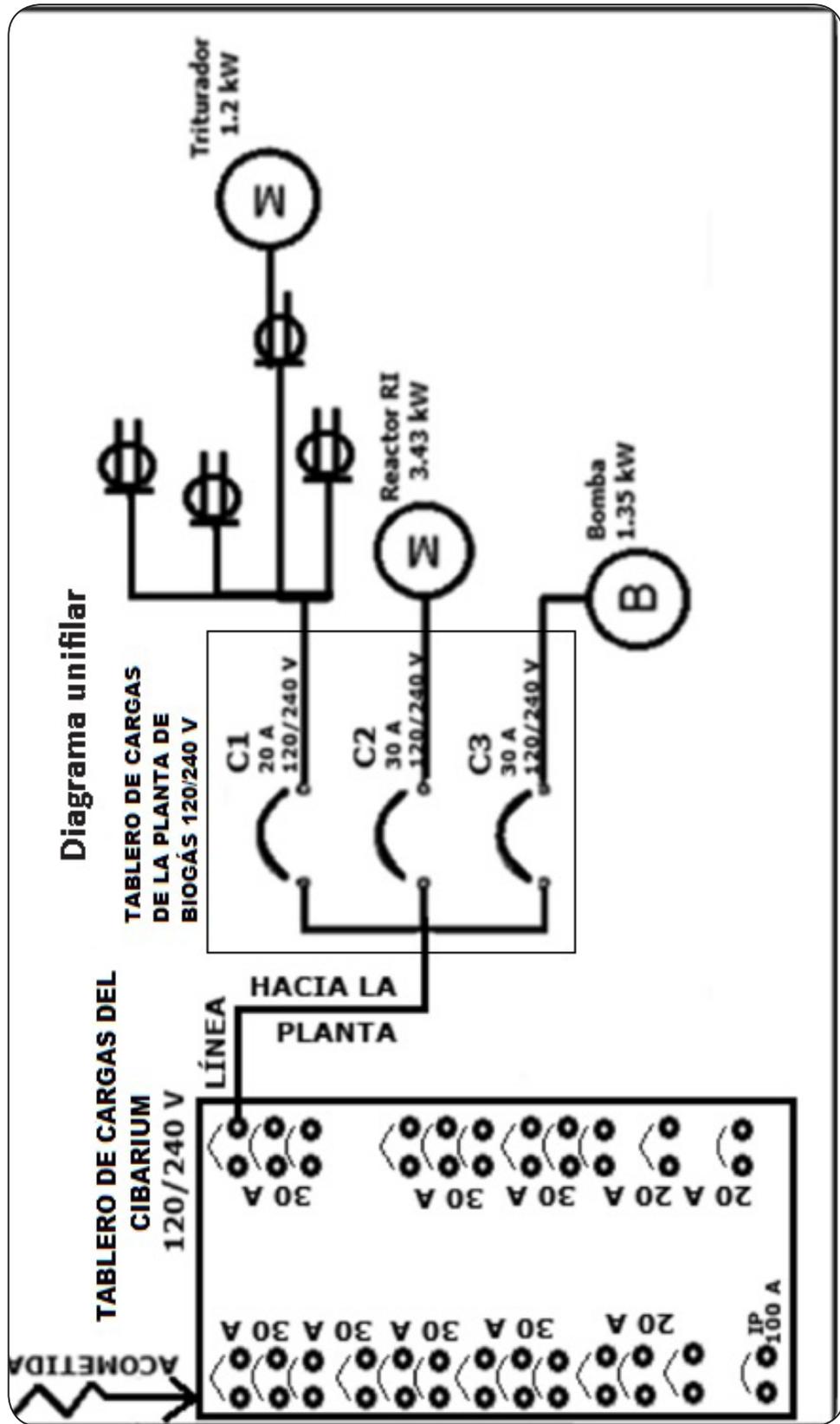


Figura 2.13 Diagrama unifilar de la planta de biogás en Ciudad Universitaria



Figura 2.14 Tablero de pastillas interruptoras termomagnéticas en la planta generadora de biogás en Ciudad Universitaria



Figura 2.15 Las tres pastillas unidas por un alambre de aluminio de la parte superior que activan el motor del reactor anaerobio R-I

2.2.2.2 Cierre y apertura de válvulas para mezclado en reactor anaerobio I

Otro aspecto a supervisar antes de encender el motor del reactor anaerobio es el de la configuración o posición de las llaves de paso de biomasa en la instalación de la planta generadora de biogás, esta configuración, debe llevarse a cabo, como se muestra en la **Figura 2.16**, donde se marca con una “A” las llaves que deben estar abiertas, mientras que las demás deben permanecer cerradas. Se deben supervisar en el orden como se muestran las llaves, que de hecho esta configuración de llaves es la forma correcta en la que debe estar, siempre que no se esté haciendo recirculación en el reactor anaerobio R-II, o sea con esta configuración se debe estar en condiciones normales de operación dentro de la planta productora de biogás.

2.2.2.3 Cálculos

El tiempo de mezclado en el reactor anaerobio R-I debe ser de acuerdo con la ecuación $Q = \frac{V}{TRH}$; donde: Q es el flujo de la bomba en L/s ; V es el volumen efectivo del digester determinado en litros y TRH es el tiempo de residencia hidráulica, en este caso el tiempo que debe permanecer encendido el motor para que se homogenice la biomasa contenida en R-I. Despejando la ecuación para determinar el tiempo que estará activo el motor del reactor anaerobio R-I queda $TRH = \frac{V}{Q}$, se hacen los cálculos pertinentes de la siguiente manera:

$$V = \pi r^2 h \rightarrow 3.14159 \cdot (0.43m)^2 \cdot 1.82m = 1.05720m^3 \rightarrow 1057.2L$$
$$TRH = \frac{1057.2L}{1.262 L/s} = 837.7179s$$

y ahora se procede a convertirlo en minutos

$$837.7179s \cdot \left(\frac{1min}{60s}\right) = 13.9619min$$

Mientras que para la mezcla en el reactor anaerobio R-II es por medio de un sistema neumático basado en la recirculación del biogás o de la biomasa y el tiempo que la biomasa debe recircular para quedar homogénea queda determinado por los siguientes cálculos:

$$V = \pi r^2 h \rightarrow 3.14159 \cdot (1.1m)^2 \cdot 1.22m = 4.63762m^3 \rightarrow 4,637.62L$$
$$TRH = \frac{4,637.62L}{1.262 L/s} = 3,675 s$$

convertido en minutos

$$3,675 s \cdot \left(\frac{1min}{60s}\right) = 62min$$

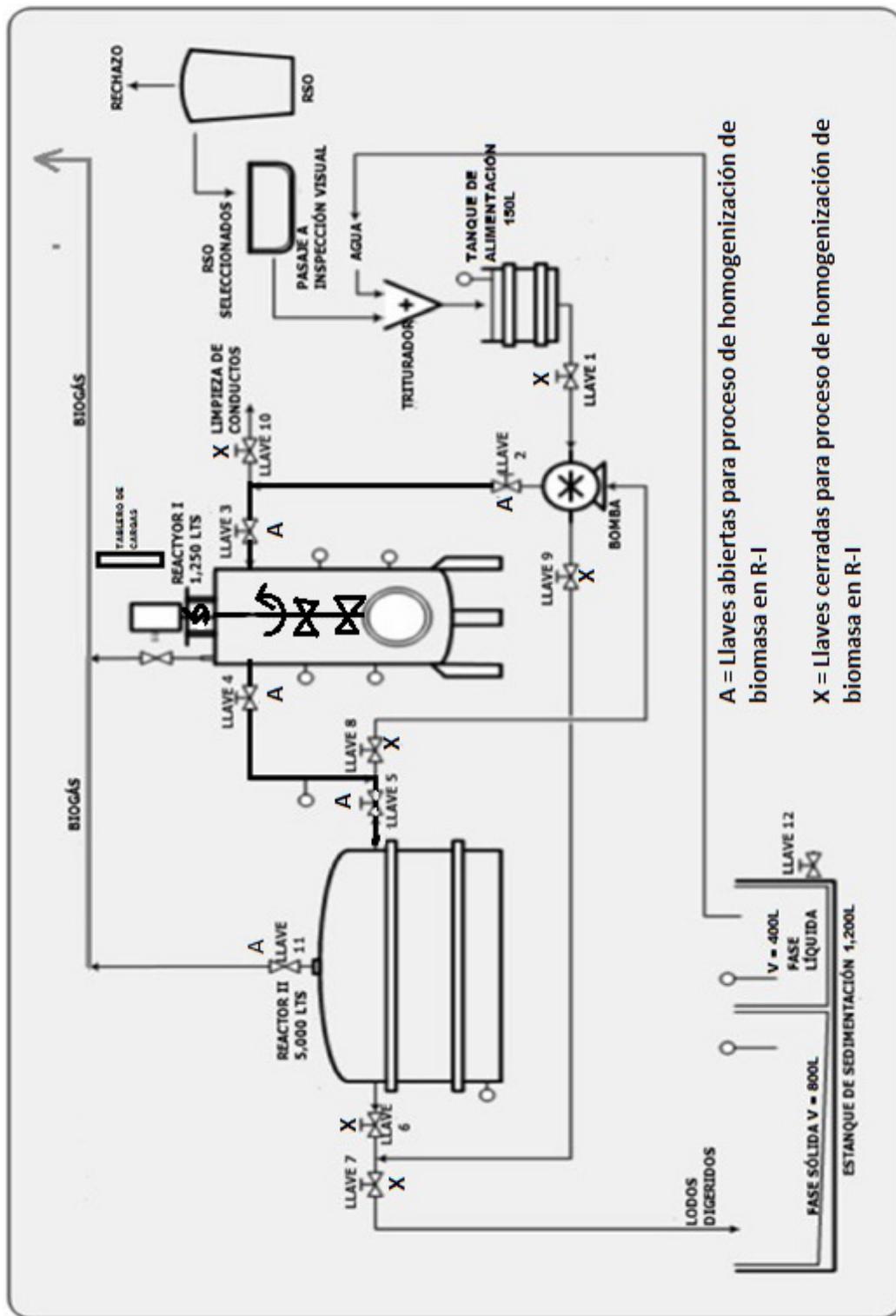


Figura 2.16 Diagrama de configuración de llaves abiertas para encender el motor de R-I y homogenizar la biomasa dentro de R-I

Pese al resultado obtenido siempre se manejó darle un tiempo de homogenización de alrededor de una hora para que así existiera un ambiente más prolífero para las bacterias productoras de biogás. Se puede supervisar que se está llevando a cabo el mezclado mediante el ruido que realiza el motor, si algo está fallando de inmediato se escucha cómo el motor empieza a hacer sonidos como de que se está trabando o que algo dentro del reactor anaerobio le impide funcionar de manera correcta esto es, se está trabando o “atascando”, si se escuchan este tipo de sonidos lo mejor es apagar el motor mediante las pastillas interruptoras termomagnéticas y volverlas a encender, otra manera de corroborar que se está llevando a cabo la mezcla se percibe de manera un tanto clara mediante la mirilla de acrílico oscura frontal del reactor anaerobio R-I (Figura 2.17) donde se aprecia el movimiento de la mezcla o de la biomasa de un color entre negro y gris, como si se tratara de movimiento de lodo, se debe observar con suma atención ya que al tratarse de un proceso donde no se quiere que intervenga la luz no es tan apreciable.



Figura 2.17 Ventanilla del reactor anaerobio R-I donde se aprecia el mezclado de la biomasa

2.2.2.4 Salida de efluente

Mientras se presta atención al proceso de mezcla en el reactor anaerobio R-I, se procede a la salida del reactor anaerobio R-II (**Figura 2.18**) y se abre la llave de paso de agua y lodos hacia el estanque de los mismos, etiquetado como la llave de paso 7, para liberar o descargar un poco el reactor anaerobio R-II (**Figura 2.19**). Se debe aprovechar que se está descargando el reactor anaerobio para medir el pH del efluente que se descarga al estanque y que debe estar, en la escala de las tiras reactivas, entre 6 y 8; que es lo que determina que hay un ambiente propicio para la generación del biogás. La medición con las tiras reactivas es un indicador de lo que está pasando dentro de los reactores anaerobios y dentro del sistema de producción de biogás, cada aspecto debe ser controlado y atendido en cuanto se detecte para lograr corregir con tiempo cualquier falla y ayudar a las bacterias a sobrevivir, para de esta manera lograr una producción de biogás efectiva; cabe mencionar que la descarga de lodos digeridos y agua, si es que no ha parado, debe ser hasta el límite establecido o indicado con una marca en el interior del estanque y así evitar derrames.



Figura 2.18 Reactor anaerobio R-II

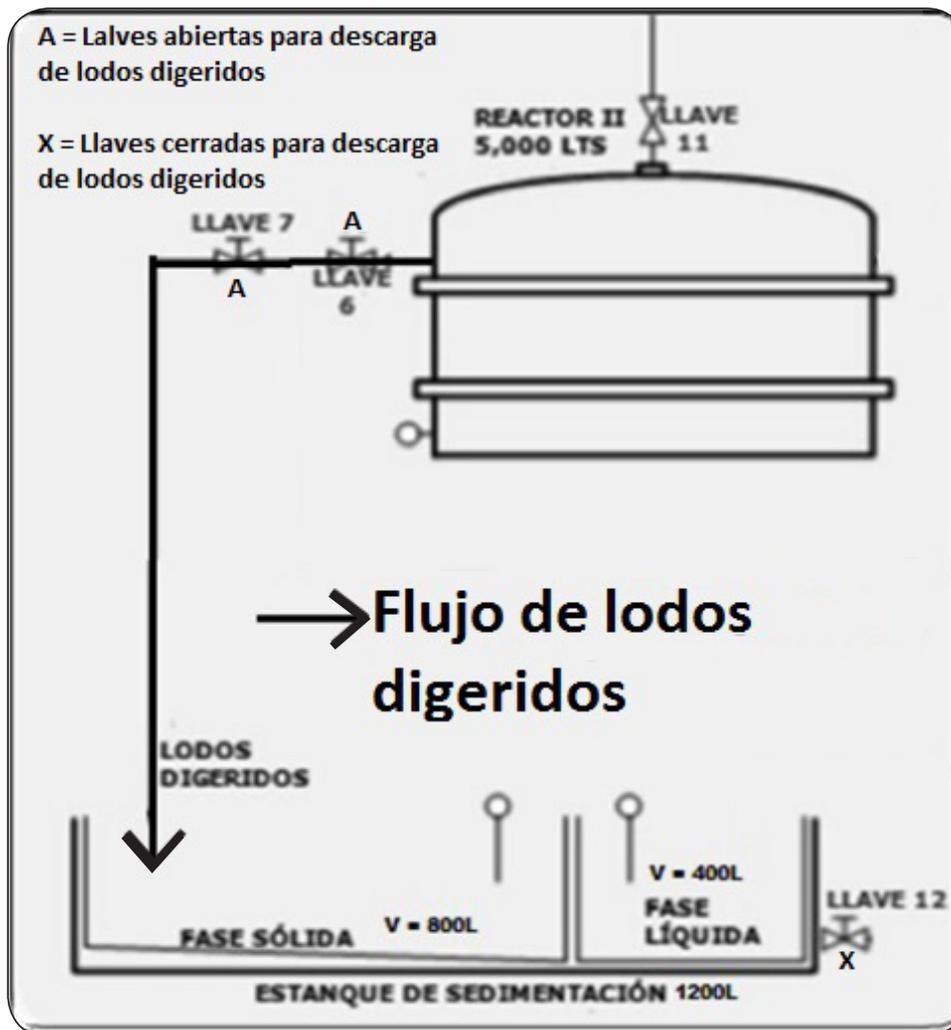


Figura 2.19 Salida de agua y lodos del reactor anaerobio R-II hacia el estanque de lodos y agua

2.2.3 Alimentación

Una vez terminado el proceso de mezclado, así como de la supervisión y de todos los pasos anteriormente mencionados, se procede a la recolección de la biomasa, ésta se obtiene principalmente de dos restaurantes, el restaurante “Cibarium” y uno de frutas y ensaladas próximo a la planta generadora de biogás. Con estos restaurantes se ha llegado a un acuerdo de proporcionar su basura orgánica para ser utilizada en este proceso, lo cual también les resulta conveniente, ya que se pasa por la biomasa directamente a los restaurantes y así los trabajadores se ahorran el trabajo y tiempo de trasladar sus residuos orgánicos a un contenedor especial para desechos orgánicos dentro de Ciudad Universitaria. En la **Tabla 2.5** se recolectan los datos de la masa obtenida a lo largo de los nueve meses de trabajo, mientras que en la **Tabla 2.6** se presentan los tipos de alimentos con los que se puede alimentar el digestor de la instalación de la planta de biogás en Ciudad Universitaria y con los alimentos, proporcionados por ambos negocios, con los que no se puede alimentar el digestor. En las **Figuras 2.20** y **2.21** se ilustra el sustrato con el que se alimenta la planta de biogás.



Figura 2.20 Biomasa pre-triturada



Figura 2.21 Biomasa separada y cortada

Ambos restaurantes proporcionan buena cantidad de biomasa, pero en la experiencia propia es mejor la proporcionada por el restaurante “Cibarium”, ya que es biomasa tanto de origen animal como de origen vegetal aparte de ser el restaurante más próximo a la planta generadora de biogás; entonces al encontrarse más próximo se ahorra tiempo y energía que puede ser aprovechado en otros aspectos del trabajo realizado en la planta generadora de biogás.

Tabla 2.5 Alimentación del sistema

Número de día	Fecha	Masa de alimentación kg	TRH días
1	26-sep-16	45	64
2	27-sep-16	41	68
3	28-sep-16	45	64
4	29-sep-16	44	65
8	3-oct-16	32	89
9	4-oct-16	36	80
10	5-oct-16	27	106
11	6-oct-16	29	99
12	7-oct-16	60	48
15	10-oct-16	60	48
16	11-oct-16	35	81
17	12-oct-16	61	47
18	13-oct-16	30	95
19	14-oct-16	46	62
22	17-oct-16	59	49
23	18-oct-16	33	91
24	19-oct-16	31	92
25	20-oct-16	35	82
26	21-oct-16	45	64
29	24-oct-16	49	59
30	25-oct-16	39	73
31	26-oct-16	22	130
32	27-oct-16	22	130
33	28-oct-16	34	84
38	3-nov-16	40	73
46	11-nov-16	21	146
50	15-nov-16	15	219
51	16-nov-16	75	38
59	24-nov-16	43	67
129	2-feb-17	32	89
130	3-feb-17	21	136
135	8-feb-17	53	54
136	9-feb-17	20	143
137	10-feb-17	25	154
142	15-feb-17	15	259
143	16-feb-17	30	95
148	21-feb-17	34	84
149	22-feb-17	29	99
150	23-feb-17	29	99
151	24-feb-17	22	106
157	02-mar-17	50	56
176	21-mar-17	26	106
177	22-mar-17	20	168
178	23-mar-17	35	88
184	29-mar-17	21	178
192	6-abril-17	32	89
193	7-abril-17	15	238
204	18-abril-17	18	150
205	19-abril-17	15	285

Tabla 2.6 Alimentos que se desechan y que se alimentan al reactor

Concepto	Tipo de alimento
Alimento que puede ser procesado por la planta de biogás	Sandía, papaya, mango, tortillas, pan, frijoles, pollo, milanesas, melón, jitomate, etc.
Alimento que no puede ser procesado por la planta de biogás	Cítricos, cáscaras de cítricos, lechuga, pellejos y carne cruda (no recomendable), hojas o plantas, huesos tanto de animales como de frutas (no recomendables)

Al contar con la biomasa, ésta es depositada en la tarja de acero inoxidable, la cual está dividida en tres secciones: del lado izquierdo es donde se colocan los contenedores de 10 litros con biomasa y agua para ser introducidas al pre-triturador (**Figura 2.22**). La parte de en medio es una tarja que es utilizada para el análisis, limpieza (si es necesario limpiar la biomasa), y separación de la biomasa (**Figura 2.23**), ya que hay biomasa que no se puede digerir o procesar en este tipo de planta; porque se obstruiría la tubería, como por ejemplo con el tipo de biomasa denominada “fibrosa”, encontrada principalmente en biomasa vegetal como las podas, la lechuga o las plantas; también la biomasa de origen cítrico es desechable ya que la cáscara es “fibrosa” y los cítricos descontrolan el pH del sistema, haciéndolo ácido con lo que se podría alterar el proceso de producción de biogás, o por lo menos hacer más difícil el control, ya que el pH se debe mantener lo más neutro posible dentro de los estándares de medición.



Figura 2.22 Contenedor de 10 litros con biomasa y agua antes de ser introducida al pre-triturador



Figura 2.23 Proceso de análisis y selección de biomasa en tarja de acero

2.2.3.1 Cierre y apertura de válvulas para recirculación en reactor anaerobio II

Antes de proseguir con los procesos para introducir la biomasa a los reactores, para ahorrar tiempo, se puede poner a recircular la biomasa contenida en el reactor anaerobio R-II. Para esto es necesario abrir las llaves de paso de la biomasa marcadas con una “A” en la **Figura 2.24**. El motor se enciende desde el tablero de pastillas interruptoras termomagnéticas, con las dos pastillas que están del lado izquierdo del tablero (**Figura 2.25**). Se accionan las dos al mismo tiempo y van del lado izquierdo al derecho, de igual manera las dos pastillas están etiquetadas para distinguir que se tratan de la bomba.

Hacer la recirculación en el tiempo entre lo que se lleven a cabo los pasos ya explicados, pero antes de que la biomasa sea introducida al triturador o por lo menos que no excedan 40 minutos como máximo de operación, esto con el fin de no arriesgarse a descomponer la bomba, porque como ya se ha mencionado antes, la bomba no es para los requerimientos necesarios dentro del proceso de esta planta productora de biogás y porque se sigue a la espera de ser sustituida por una bomba que sea adecuada para lo requerido en el proyecto. Una vez concluido el tiempo de recirculación, la configuración de las llaves de paso de la biomasa debe ser puesta como antes de este paso.

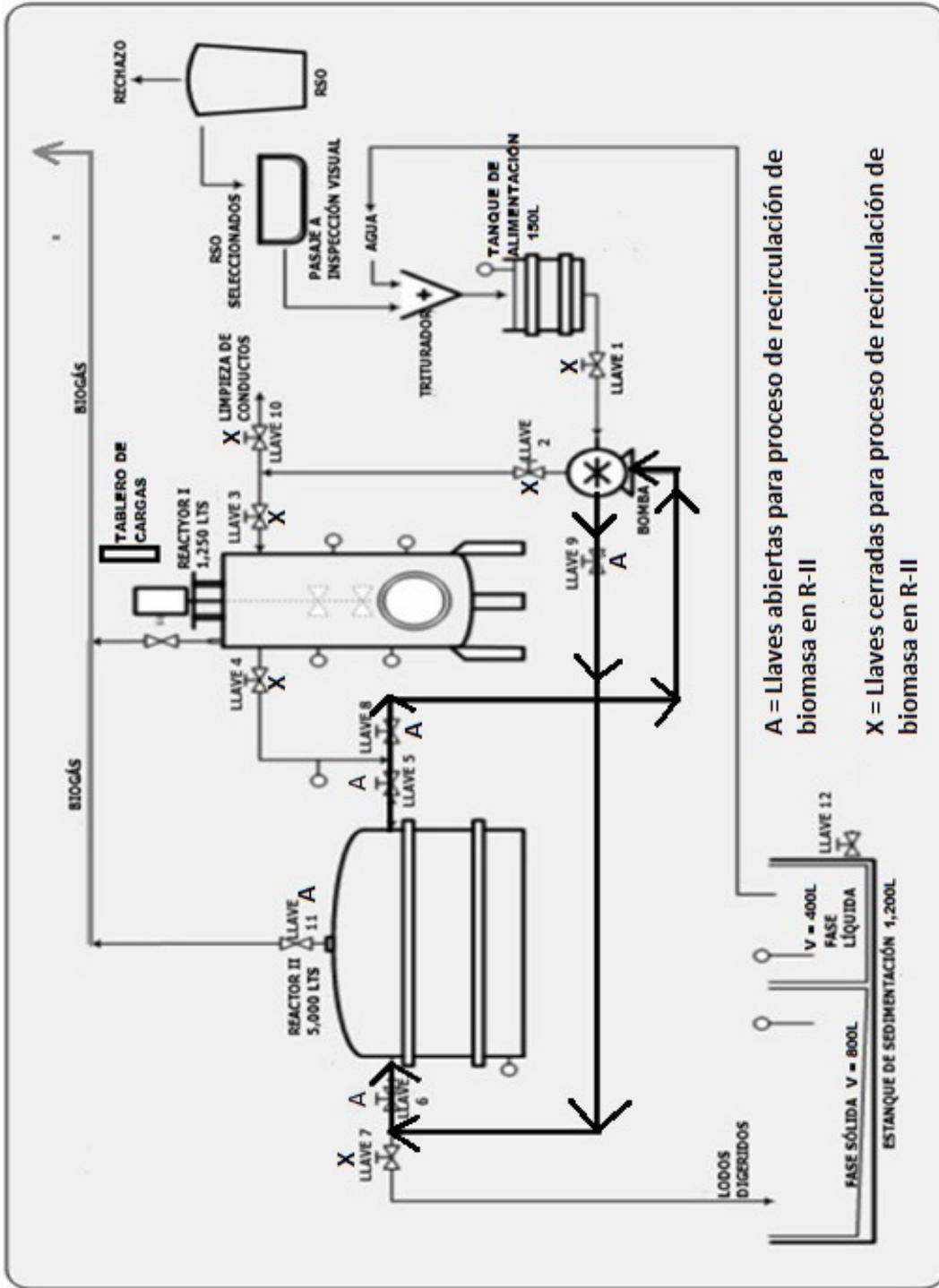


Figura 2.24 Configuración de llaves que se deben abrir para recirculación en reactor anaerobio R-II



Figura 2.25 Pastillas interruptoras termomagnéticas para accionar la bomba

Ya separada la biomasa, se deposita en el lado derecho de la tarja de acero inoxidable y se corta en pequeños trozos de forma manual, ya que se cuenta con equipo para realizar el cortado de biomasa de forma manual; o también puede ser cortada con la máquina pre-trituradora, que se mencionó en un apartado anterior de esta tesina, con la que se cuenta dentro de las instalaciones de la planta productora de biogás. La biomasa cortada no debe rebasar los 8 cm de perímetro, esto para facilitar que la biomasa sea colocada dentro de los contenedores de diez litros y posteriormente pesada en estos contenedores en una báscula (**Figura 2.26**). Con estos controles se lleva un registro detallado y adecuado de cuánta biomasa es introducida por día a los reactores anaerobios, en cuánto tiempo se podrá esperar que se empiece a generar biogás y sobre todo cuánto tiempo debe ser revuelta y recirculada la biomasa contenida en los reactores anaerobios para lograr una mezcla homogénea y lograr el ambiente propicio para las bacterias productoras de biogás.



Figura 2.26 Báscula para pesar los contenedores con biomasa

2.2.3.2 Trituración

Una vez pesada la biomasa se procede a introducirla en el triturador, para lo cual la biomasa debe ser tener una consistencia entre sólido y líquido, donde predomine la consistencia líquida (Figura 2.27). Para lograr esa consistencia se debe reutilizar el efluente del proceso, que ha sido depositada en el estanque de sedimentación. Tomada de la salida del estanque de sedimentación de donde se abre la llave de paso de agua y mientras se va llenando un contenedor, con el que se cuenta entre los materiales de trabajo en la planta productora de biogás y que tiene una capacidad de 10 litros. También del efluente se debe medir el pH con las tiras reactivas, esta medición debe estar entre la escala del 9 y 11 de las tiras de pH para que no afecte en el pH del influente nuevo. El efluente es el que se va a revolver con la biomasa para así lograr la especie de sopa, la cual va a ser introducida al triturador de biomasa (Figura 2.28). De ahí pasará directamente al tanque receptor de sustrato, y una vez lleno se deberá revolver muy bien, con un pedazo de tubo que sirve como paleta o cuchara, y que sobró de la instalación en un inicio cuando se hizo la instalación de la planta de biogás en Ciudad Universitaria.



Figura 2.27 Sustrato en el tanque de alimentación



Figura 2.28 Triturador de biomasa

2.2.3.3 *Enzimas anaerobias*

A la mezcla líquido-sólido de influente, hecha de biomasa y efluente del proceso, se le agregará una enzima anaerobia de origen italiano que sirve para acelerar y fortalecer el proceso de producción de biogás. Estas enzimas están guardadas en paquetitos de 1 gramo, ya que la relación de uso sustrato-enzima es de 5 g/m³ de sustrato después del segundo día de operación en la planta, mientras que para el día del arranque la relación es de 10 g/m³ de sustrato. Es importante señalar que las enzimas deben ser almacenadas en un bote oscuro, ya que son fotosensibles y no deben ser expuestas a la luz por ningún motivo hasta ser utilizadas para garantizar su correcto funcionamiento.

2.2.3.4 *Control de pH*

Se medirá el pH del influente y si se encuentra entre la escala de 6 a 8 se procederá a introducir la biomasa al reactor anaerobio R-I. De no estar entre 6 y 8 en la escala de pH dentro del tanque receptor de sustrato, se puede controlar con cal, agregando 4 gramos por cada litro de alimentación para subir un grado en la escala de pH, la cal está almacenada en unos tambos de color azul (Figura 2.29).



Figura 2.29 Contenedores con cal para controlar pH

2.2.3.5 *Flujo de alimentación*

Para dar paso a la biomasa para el reactor anaerobio R-I se abre la llave de paso, marcada con el número 1 de llave en el Diagrama de la parte interior (Figura 2.30), y se enciende la bomba, para que esto dé paso a la biomasa. Mientras se descarga la biomasa hacia el interior del reactor anaerobio R-I se debe seguir mezclando con el tubo dentro del tanque receptor de sustrato, hasta que el nivel del influente llegue a la última marca señalada den-

tro del tanque receptor de sustrato y así se alcance a apreciar la salida del tanque receptor de sustrato, localizado al fondo de éste; pero sin dejarlo al descubierto, ya que se debe evitar dejar pasar aire al proceso. Una vez concluido el paso de la biomasa se cierra la llave de paso 1, que por cierto es de color rojo. Ya en este punto, y para terminar, se pone a funcionar el motor del reactor anaerobio R-I para que se homogenice la biomasa recién introducida con la que ya estaba dentro. Mientras se lleva a cabo el proceso de mezclado se procede a limpiar y dejar ordenado; por último se pone la configuración de llaves de paso de biomasa para hacer recirculación en el reactor anaerobio R-II y se deja haciendo recirculación. Una vez concluido se regresa a la configuración inicial de llaves de paso de biomasa, esto con el fin de proteger a la planta, ya que si se llega a olvidar volver a esta configuración, la presión del biogás en alguno de los reactores podría ser tal que se podría llegar a romper alguna tubería o incluso dañar a alguno de los reactores anaerobios. En la **Figura 2.31** se muestra un diagrama con los volúmenes de los equipos, dentro de la planta tipo semi-industrial.

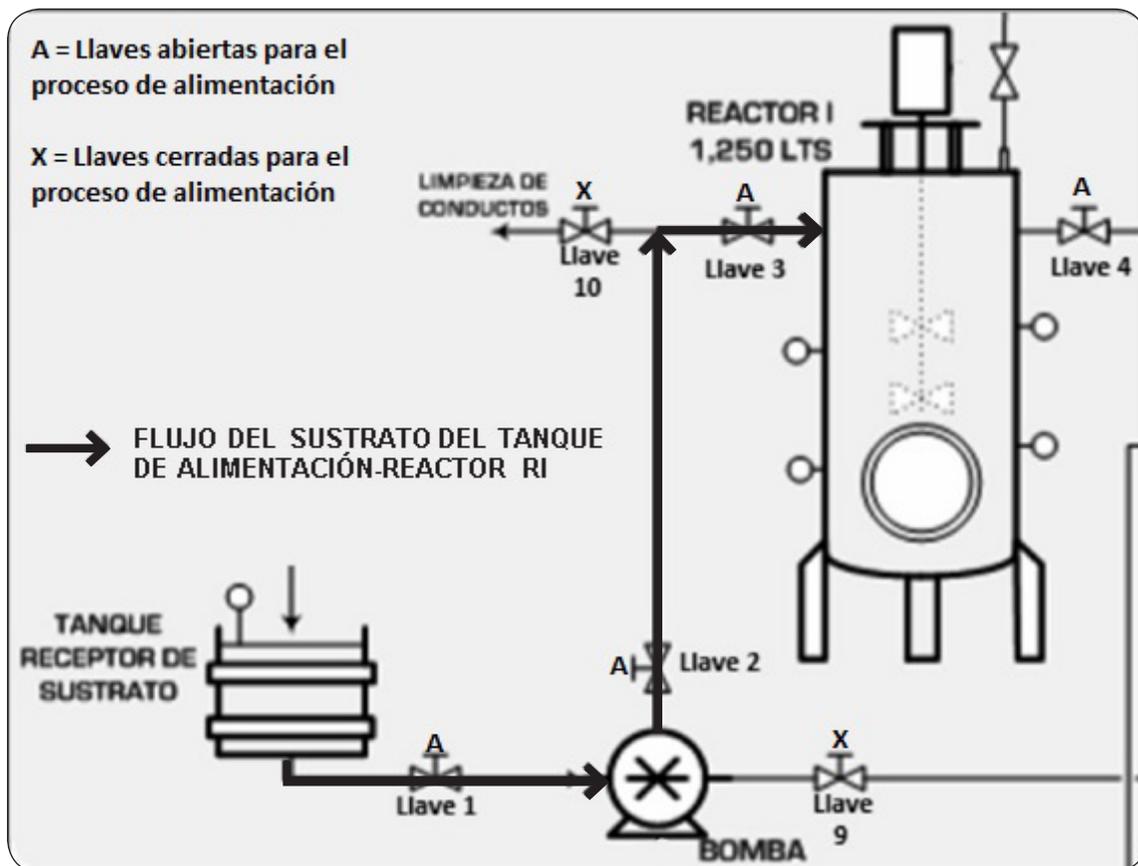


Figura 2.30 La llave 1 es la que permite paso de la biomasa del tanque receptor de sustrato hacia el reactor anaerobio R-I

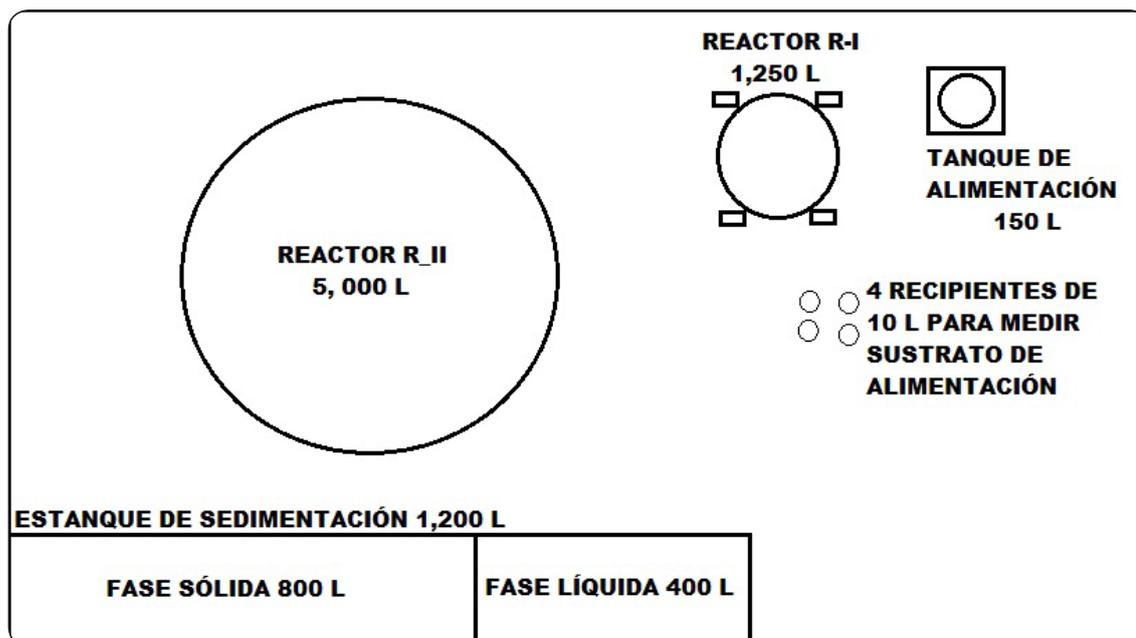


Figura 2.31 Diagrama de volúmenes de los equipos.

2.3 Mantenimiento

El mantenimiento es uno de los ejes fundamentales para asegurar una cantidad y calidad de producción confiable; el mantenimiento podría definirse como un conjunto de normas y técnicas establecidas para la conservación de la maquinaria e instalaciones de una planta de cualquier tipo, para principalmente mantener los equipos operables aumentando su vida útil por prevenir fallas. En la **Tabla 2.7** se describen los tipos de mantenimiento que se deben de realizar en la planta, sugiriendo que antes de cualquier otro proceso, se lleve a cabo cada uno de los mantenimientos para así garantizar el correcto funcionamiento de la planta de biogás en Ciudad Universitaria.

Tabla 2.7 Mantenimiento a realizar en la planta de biogás de Ciudad universitaria

Frecuencia de realización	Mantenimiento
Diario	Monitoreo de parámetros (nivel de biogás, nivel de pH, presión, temperatura, etc.), limpieza en general de la planta, de los equipos de manera externa y en el caso del pre-triturador y el triturador de manera interna; limpieza de tuberías por donde circula el sustrato, éste deberá hacerse con agua del mismo proceso mediante la recirculación del agua por las tuberías.
Semanal	Limpieza de equipo de seguridad personal, revisar condiciones de tuberías de flujo de sustrato y de flujo de biogás, revisar condiciones de los equipos de la planta alta, ya que al estar expuestos a la intemperie puede que se llegaran a averiar con mayor facilidad
Mensual	Aceitado y ajuste de tuercas y tornillos de los equipos, barrer la planta alta, para prevenir picaduras o cortes con piedras y/o ramas en la bolsa de almacenamiento de biogás
Semestral	Concretar una visita para vaciado del estanque de sedimentación, chequeo de continuidad en conductores eléctricos de cada equipo y de la instalación eléctrica de la planta, chequeo de contactos eléctricos y de interruptores, armado de paquetes de 1 g de las enzimas anaerobias

2.4 Reparaciones

Desde su instalación no se habían realizado labores de mantenimiento y como consecuencia se tuvieron que hacer reparaciones, descritas en la **Tabla 2.8**, durante el tiempo que se prestó servicio social y ésto también repercutió en el re-arranque de la planta piloto y en la producción de biogás. También se mostrarán algunas fotografías para ilustrar los procesos llevados a cabo.

Tabla 2.8 Actividades de reparación en la planta de biogás en Ciudad Universitaria

Reparaciones	Desarrollo
Cambio de tanque de alimentación	Se cambió de un tanque de alimentación de 200 litros, sustituyendo el tanque metálico recortado (Figura 2.32) instalado desde el inicio de la planta de biogás, por uno de plástico de capacidad de 150 litros (Figura 2.33); esto por el hecho de que el metálico ya se encontraba en malas condiciones, presentaba rastros de corrosión; repercutiendo directamente en la biomasa ingresada al reactor anaerobio, otra razón para hacer la sustitución fue que al estar en malas condiciones y oxidado había riesgo de que se agujereara o se picara y ésto evitara contener la biomasa pasada por el triturador, previamente. Al hacer el cambio también se hizo una base adaptada, reciclando unos pallets de madera encontrados en el basurero cercano a la planta de biogás, con la que quedó de mejor manera sostenido el tanque receptor y libre del alcance de algún roedor o insecto atraído y de esta manera garantizar mayor duración el tanque de alimentación plástico, con esta base también se logró proteger y adaptar una mejor configuración de tubería, ya que con el tanque receptor anterior se detectó que se fugaba biomasa antes de ser introducida al reactor anaerobio R-I y también por la localización de la tubería de entrada se quedaban depositados en el tanque receptor poco más de 5 litros. En cambio con la nueva configuración se redujo a un máximo de 2 litros lo estancado para cubrir la entrada de la tubería y no permitir entrada de oxígeno al proceso de producción de biogás.
Vaciado del tanque de sedimentación	Al tratar de re-arrancar la planta de biogás surgió el inconveniente de que el tanque de sedimentación estaba hasta el tope de efluente, tanto de lodos digeridos como de agua del proceso. Entonces se procedió a hacer vaciado de manera manual con los contenedores, aproximadamente 100 litros fueron introducidos nuevamente al reactor anaerobio R-I con el procedimiento adecuado que ya se explicó en el apartado anterior. También cerca de 100 litros se vaciaron en jardines aledaños, ya que el efluente sirve perfectamente para riego o para ser consumida por animales.
Ajuste y lubricación a tornillos y engranes del reactor anaerobio R-I	Al activar el motor del Reactor R-I para hacer mezclado mediante las propelas el motor del reactor anaerobio se escuchaba que se atascaba y no funcionaba de manera adecuada, para lo cual se apagó el motor y se llevó a cabo un análisis (Figura 2.34), para finalmente determinar que hacía falta un ajuste de las tuercas y a la vez darle lubricación (Figura 2.35), ya que estaban muy gastadas debido a la fricción y se estaban rompiendo.
Paquetes de enzimas anaerobias	Al arrancar la planta se debe agregar 10 gramos de la enzima por cada metro cúbico de sustrato, cuando se realice mantenimiento o en cualquier carga de sustrato se agrega 5 gramos de enzimas por cada metro cúbico de sustrato. Las enzimas no deben exponerse a la luz ya que pierden su efecto.
Diagnóstico de las condiciones de las tuberías de biogás	Otro aspecto importante del mantenimiento fue el de realizar un diagnóstico y análisis de las tuberías (Figura 2.36) en la planta productora de biogás, esto se pensó a partir de que no se detectaba producción de biogás, aún pasado el tiempo de re-arranque, calculado con la ecuación $TRH = \frac{V}{Q}$, donde al lograr una alimentación promedio de 66.68 litros de biomasa por día se encontró con la ecuación que: $TRH = \frac{1.250L}{66.68 \frac{L}{día}} = 18.74 \text{ días}$ era el tiempo en el que empezaríamos a percibir producción de biogás. Por este motivo se pensó que se debía a que existían fugas o algún otro componente averiado dentro de las instalaciones y lo principal a analizar fueron las tuberías por donde circula el biogás, marcadas de color amarillo. Después de varios análisis se logró dar con el principal problema, registrado dentro del reactor anaerobio R-II, en donde se detectó fuga en la tapa de este reactor anaerobio. Para darle una solución pronta se sacó de operación este reactor anaerobio cortándole la manguera amarilla de la salida de biogás (Figura 2.37); por lo cual por el momento sólo se puede obtener biogás del reactor anaerobio R-I, aunque en el reactor anaerobio R-II se sigue haciendo el procedimiento normal de producción pero al tener fuga no se puede recolectar lo producido en este reactor anaerobio.



Figura 2.32 Primer tanque receptor de sustrato que muestra los signos de corrosión



Figura 2.33 Tanque receptor de sustrato plástico actualmente instalado



Figura 2.34 Engranés y tuercas del motor del reactor anaerobio R-I sin mantenimiento



Figura 2.35 Engranés y tuercas del motor del reactor anaerobio R-I después del mantenimiento



Figura 2.36 Vista de una parte de la planta productora de biogás donde se pretende mostrar la tubería, de color amarillo, por donde circula el biogás



Figura 2.37 Corte de la manguera de biogás en la parte superior del reactor anaerobio R-II

2.5 Re-arranque de la planta de biogás

2.5.1 Control de parámetros de operación

El diseño de esta planta de biogás a nivel semi-industrial en Ciudad Universitaria está pensada para operar a determinadas condiciones o parámetros (**Tabla 2.9**) para asegurar una producción diaria de 6,100 L de biogás (Juárez, 2012). Para lograr estar dentro de estos parámetros se procedió con la alimentación de biomasa hacia los reactores anaerobios para que así se empezara lo antes posible la producción del biogás y detectar fallas del proceso o de la planta, principalmente por falta de mantenimiento, y así corregir cualquier problema con anticipación y que no afectara en el tiempo de re-arranque. Un factor importante también para acelerar el proceso fue que se utilizaron 35 gramos de la pastilla de enzimas anaerobias, de origen italiano, junto con la primera carga de biomasa ingresada, de aproximadamente 90 litros, a los reactores anaerobios. Con esto se pretendía ayudar a la formación de las bacterias y con esto agilizar el proceso de re-arranque.

Tabla 2.9 Parámetros de la planta de biogás de Ciudad Universitaria (Juárez, 2012)

Parámetro	Valor estimado
Disponibilidad diaria de materia orgánica G_{FORSU}	40.46 kg/día
Propiedades de la materia orgánica	22.96% ST 94.21% STV (como % ST) 5.79% STF (como % ST) pH, 5.74 ρ , 715.41 kg/m ³
Temperatura de digestión	Cercana a los 20 °C
Flujo diario de sustrato Q	0.0692 m ³ /día
Concentración de STV en el sustrato S_0	126.5 kgSTV/m ³ (12.65% STV)
Volumen del digestor V	4.51 m ³ ($V_{\text{efectivo}} = 6.0 \text{ m}^3$)
Tiempo de Residencia Hidráulico TRH	65 días
Velocidad de carga orgánica VCO	1.94 kgSTV/m ³ -día
Producción específica de biogás PEG	0.6968 m ³ _{biogás} /kgSTV
Tasa de producción de biogás TPG	1.3525 m ³ _{biogás} /m ³ _{reactor} -día
Remoción de materia orgánica %STV	63.0%
Contenido de CH ₄ en el biogás %	56%

2.5.2 Fallas a encontrarse

La primera falla en presentarse fue que no podía haber una recirculación adecuada en el reactor anaerobio R-II, esto debido a que la bomba ya se encontraba dañada por haber superado su capacidad de funcionamiento, lo cual alentó bastante el proceso, ya que la bomba únicamente puede funcionar como máximo un periodo de 40 minutos para que no se sobrecaliente y se corra el riesgo de quemarse, de ahí se empezó a analizar la opción de sustituirla y la mejor opción a la que se llegó dentro del análisis fue hacer la sustitución por una bomba peristáltica, un poco difícil debido al precio de la misma bomba, pero con la que la planta generadora de biogás de Ciudad Universitaria funcionaría sin límite de tiempo para hacer una correcta recirculación de biomasa dentro del sistema de los reactores anaerobios de la planta. El proceso de re-arranque es la recopilación de pasos que se dictan en el manual de operación y que se deben seguir a cabo paso por paso.

2.5.3 Recopilación de datos

En la **Tabla 2.10** se muestra la bitácora llevada a cabo durante los nueve meses en los que se prestó servicio social dentro de las instalaciones de la planta de biogás donde cabe resaltar que hay mucha variación en cuanto al volumen ingresado a los reactores, esto debido a que en este tipo de planta se depende de la cantidad de generación de residuos orgánicos de los restaurantes, con los que existe un arreglo, para que proporcionen la biomasa a la planta generadora de biogás y también se depende de qué tipo de biomasa se obtenga de la recolección; ya que hay biomasa que no puede ser procesada por este tipo de planta generadora de biogás.

En la **Figura 2.38** de nueva cuenta se ilustra que el tiempo de mezclado es variable debido a la intermitencia del uso de la bomba y se compara con la producción de biogás que debería haber (6,100 L/día) según la teoría para corroborar la influencia del tiempo de mezclado con la producción de biogás.

En la **Figura 2.39** se compara el volumen de alimentación con la producción de biogás que debería haber, recordando que para obtener dicha cantidad de biogás se debe alimentar a los reactores con 70 L/día de sustrato.

Por último en la **Figura 2.40** se ilustra que a pesar de las variaciones en el tiempo de residencia hidráulico, el pH del efluente siempre se mantiene en los parámetros óptimos, esto en parte se debe a que se le suministraba la enzima anaerobia que fortaleció el proceso para que fuera constante.

Tabla 2.10 Anotaciones extraídas de la bitácora de trabajo de la planta de biogás en Ciudad Universitaria

No. de día	Fecha	Tiempo de mezclado R-I min	Tiempo de mezclado R-II min	Volumen de alimentación L	pH del efluente	pH del influente	TRH semanas
1	26-sep-16	55	60	90	7	11	9.14
2	27-sep-16	55	65	84	6	11	9.71
3	28-sep-16	40	20	90	6	8	9.14
4	29-sep-16	55	65	88	6	10	9.29
8	3-oct-16	40	20	64	6	8	12.71
9	4-oct-16	55	65	72	6	8	11.43
10	5-oct-16	40	40	54	7	8	15.14
11	6-oct-16	50	50	58	6	7	14.14
12	7-oct-16	100	90	120	6	8	6.86
15	10-oct-16	100	90	120	6	8	6.86
16	11-oct-16	55	65	71	6	9	11.57
17	12-oct-16	55	65	122	6	7	6.71
18	13-oct-16	55	65	60	6	6	13.57
19	14-oct-16	55	65	92	7	8	8.86
22	17-oct-16	55	65	118	6	6	7
23	18-oct-16	55	65	63	6	6	13
24	19-oct-16	55	65	62	6	6	13.14
25	20-oct-16	20	70	70	7	7	11.71
26	21-oct-16	60	110	90	7	8	9.14
29	24-oct-16	60	120	98	6	7	8.43
30	25-oct-16	40	65	78	8	7	10.43
31	26-oct-16	60	120	44	7	7	18.57
32	27-oct-16	20	40	44	7	7	18.57
33	28-oct-16	55	65	68	6	7	12
38	3-nov-16	20	60	79	6	8	10.43
46	11-nov-16	50	60	39	7	9	20.86
50	15-nov-16	25	60	26	7	8	31.29
51	16-nov-16	55	65	150	7	7	5.26
59	24-nov-16	55	65	86	6	9	9.57
129	2-feb-17	30	60	64	7	8	12.71
130	3-feb-17	30	60	42	7	8	19.43
135	8-feb-17	55	65	106	7	8	7.71
136	9-feb-17	20	40	40	8	8	20.43
137	10-feb-17	30	60	37	8	7	22
142	15-feb-17	20	40	22	6	7	37
143	16-feb-17	30	60	60	7	8	13.57
148	21-feb-17	30	60	68	7	7	12
149	22-feb-17	30	60	58	7	8	14.14
150	23-feb-17	20	40	58	7	7	14.14
151	24-feb-17	20	40	54	7	7	15.14
157	02-mar-17	30	60	102	8	8	8
176	21-mar-17	50	100	54	7	8	15.14
177	22-mar-17	20	40	34	7	8	24
178	23-mar-17	30	60	65	7	8	12.57
184	29-mar-17	20	40	32	7	7	25.43
192	6-abril-17	30	60	64	7	8	12.71
193	7-abril-17	20	20	24	7	7	34
204	18-abril-17	30	30	38	7	8	21.43
205	19-abril-17	30	0	20	7	8	40.71

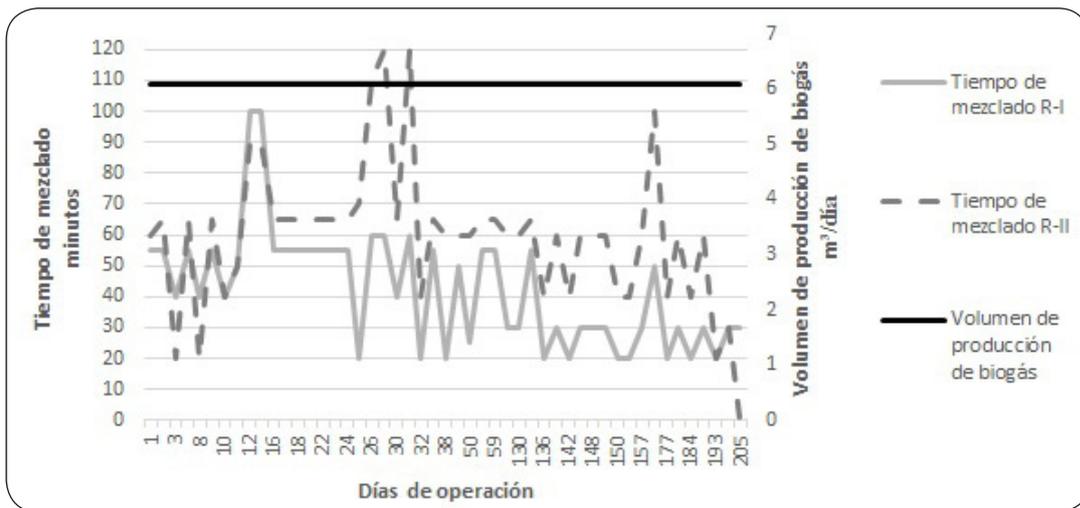


Figura 2.38 Comportamiento del digester con respecto al tiempo de mezcla en ambos reactores anaerobios y a la producción que debería de haber de biogás

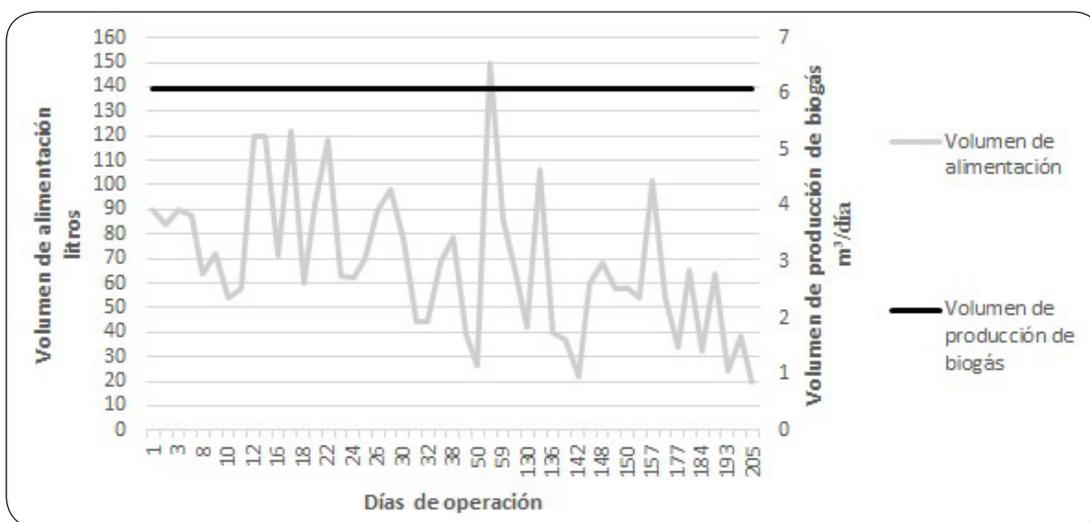


Figura 2.39 Comportamiento del digester con respecto al volumen de alimentación y a la producción que debería de haber de biogás

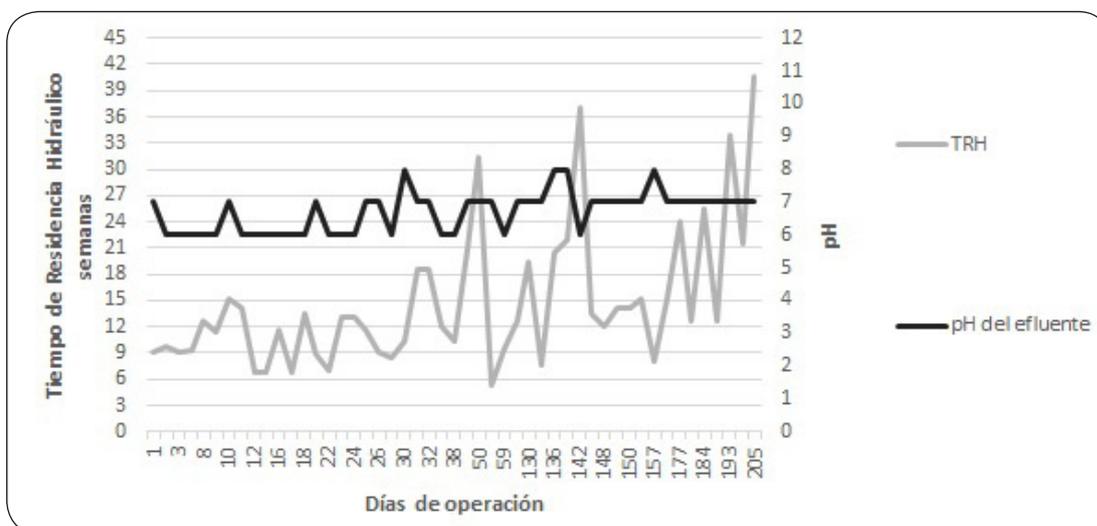


Figura 2.40 Comportamiento del TRH con respecto al pH del efluente

2.6 Recomendaciones para la mejora

En este apartado se explican tres propuestas, dentro de la **Tabla 2.11**, para mejora y desarrollo de este proyecto, de estas propuestas dos están en proceso de ser puestas en marcha dentro de las instalaciones de la planta generadora de biogás en Ciudad Universitaria. Inclusive una de ellas ha sido mencionada en contadas ocasiones dentro de este escrito, lo que se pretende dar a conocer a la audiencia es que hay mucho trabajo por aportar dentro de este proyecto para seguir desarrollándolo y contribuyendo al aprendizaje y formación de los futuros ingenieros de este país.

Tabla 2.11 Recomendaciones de aplicación para mejora de la planta de biogás a nivel piloto

Concepto	Desarrollo o justificación
Sustitución de la bomba	Ya que la bomba incluida inicialmente en el proyecto se vio afectada o rebasada en cuanto a potencia requerida por el tipo de trabajo que se realiza, principalmente el de transporte de sólidos que es lo que más potencia exigió a la bomba y la que más la puso en riesgo. Inclusive por comentarios de anteriores operadores se llegó a saber que en varias ocasiones la bomba tuvo que ser desarmada y reparada ya que por la potencia exigida no aguantó trabajar el tiempo requerido por el proyecto y se averió, entonces la mejor solución a la que se llegó fue la de hacer una sustitución por una bomba peristáltica que cuenta con las siguientes características: Marca Xylem serie NPE con presión de 448.35 KPa, flujo de 643.5 l/s, trabajo a una temperatura de hasta 120 °C, fabricado en Hierro fundido y acero inoxidable 304 y 316, y con acoplamiento directo o universal.
Implementar sensores	Implementación de sensores de temperatura, pH, niveles de CO ₂ y de CH ₄ en el biogás y de presión para tener un mejor control ya que éstos elementos son determinantes en la producción de biogás y deben ser sensados en todo momento durante el proceso de formación del biogás, ya que en la actualidad cuando se sensan éstos parámetros si algo falla no se puede tener una respuesta inmediata he ahí su enorme importancia de conocerlos en tiempo real.
Contar con equipo y material	Contar con equipo como mangueras o una máquina, como por ejemplo una máquina Karcher, para mantener limpio de alimañas la planta de biogás. Contar con herramientas adecuadas para llevar a cabo el mantenimiento mecánico. Contar con una carretilla o un diablito apropiado, para lograr abarcar recolección en más restaurantes, para recolectar residuos orgánicos útiles para este tipo de planta generadora de biogás y así poder generar más biogás y lograr el objetivo de la planta generadora de biogás en Ciudad Universitaria, que es la de ayudar a mitigar emisiones de metano (CH ₄) a la atmósfera, utilizándolo de manera efectiva, y al mismo tiempo ayudando al restaurante “Cibarium” a aportarle biogás para el calentado de sus alimentos. De esta manera aparte de mitigar emisiones de CH ₄ se evita el uso de combustibles fósiles en el calentamiento de alimentos. Posiblemente, en algún futuro no muy lejano, se pudiera concretar generar electricidad por cogeneración y ayudar a mitigar más emisiones, así como mejorar el desarrollo tanto de la Universidad como del país. Por último mencionar que se debe contar con la manera de tener al alcance los materiales propuestos, pero a la vez mantenerlos seguros porque muchos materiales, como los sugeridos aquí han sido sustraídos de manera ilegal y esto ha repercutido en no contar en estos momentos con ellos y que sea más difícil volverlos a adquirir.

Capítulo 3.

Conclusiones

Se llevó a cabo la operación y mantenimiento, en algunas áreas, de una planta productora de biogás a nivel prototipo para, por medio de la degradación anaerobia de los residuos sólidos orgánicos generados en dos restaurantes de Ciudad Universitaria, obtener biogás combustible y con él producir energía térmica. La planta se operó partiendo de una disponibilidad diaria promedio de 34.6 kg, donde en este tipo de planta, se eligió la modalidad de digestión húmeda, de ahí que los residuos deban ser pre-tratados a fin de obtener un sustrato con una concentración de sólidos inferior al 15%. Este sistema está compuesto por dos digestores, uno de 1.25 m³ y el otro de 5.0 m³, además de un par de estanques para los efluentes donde se sedimentan los lodos digeridos y que en conjunto suman 1.20 m³.

La planta a pesar de haber estado en constante operación desde su construcción, en el año 2012, fue presentado conflictos en su operación como el de la bomba con la que se pensó el trabajo en este proyecto no fue la adecuada, para los requerimientos, lo cual redujo y hasta cierto punto mitigó la producción de biogás. Una vez al tomar la operación por mi conducto se trabajó y se analizaron las opciones viables para la sustitución de una bomba adecuada para el proyecto, y aun así se siguió operando la planta, pero ahora con la suma precaución de no forzarla para no descomponerla, para que pueda usarse en otro proyecto. Al continuar operando la planta se fueron presentando otros inconvenientes que se fueron solucionando conforme se presentaban, así como también surgieron algunas propuestas para seguir mejorando la planta de biogás a nivel prototipo.

El objetivo primordial para el que fue construida la planta de biogás a nivel prototipo en Ciudad Universitaria fue de contribuir con el biogás a 6% de la demanda total de energía final para cocción del restaurante “Cibarium”. Con la evaluación económica y el incremento anual del gas LP ayuda a reflejar la rentabilidad y la sustentabilidad energética en general del restaurante, registrando una mejora como resultado de la incorporación de la planta de biogás a nivel prototipo, esto resalta la importancia de buscar conseguir los resultados establecidos en el diseño de este proyecto, para que no quede nada más en un reflejo positivo en lo económico, sino también en lo ambiental.

Glosario

- *Alevín*: Se refiere a la cría del pez.
- *Cepa*: Grupo de organismos emparentados, como las bacterias, los hongos o los virus, cuya ascendencia común es conocida.
- *Cogeneración*: Procedimiento mediante el cual se obtiene de manera simultánea energía térmica y energía eléctrica, a partir de una sola fuente de energía.
- *Corrosión*: Desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma.
- *Depuración*: Se refiere a la acción de limpiar o purificar.
- *Dilucidar*: Aclarar y especificar un asunto, especialmente si es confuso o controvertido, para su posible resolución.
- *Efluente*: Líquido que procede de una planta industrial.
- *Habitáculo*: Recinto de pequeñas dimensiones destinado a ser ocupado por personas o animales.
- *Hidrólisis*: Se refiere a la descomposición o alteración de una sustancia química por medio de la molécula del agua.
- *Influyente*: Líquido que se administra a una planta industrial.
- *Kilopondio*: Abreviado “kp”, se refiere al kilogramo-fuerza, y en el Sistema Internacional de Unidades es equivalente a 9.81[N].
- *Lechada*: Líquido que tiene en suspensión cuerpos insolubles muy divididos.
- *Odorizado*: Esparcir olor o perfumar, sinónimo de olorizar.
- *Onerosa*: Pesado, molesto o gravoso.

Bibliografía

Costa, A. 2013. *Biomasa y biocombustibles*. Una visión completa de las tecnologías empleadas en la transformación de la biomasa en biocombustible. El programa brasileño bioetanol. Una solución energética y socioeconómica para España. AMV Ediciones. Madrid, España.

Díaz, J. 2015. *Sistemas de energías renovables*. Ediciones Paraninfo. Páginas 201-223. Madrid, España. España.

Fernández, J. 2009. *Tecnología de las energías renovables*. A. Madrid Vicente Ediciones. Páginas 330-334. Madrid, España. España.

Juárez, S. 2012. *Planeación, diseño e instalación de un prototipo para la conversión de desechos orgánicos a energía térmica*. Tesis de Maestría de Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., México.

Khandelwal, K. e Mahdi, S. 1993. *Biogas technology. A practical handbook*. Volume I. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. Páginas 51-56. Asaf Ali Road, New Delhi, India.

Lemme, J. 1985. *Instalaciones aplicadas en los edificios. Combustibles. Gas. Biogás*. Librería "El Ateneo" Editorial. Páginas 181-185. Buenos Aires 15 agosto de 1985. Argentina.

Madrid, A. 2012. *Guía completa de las energías renovables y fósiles*. A. Madrid Vicente Ediciones. Páginas 97-104 y 113-114. Madrid, España. España.

MARM, 2010. *El sector del biogás agroindustrial en España*. Mesa sobre materia prima agraria y biocombustibles. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Medio Rural y Marino. Madrid, España.

OCDE, 2010. OECD Factbook 2010. Economic, *Enviromental and Social Statics*. *Environment-Air and land-Municipal waste*. Publicación de la Organisation for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

Semarnat, 2016. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. Compendio de estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. México.

Tchobanoglous, G., Theisen H. y Vigil, S. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill. Primera edición. Madrid, España.