

2014

Comportamiento de la eficiencia de un reactor de lecho granular expandido (EGSB) conforme a la implementación del sello hidráulico

Sebastián Andrés Sosa Acosta
Universidad de La Salle, Bogotá

Paola Catalina Laverde Barrero
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria



Part of the [Environmental Engineering Commons](#)

Citación recomendada

Sosa Acosta, S. A., & Laverde Barrero, P. C. (2014). Comportamiento de la eficiencia de un reactor de lecho granular expandido (EGSB) conforme a la implementación del sello hidráulico. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/963

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE UN REACTOR DE LECHO
GRANULAR EXPANDIDO (EGSB) CONFORME A LA IMPLEMENTACIÓN
DEL SELLO HIDRÁULICO**

**SEBASTIÁN ANDRES SOSA ACOSTA
PAOLA CATALINA LAVERDE BARRERO**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**

**BOGOTÁ D.C.
2014**

**COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE UN REACTOR DE LECHO
GRANULAR EXPANDIDO (EGSB) CONFORME A LA IMPLEMENTACIÓN
DEL SELLO HIDRÁULICO**

**SEBASTIÁN ANDRES SOSA ACOSTA
PAOLA CATALINA LAVERDE BARRERO**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

**Director
ROBERTO BALDA AYALA**

**Ingeniero de alimentos
MSc. Ingeniería Sanitaria**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**

**BOGOTÁ D.C.
2014**

Notas de aceptación:

Ing. Roberto Rafael Balda Ayala

Firma Director

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, D.C. 6 de Noviembre de 2014

Dedicamos este trabajo de manera muy especial a:

En primer lugar a Dios por colmar mi vida de bendiciones y salud, permitiéndome levantarme cada día con la convicción de alcanzar mis objetivos. A mis padres, que además de ser las personas más importantes en mi vida, siempre me brindaron sus consejos, sus valores, su apoyo, por ser mis ejemplos de vida, pero sobre todo su amor. A mis hermanos por su paciencia, su tolerancia, su apoyo y su amor. A mis familiares y amigos que hicieron parte de este proceso y que siempre tuvieron una palabra de motivación. A la Universidad de La Salle, en especial al programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria por permitirme ser parte de esta nueva generación de ingenieros, que con seguridad aportaran muchas cosas buenas a la sociedad y al medio ambiente.

SEBASTIÁN SOSA ACOSTA

Este trabajo va dedicado principalmente a mis padres Miguel Laverde y Sara Barrero por ser los gestores y promotores de todos mis triunfos y éxitos en la vida , que con su apoyo incondicional me motivan diariamente a luchar y a esforzarme por el cumplimiento de mis sueños, a mis hermanas que siempre han estado ahí acompañándome en mi camino dándome enseñanzas y valores , y a aquellas personas que han contribuido en este proceso mis tíos, primos, mis abuelitas, mis amigos de la vida y compañeros de carrera que marcaron una gran etapa en mi vida.

PAOLA LAVERDE BARRERO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El Ingeniero Roberto Balda Ayala por ser una persona incondicional en este trabajo de grado, por sus aportes, por su dedicación, por su orientación y sobre todo por su amistad.

El profesor Eduardo Ladino por sus asesorías, observaciones y comentarios en el desarrollo de este trabajo.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle y a todo su personalidad, por su amabilidad y atención prestada.

A la industria textil por su colaboración, suministro de información y aporte de las muestras de agua residual para toda la experimentación realizada durante la investigación.

A la industria de alimentos por proporcionar el lodo anaerobio para el arranque del reactor piloto EGSB.

Todas aquellas personas que de una u otra manera, ayudaron en el desarrollo de este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

Glosario.....	ix
Resumen.....	xiv
Abstract.....	xv
1. Introducción.....	1
2. Planteamiento del problema.....	3
2.1. Descripción del problema.....	3
2.2. Justificación.....	4
2.3. Antecedentes.....	4
3. Objetivos.....	8
3.1. Objetivo General.....	8
3.2. Objetivos específicos.....	8
4. Marco teórico.....	9
4.1. Digestión anaerobia.....	10
4.1.1. Hidrólisis y fermentación.....	12
4.1.2. Acetogénesis.....	12
4.1.3. Homoacetogénesis.....	13
4.1.4. Metanogénesis.....	14
4.2. Reactor UASB.....	14
4.2.1. Forma y tamaño.....	14
4.2.2. Separador de fases.....	16
4.3. Reactor EGSB.....	17
4.4. Etapa de arranque.....	20
4.4.1. Factores Ambientales.....	21
4.4.1.1. <i>Temperatura</i>	21
4.4.1.2. <i>pH</i>	22
4.4.1.3. <i>Tipo de Sustrato</i>	22
4.4.1.4. <i>Nutrientes</i>	23
4.5. Etapa de operación.....	26
4.6. Actividad metanogénica específica.....	27
4.7. Sello hidráulico.....	28
4.8. Paradoja de Pascal.....	29

5.	Metodología	30
5.1.	Fase I: Preparación.....	32
5.1.1.	Recopilación de información acerca de la hidráulica y funcionamiento de un reactor EGSB y su sello hidráulico.	32
5.1.2.	Verificación de los parámetros de diseño del reactor EGSB piloto.	32
5.1.3.	Pruebas hidráulicas con agua potable al reactor EGSB piloto.	32
5.1.4.	Pre experimentación con bombas sumergibles.	34
5.1.5.	Consecución de materia prima e inoculación del reactor piloto EGSB.	43
5.1.6.	Consecución del sustrato.....	44
5.1.7.	Montaje del sistema.	48
5.1.7.1.	<i>Tanque de acidificación.</i>	48
5.1.7.2.	<i>Tanque de acondicionamiento.</i>	48
5.1.7.3.	<i>Reactor piloto EGSB.</i>	49
5.1.8.	Corroboración de las condiciones de arranque del reactor.	54
5.2.	Fase II: Experimentación sin sello hidráulico (SH)	55
5.2.1.	Caracterización de la muestra sin la implementación del sello hidráulico.....	55
5.2.2.	Seguimiento visual a la generación de burbujas y su trayectoria.....	59
5.3.	Fase III: Implementación del sello hidráulico.....	59
5.3.1.	Determinación de la posición adecuada de la estructura que aseguró el sello hidráulico.	60
5.3.2.	Montaje de la estructura que aseguró el sello hidráulico en el reactor.	60
5.4.	Fase IV: Experimentación con sello hidráulico.	60
5.4.1.	Caracterización de la muestra con la implementación del sello hidráulico.	61
5.4.2.	Seguimiento visual a la generación de burbujas y su trayectoria.....	64
5.5.	Fase V: Análisis estadístico de la experimentación.	65
5.5.1.	Observación pareada y planteamiento de hipótesis.	65
5.5.2.	Tabla de distribución T de Student.	68
6.	Resultados y análisis de resultados	70
6.1.	Sello hidráulico	70
7.	Conclusiones	79
	Recomendaciones	83
	Bibliografía	84
	Anexos	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Montaje experimental	6
Figura 2. Hidrólisis y fermentación	12
Figura 3. Campanas separadoras.....	15
Figura 4. Diseños combinados para reactores UASB	16
Figura 5. Modelo EGSB	18
Figura 6. Sello hidráulico de un reactor anaerobio	29
Figura 7. Paradoja de Pascal	29
Figura 8. Tipos de variables.....	30
Figura 9. Resumen metodológico	31
Figura 10. Pruebas hidráulicas	33
Figura 11. Accesorios hidráulicos.....	33
Figura 12. Ubicación de la bomba sumergible y su desempeño en dos posiciones de cabeza hidráulica diferentes.....	34
Figura 13. Muestreo compuesto de agua residual en la industria textil	45
Figura 14. Reactor piloto EGSB	50
Figura 15. Sección 1 o de alimentación al reactor	51
Figura 16. Sección 2 o de manto de lodos del Reactor EGSB	52
Figura 17. Sección 3	52
Figura 18. Estructura del montaje	53
Figura 19. Velocidad de sedimentación del lodo granular antes de la implementación del sello hidráulico.	56
Figura 20. Medición del tamaño del lodo granular	57
Figura 21. Velocidad de sedimentación del lodo granular después de la implementación del sello hidráulico	62
Figura 22. . Medición del tamaño del lodo granular	62
Figura 23. Tabla de distribución T de Student.....	69
Figura 24. Relación de datos.....	69
Figura 25. Presión en el punto B, en función del punto A	71
Figura 26. Gradiente de altura de la estructura que aseguró el sello hidráulico en el reactor EGSB piloto No. 1.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Requerimientos nutricionales de las bacterias metanogénicas</i>	24
Tabla 2. <i>Relación C: N: P</i>	25
Tabla 3. <i>Rangos típicos de temperatura para las bacterias</i>	26
Tabla 4. <i>Características de la bomba</i>	35
Tabla 5. <i>Determinación de la velocidad del fluido</i>	36
Tabla 6. <i>Determinación del Número de Reynolds para el agua residual</i>	36
Tabla 7. <i>Determinación de la rugosidad relativa</i>	37
Tabla 8. <i>Determinación del factor de fricción</i>	37
Tabla 9. <i>Perdidas por longitud, tubería de plástico de 2.10 cm y diámetro 1/2"</i>	38
Tabla 10. <i>Pérdida por válvula de verificación</i>	39
Tabla 11. <i>Pérdida por codo de 90 °</i>	39
Tabla 12. <i>Pérdidas por longitud, tubería de PVC de 50 cm y diámetro 1/2"</i>	40
Tabla 13. <i>Pérdida por expansión gradual</i>	41
Tabla 14. <i>Pérdida por vertedero</i>	41
Tabla 15. <i>Pérdida de energía total en el sistema</i>	42
Tabla 16. <i>Potencia de la bomba sumergible</i>	42
Tabla 17. <i>Composición de la muestra de agua residual de la industria textil</i>	46
Tabla 18. <i>Caracterización de la muestra</i>	47
Tabla 19. <i>Condiciones de arranque del reactor</i>	54
Tabla 20. <i>Relación de parámetros con el número de muestras antes de la implementación del sello hidráulico</i>	56
Tabla 21. <i>Concentración de DQO del afluente y el efluente para las 7 muestras tomadas y % de reducción del mismo</i>	58
Tabla 22. <i>Valores de la caracterización de la muestra antes de la implementación del sello hidráulico</i> ..	59
Tabla 23. <i>Relación de parámetros con el número de muestras después de la implementación del sello hidráulico</i>	61
Tabla 24. <i>Concentración de DQO y % de reducción del mismo en el efluente con la implementación del sello hidráulico según la concentración inicial</i>	63
Tabla 25. <i>Valores de la caracterización de la muestra después de la implementación del sello hidráulico</i>	64
Tabla 26. <i>Planteamiento de hipótesis</i>	66
Tabla 27. <i>Variables para la ecuación de la observación pareada</i>	67
Tabla 28. <i>Valor de la media (\bar{X}). Promedio de la diferencia de concentraciones de DQO antes y después de la implementación de sello hidráulico</i>	68
Tabla 29. <i>Variables de la ecuación fundamental de la estática de presión para el punto B.</i>	72
Tabla 30. <i>Variables de la ecuación fundamental de la estática de presión para la presión en el sello hidráulico</i>	73
Tabla 31. <i>Variables de la ecuación fundamental de la estática de presión para el punto C en el interior del tubo</i>	75
Tabla 32. <i>Velocidad de salida de la burbuja de gas para el punto C</i>	76

Tabla 33. <i>Ilustraciones de los diferentes gradientes de altura</i>	77
Tabla 34. <i>Tabla resumen de presión y velocidad para los cuatro gradientes</i>	78
Tabla 35. <i>Caracterización cualitativa</i>	80

Glosario

- **Afluente:** Agua u otro líquido que ingresa a una planta de tratamiento o a un proceso de tratamiento.
- **Agua residual:** Agua que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria.
- **Biogás:** El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de oxígeno. El producto resultante es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 40% a un 70% y dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). (Realidad, Impacto y Oportunidades de los Biocombustibles en Guatemala).
La producción de biogás está directamente ligada a la ubicación del sello hidráulico, la concentración de DQO, carga orgánica, tiempo de retención hidráulico y velocidad ascendente de alimentación.
- **Biomasa:** Materia orgánica de origen vegetal o animal, que tiene su origen en un proceso biológico susceptible de ser aprovechada energéticamente. Siendo el indicador de la producción de energía de cierto organismo. Cultivo de microorganismos
- **Caracterización de las aguas residuales:** Determinación de la cantidad y de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.
- **Carga Contaminante:** Es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día (kg/d).

- **Campana trifásica:** Estructura mediante la cual se captura el biogás producido por la actividad microbiana del lodo anaerobio, logrando la separación del lodo, agua residual y biogás y la precipitación de gránulos anaeróbicos que puedan llegar hasta esta zona además de permitir el paso del agua con carga contaminante disminuida. (González,2013)
Esta consta de varias cámaras separadas por deflectores, en las que el gas es recolectado además de impedir la salida de los sólidos, además de garantizar la generación de la interfase gas-líquido la cual debe ser notable y debe sugerir el correcto funcionamiento del sistema.
- **DQO:** La DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química de la materia orgánica presente en una muestra de agua. Para su determinación se emplea un agente oxidante fuerte, en medio ácido y con elevada temperatura, en presencia de un catalizador (sulfato de plata). Para un agua residual la DQO debe ser un valor entre 400 y 1500 mg/L.
- **Efluente:** Líquido que sale de una planta de tratamiento de agua residual o de un proceso de tratamiento.
- **Lodo granular:** Puede ser definido como biomasa con propiedades muy específicas, las cuales lo hacen apropiado para sistemas de tratamiento en flujo ascendente. Morfológicamente el lodo granular puede ser caracterizado como partículas mecánicamente grandes, mayores a 0,50 mm de diámetro, frecuentemente de forma granular y esférica bien definida, pose elevada densidad y alta actividad metanogénica que consisten en una mezcla de microorganismos anaerobios entrelazados simbióticamente.
Cada uno de los gránulos es una unidad funcional en sí misma, que contiene a todos los diferentes microorganismos necesarios para la degradación metanogénica de la materia orgánica.
La formación de gránulos de lodo se vuelve excesivamente importante porque no sólo sirve para soportar la flora microbiana, sino también proporciona la flotabilidad y la decantación necesaria para que haya un muy vigoroso contacto entre el gránulo y el líquido en el reactor. (González, 2013)

- **Nutrientes:** Sustancias que sirven de alimento a los microorganismos suministrándoles los elementos necesarios para su desarrollo.
- **Parámetro de diseño:** Son aquellos criterios que se encuentran establecidos previamente para el diseño de una operación unitaria.
- **Planta piloto:** Es una planta de proceso a escala reducida. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, que permita determinar si el proceso es técnica y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial.
- **Reactor anaerobio:** Consiste en un equipo donde se lleva a cabo un proceso bacteriano que se realiza en ausencia de oxígeno. El proceso puede ser la digestión termofílica en la cual el lodo se fermenta en tanques a una temperatura de 55 °C o mesofílica en la cual el proceso se lleva a cabo a una temperatura alrededor de 36 °C.
En el reactor anaerobio se genera biogás conformado en una parte elevada de metano que se puede utilizar para la producción de energía dentro de la planta.
- **Reactor EGSB:** del inglés (*Expanded Granular sludge bed*) es un reactor anaerobio para tratar agua residual de diferentes industrias con altas cargas contaminantes con alta eficiencia en remoción de los mismos.
- **Sello hidráulico:** Es una contra-columna de agua situada en la parte inferior de la campana trifásica, que evita la entrada de aire aguas arriba y opera como una válvula de seguridad de presión, evitando el retorno del biogás.
- **Sustrato:** Compuesto o sustancia a degradar. En este caso la materia orgánica (contaminantes) en el agua residual que se puede biodegradar.

- **Velocidad ascensional:** Desplazamiento en forma ascendente del agua residual con respecto a una unidad de tiempo a través de un área determinada. Se mantiene en suspensión formando el lecho fluidizado.

Para mantener el manto de fango en suspensión, es necesario que la velocidad de flujo ascendente tenga un valor de entre 3 y 12 m/h, la cual no es muy alta y asegura la producción estable de biogás.

- **Vertimiento:** Descarga final a un cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido.

Siglas y abreviaturas

AGV: Ácidos grasos volátiles

AME: Actividad metanogénica específica

AR: Aguas residuales

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EGSB: Expanded granular sludge bed- Granular de lecho expandido

SH: Sello hidráulico

SST: Sólidos suspendidos totales

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

TAR: Tratamiento de agua residual

TRH: Tiempo de retención hidráulico

UASB: Up flow anaerobic sludge blanket- Flujo ascendente con manto de lodos

Ve: Vertimiento

Resumen

El presente documento tiene como finalidad determinar la incidencia que tiene la ubicación del sello hidráulico para extraer el biogás generado por un reactor anaerobio de lecho expandido granular EGSB (del inglés *Expanded granular sludge bed*) para garantizar la generación de la interfase gas-líquido dentro de la campana trifásica y con ello su incidencia en la eficiencia de remoción de la DQO. La investigación se llevó a cabo en la planta piloto de la Universidad de la Salle sede Candelaria, donde está ubicado el reactor.

Para empezar se verificó los parámetros de diseño del reactor EGSB piloto, acompañado de pruebas hidráulicas para corroborar el correcto funcionamiento del sistema, entre ellas la generación de burbujas de gas y su trayectoria. Estas pruebas se realizaron, en principio, solamente con agua potable para detección de fugas en el sistema y posteriormente se dio inicio al arranque del reactor con agua residual de una industria textil y lodo anaerobio de una industria de alimentos. Después de esto se realizaron los ensayos para la ubicación del sello hidráulico, el cual se hace indispensable para evitar el arrastre de sólidos suspendidos a través del ducto de extracción de biogás cuando la campana es sumergida y asegurar su correcta extracción. Con esto se pudo establecer un parámetro de diseño para la construcción e implementación de sello hidráulico en reactores similares, donde se observó que éste debe estar ubicado sobre el nivel del suelo por debajo de la campana, con el fin de obtener un diferencial de presión mayor respecto a la campana y de esta manera facilitar la extracción del biogás. Junto con esto se pudo hacer una observación visual de las burbujas de biogás y del arrastre de biomasa (lodo granular y/o floculento).

El índice de remoción de DQO fue mayor después de implementar el sello hidráulico ya que se aseguró la extracción de biogás y la formación de la interfase gas- líquido, lo que demuestra que aquel resulta ser un componente fundamental para mejorar la eficiencia en un reactor anaerobio.

Palabras clave: sello hidráulico, biogás, campana, DQO, interfase, biomasa

Abstract

This paper aims to determine the impact that has the location of the hydraulic seal to remove the biogas generated by the expanded granular sludge bed to ensure the generation of the gas-liquid interface within the GLSS (Gas liquid solid separator) and thus its impact on the efficiency of COD removal. The research was conducted in a pilot at La Salle University, where the reactor plant was placed.

To begin the design parameters of the pilot EGSB were verified, accompanied by hydraulic tests to confirm the correct operation of the system, including the generation of gas bubbles and their trajectory. These tests were performed, first with potable water to detect leaks in the system and subsequently the start up the reactor began with wastewater from a textile industry using anaerobic sludge from a food industry as inoculum. After this test a hydraulic seal was placed as an essential device to prevent the entrainment of suspended solids through the gas pipeline when the GLSS is submerged and ensure the extraction of biogas. With this, it was established a design parameter for the construction and implementation of the hydraulic seal in similar reactors, where it was observed that it should be located above the ground, under the GLSS in order to obtain a differential pressure greater and relative to the GLSS and thus facilitating the extraction of biogas. Along with this a visual observation of the gas bubbles and drag of biomass (flocculent and granular) could be established.

The COD removal rate was higher after implementing the water seal and the biogas production and the formation of the gas-liquid interface was assured, which proves to be an important device to improve the efficiency in an anaerobic reactor.

Key words: hydraulic seal, biogas, bell, COD, interface, biomass

1. Introducción

La generación de vertimientos y aguas residuales, al igual que otros impactos ambientales pueden considerarse casi inevitables. Por esta razón es fundamental utilizar herramientas que permitan reducir, minimizar y mitigar los impactos negativos que se generan al medio ambiente y deterioran los recursos naturales. El constante crecimiento demográfico e industrial genera un incremento considerable en la producción de residuos líquidos y aguas residuales, por lo tanto se deben implementar soluciones efectivas y sostenibles, con el fin de garantizar un ambiente sano y preservar los recursos para las siguientes generaciones.

Una de las alternativas para tratar los vertimientos y aguas residuales, es someter los mismos a diferentes tratamientos que permitan modificar su composición y se pueda realizar la descarga a los diferentes receptores ya sea a un cuerpo de agua natural, alcantarillado u otro de una manera ambientalmente amigable. Los sistemas de tratamiento anaerobios son de los más eficientes en la actualidad, para vertimientos con concentraciones altas de contaminantes, convirtiéndolos en una de las tecnologías más efectivas para el tratamiento de aguas residuales.

Aunque existan escasas investigaciones, estudios e información respecto al reactor EGSB (*Expanded granular sludge bed*), éste es uno de los sistemas anaerobios más representativos, ya que tiene la capacidad de remover altas cargas orgánicas presentes en las aguas residuales. Este reactor de flujo ascensional, contiene un lecho de lodo granular que tiene constante contacto con el agua permitiendo la degradación orgánica y generación de biogás. Dentro del reactor existe un separador de agua, biogás y sólidos (Campana trifásica) que permite a los gránulos de lodo chocar con los deflectores liberando el biogás adherido en las biopartículas. Las partículas desgasificadas regresan hacia las zonas inferiores del reactor. El biogás es extraído por la campana y el agua estabilizada continúa su proceso dentro del reactor hasta llegar a los vertederos y

posteriormente pasar por un sedimentador para retirar algunos sólidos contenidos en el efluente.

En la actualidad existen fallencias en la separación del biogás dentro de la campana, ya que no es posible separar el flujo combinado de biogás y agua eficientemente, afectando la composición del efluente y la eficiencia de remoción del reactor. Esta falla se debe a la no existencia de un sello hidráulico, es decir una columna de agua que ejerce presión sobre la campana para extraer el biogás y permitir que el agua fluya sin tomar caminos preferenciales.

2. Planteamiento del problema

2.1. Descripción del problema

La generación de aguas residuales es proporcional al crecimiento demográfico e industrial trayendo consigo muchas problemáticas que alteran el equilibrio del medio ambiente y afectan la salud pública; por eso, la labor como Ingenieros Ambientales y Sanitarios es buscar herramientas y alternativas de tratamiento para evitar, reducir, mitigar, compensar y corregir los impactos que se generen al medio ambiente y a los recursos naturales.

Los sistemas anaerobios son de las unidades más eficientes para remover materia orgánica y aunque en muchos países son implementados, actualmente han surgido escasas investigaciones y estudios sobre el diseño y funcionamiento hidráulico de un reactor expandido granular de lecho fluidizado (EGSB). Es importante tener en cuenta cada parámetro a la hora de realizar el diseño para evitar fallas en las etapas de construcción e implementación. A nivel nacional las compañías y empresas que trabajan con estos sistemas, no tienen establecidos diseños propios sino que la mayoría copian los encontrados en bibliografía. Además existen vacíos y lagunas en el área hidráulica respecto al reactor EGSB y otras unidades de tratamiento de aguas residuales, puesto que no han sido explorados a cabalidad.

Cuando se somete un agua residual doméstica o industrial ya sea tratamiento primario, secundario o biológico, se busca que las unidades pertenecientes a estos tratamientos sean lo más eficiente posible con la remoción de carga contaminante y de esta manera poder cumplir con el objetivo del tratamiento. Por tal razón se debe evaluar cada aspecto del sistema y de esta manera darle una mejora continua, con el fin de hacerlos cada vez más eficientes.

2.2. Justificación

La finalidad de este proyecto es establecer pautas de diseño para la ubicación del sello hidráulico en reactores anaerobios y comprobar cómo incide en la eficiencia de remoción de DQO y otros contaminantes.

Los pocos estudios e investigaciones y la necesidad de hacer más eficiente la separación del gas producido en el sistema de la fase líquida justifica el desarrollo y realización del proyecto, ya que ni expertos en hidráulica han podido responder a este comportamiento, que ayudará en gran medida a la comunidad interesada en el tratamiento de agua residual con reactores anaerobios. Además la búsqueda de nuevas alternativas y mejoramiento continuo de las existentes es fundamental para resolver una problemática ambiental a gran escala, como lo es la generación de aguas residuales.

2.3. Antecedentes

A continuación se exponen algunos trabajos realizados acerca de reactores anaerobios en mayor medida de lecho granular expandido (EGSB) y la utilización de sello hidráulico en algunos sistemas

Evaluación del desempeño de un reactor anaerobio de lecho expandido a escala laboratorio con agua residual de una industria de vinos en la ciudad de Bogotá D.C. (Bogotá, Colombia 2004)

Adela María Calderón Martínez - Helbes Enrique López Salazar

En este proyecto, se presentan los resultados obtenidos después de la evaluación del desempeño de un reactor anaerobio de lecho expandido, mediante la ejecución de tres etapas de operación: etapa de arranque, etapa de funcionamiento a condiciones de

diseño y etapas experimentales. Para el desarrollo de las diferentes etapas se monitorearon varios parámetros relacionados con el agua residual, el lodo y el reactor, los cuales permitieron establecer el comportamiento de los microorganismos frente a las diferentes condiciones de operación. En la etapa de arranque fue necesario inocular lodo de buena calidad, al cual se le aplicaron diferentes velocidades ascensionales con el fin de permitir la selección del mismo y mejorar las condiciones de sedimentabilidad.

Se concluyó que: El tratamiento anaerobio de aguas residuales en la industria de vinos en la ciudad de Bogotá resulta ser una alternativa viable, siempre y cuando exista un pretratamiento de la vinaza que reduzca las elevadas cargas contaminantes que contiene, hasta lograr concentraciones de DQO inferiores a los 6500 mg/L O₂. (Calderón y López, 2004)

Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB. (Cali, Colombia 2005)

*Patricia Torres Lozada - Jenny Alexandra Rodríguez - Luz Edith Barba
Adriana Morán - Jorge Narváez*

El propósito de este estudio fue evaluar la aplicación de la Tecnología Anaerobia en un reactor UASB a escala laboratorio, para la degradación biológica de los lixiviados provenientes de un sector del vertedero en que se disponen los residuos sólidos urbanos de una ciudad de 2.4 millones de habitantes.

El reactor UASB fue construido en acrílico, sección circular con diámetro interno de 6 cm, altura 177 cm y volumen de 5 Litros; este sistema dispuso de una campana para recolección de biogás conectada a un sistema de medición por desplazamiento de líquido.

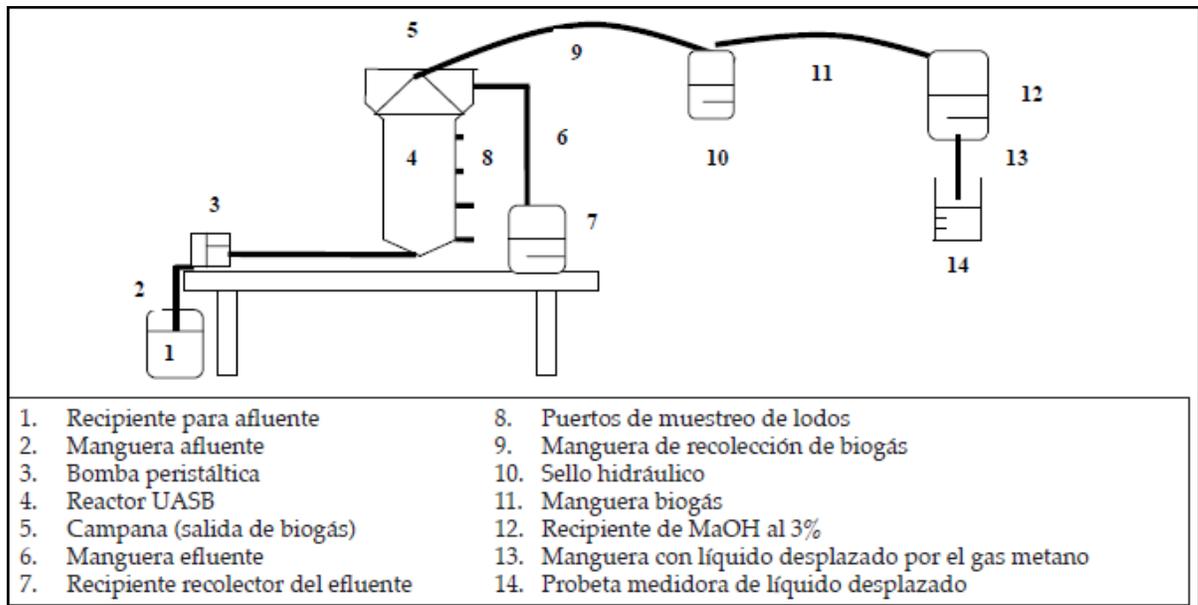


Figura 1. Montaje experimental

Fuente: Torres et al, (2005)

En la figura 1 se observa el sello hidráulico, el cual fue utilizado para depositar la manguera del biogás que venía del reactor con el fin de evitar su escape y asegurar la separación trifásica.

Para finalizar se pudo concluir que este sistema era aplicable para la degradación biológica de lixiviados teniendo en cuenta dos variables muy importantes como los fueron: pH y el fósforo para cumplir con los requerimientos nutricionales de los microorganismos. (Torres et al, 2005)

Diseño de una antorcha en instalaciones de regasificación de GNL. (Madrid, España 2010).

David Gómez Fernández

Este proyecto se hizo con el fin de cubrir la necesidad de trasegar y aliviar un caudal de gas natural en una instalación de regasificación en situaciones excepcionales o de emergencia, en las que el resto de sistemas del proceso, no fueron capaces de absorber dicho caudal de gas natural vaporizado.

La antorcha fue el sistema de seguridad encargado de procesar todo ese excedente de gas natural, evitando además, su emisión directa a la atmósfera, ya que el venteo es sustituido por una combustión. Por lo tanto, este dispositivo, además haber tenido una función de seguridad, cumplió también con una función medioambiental.

El sello hidráulico fue uno de los componentes principales y opcionales para una antorcha elevada. A este dispositivo se dirigió el flujo de gases de alivio, en el cual se hicieron pasar los gases de antorcha a través de una lámina de líquido (normalmente agua) en su camino hacia el quemador.

El estudio encontró que las funciones del sello hidráulico fueron:

- Operar como un mecanismo de retención para evitar la comunicación del colector de antorcha y la atmósfera durante el modo stand-by.
- Operar como una válvula de seguridad de presión, evitando el flujo de gas desde la entrada a antorcha a la descarga en sello hidráulico, hasta alcanzar cierta presión aguas arriba, frecuentemente predeterminada, evitando así flujos pulsatorios. (Gómez, 2010)

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Determinar la incidencia de la posición del sello hidráulico en un reactor anaerobio biológico EGSB en la eficiencia de la reducción de la DQO.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer pautas de diseño para la correcta posición del sello hidráulico en un reactor EGSB que permita evidenciar la interfaz líquido- gas
- Comparar los valores de DQO entre la muestra tomada antes y después de implementar el sello hidráulico en el prototipo del reactor EGSB, corroborando la eficiencia del sistema
- Acondicionar hidráulicamente el prototipo de reactor EGSB para su correcto funcionamiento durante las etapas de arranque y posterior uso.

4. Marco teórico

Los fundamentos de los reactores “U.A.S.B.” (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) fueron concebidos durante los años 1970, por el profesor Gatzke Lettinga de la Universidad de Wageningen en Holanda. La tecnología UASB fue desarrollada comercialmente durante los años 1980 en Europa para el tratamiento de efluentes industriales, cuyas temperaturas normalmente son tibias, propias de las fermentaciones anaerobias, y en concentraciones de DBO superiores a 1.000 ppm. A mayor concentración en DBO, mayor competitividad económica, versus las tecnologías tradicionales de lodos activados.

Por el factor limitante de temperatura y el de concentración en DBO, se había recomendado siempre el uso de reactores UASB, en donde hubiera una baja relación entre SS y DQO, así como entre grasas y DQO. Por estas razones, la tecnología UASB no había sido imaginada inicialmente, para ser aplicada en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Sin embargo, en un Convenio en 1982 entre la Universidad de Wageningen y la Universidad del Valle, así como con las Empresas Públicas Municipales de Cali de la ciudad de Cali - Colombia, se quiso probar la factibilidad del sistema UASB para el tratamiento directo de las aguas domésticas, dado que se está en una región tropical, con temperatura estable todo el año y mayor a 20 °C. Así, se construyó un reactor piloto (“Cañaveralejo”) de 60 m³ que se monitoreó durante 4 años.

Este Convenio fue el nacimiento de una verdadera “revolución tecnológica tropical”, pues después de 10 años iniciales de búsquedas, aciertos y errores, el Sistema UASB se ha vuelto hoy en día un Sistema de Tratamiento confiable, con costos de tratamiento considerablemente inferiores a los sistemas clásicos, y está mucho más al alcance del presupuesto del ciudadano Latino Americano promedio. (Conil, 2008)

Años después se desprende de esta tecnología, el Reactor Expandido de Lecho fluidizado (EGSB) el cual presenta algunas modificaciones en su diseño como mayor altura y menor diámetro que el Reactor UASB, trayendo consigo algunos beneficios como menor área a disponer y un porcentaje de eficiencia más alto.

De esta tecnología anaerobia para tratamiento de agua residual (EGSB) hay diversos estudios, construcción, implementación sin embargo no se han encontrado estudios puntuales acerca de una parte indispensable en la eficiencia del sistema como lo es el sello hidráulico, su importancia en la disminución de DQO y producción de biogás.

4.1. Digestión anaerobia

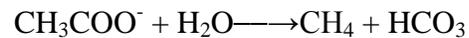
Según Romero (2001), la digestión anaerobia es un proceso biológico utilizado en tratamientos de aguas residuales en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por la combinación de la actividad de diferentes grupos de microorganismos que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa, se transforma en metano consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, frente al 50% consumido en un sistema aerobio. Lo más importante del sistema anaeróbico es la simbiosis que existe entre diferentes especies de microorganismos, es decir, unos microorganismos utilizan como sustratos los productos de la actividad de otros, por lo tanto las reacciones se unen formando reacciones continuas, las cuales comienzan con el sustrato y terminan con la producción de gas metano. En el proceso intervienen microorganismos facultativos y anaerobios estrictos. En general las bacterias son incapaces de alimentarse de material particulado por lo que las macromoléculas (proteínas, carbohidratos y lípidos) son hidrolizadas previamente por enzimas extracelulares a compuestos más simples (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos).

Estos compuestos, son utilizados como sustratos por los organismos fermentadores (azúcares y aminoácidos) y por oxidadores anaerobios (ácidos grasos superiores). Los productos de estas reacciones son acetato, hidrógeno, biomasa y productos intermediarios como propionato y butirato. Estos últimos son degradados a acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocidas OHPA (*Obligate Hydrogen Producing Acetogen*) las cuales viven en relación sintrófica con las bacterias metanogénicas utilizadoras de hidrógeno. Estos dos compuestos son finalmente, los sustratos de las bacterias metanogénicas, que se dividen en dos grupos tróficos:

Bacterias Metanogénicas Hidrogenofílicas: Utilizan el hidrógeno generado para reducir el CO₂



Bacterias Metanogénicas Acetoclástica: Transforman el acetato en CH₄. Esta transformación constituye el 70% de la producción de metano generado en los reactores.



4.1.1. Hidrólisis y fermentación.

La hidrólisis y fermentación son las etapas iniciales de la digestión anaerobia donde los biopolímeros son fragmentados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas más pequeñas, como se muestra en la figura 2.

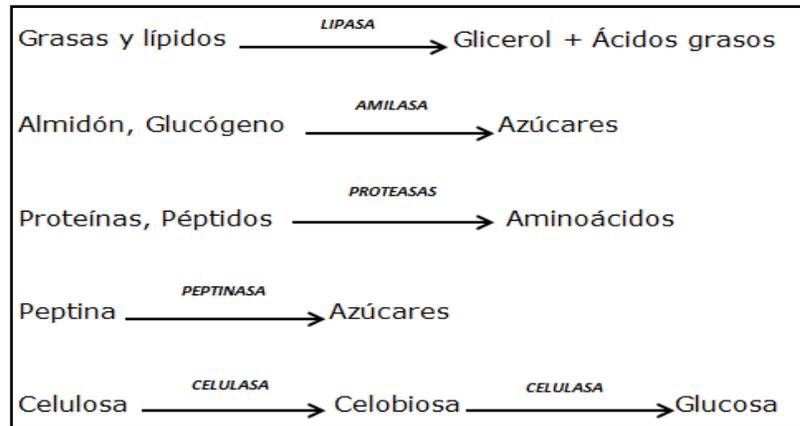


Figura 2. Hidrólisis y fermentación
Autor: (Morillo y Fajardo, 2005)

Las bacterias fermentativas metabolizan los aminoácidos, azúcares y ácidos grasos al interior de la célula. Los productos de la fermentación son ácidos grasos volátiles principalmente acético, propiónico y butírico, y adicionalmente algunos productos reducidos como etanol, acetona y butanodiol en menor cantidad. Esta primera fase es considerada muy lenta. (Morillo y Fajardo, 2005)

4.1.2. Acetogénesis.

En esta etapa de acetogénesis según Arango y Sánchez (2009) los productos solubles resultantes de la hidrólisis son convertidos en compuestos orgánicos simples con la ayuda de endoenzimas en el interior de las células bacterianas conocidas como “bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno OHPA. Los productos fermentados son excretados por las células, entre ellos ácido propiónico, butírico, iso-butírico, valérico, acético, alcoholes, ácido láctico, dióxido de carbono e hidrógeno. Estos

organismos utilizan los ácidos grasos o alcoholes como fuente energética.

4.1.3. Homoacetogénesis.

De acuerdo con Díaz et al. (2002), dentro del grupo de acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como bacterias homo-acetogénicas las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el CO₂ como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaeróbica. Los electrones para la reducción del CO₂ provienen del H₂ y de una variedad de compuestos como azúcares, ácidos orgánicos, alcoholes, aminoácidos y ciertas bases nitrogenadas. Aunque este grupo no es un grupo taxonómico definido, en él se incluyen una amplia variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas tales como *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii*.

Las especies *Clostridium* y *Acetobacterium woodii* pueden utilizar compuestos orgánicos o inorgánicos mediante la fermentación homoacética de azúcares o la reducción del CO₂ de la siguiente forma:



Las bacterias homo-acetogénicas fermentan la glucosa mediante la vía glucolítica produciendo dos moléculas de piruvato y dos moléculas de NADH. Además del acetato producido a partir de las dos moléculas de piruvato, una tercera molécula de acetato se genera por la reducción del CO₂ producido en la reacción, utilizando los 4 electrones generados en la glucólisis más los 4 electrones producidos en la oxidación del piruvato. Por tanto, la producción total a partir del piruvato son tres moléculas de acetato.

4.1.4. Metanogénesis.

La producción de metano es la principal forma por medio de la cual las bacterias metanogénicas obtienen la energía necesaria para el crecimiento. Desde un punto de vista metabólico, la formación de metano es un tipo de respiración anaerobia en el cual, el dióxido de carbono actúa como aceptor de electrones y el hidrógeno es utilizado para reducirlo (Díaz et al., 2002).

4.2. Reactor UASB

El reactor UASB (*Upflow anaerobic sludge bed*), es una de las técnicas de digestión anaerobia más sofisticada para tratar aguas residuales. Al igual que todas las unidades de tratamiento, este reactor tiene criterio de diseño y patrones de construcción. Cada uno de estos parámetros son fundamentales para que se lleve a cabo un eficiente proceso de degradación anaerobia, ya que estos sistemas requieren las condiciones necesarias para su funcionamiento.

4.2.1. Forma y tamaño.

Según Van Haandel and Lettinga (1994), para definir el tamaño y la forma del reactor es necesario determinar la carga orgánica y la carga hidráulica que manejará el sistema. Por lo tanto es recomendable diseñar el reactor a partir de estos dos criterios, para asegurar un buen rendimiento del mismo. Las configuraciones básicas para los reactores UASB varían en su forma geométrica, pero mantienen el principio de campanas separadoras acompañada de deflectores, las cuales pueden ser sumergibles o estar en la superficie de la lámina de agua. En la figura 3 se muestra un reactor anaerobio de doble campana sumergida y campana sencilla.

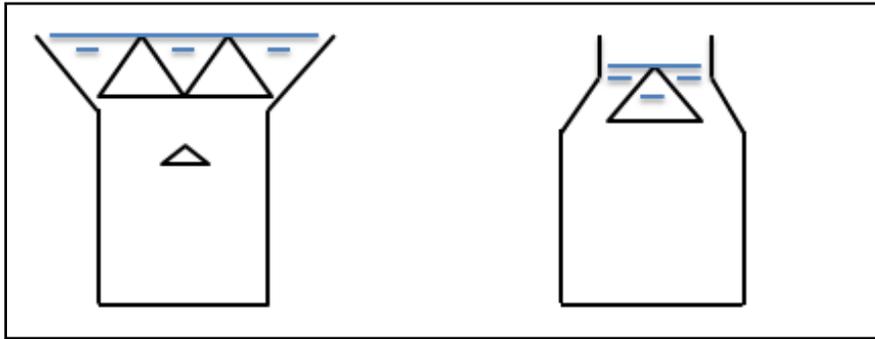


Figura 3. Campanas separadoras.
 Autor: (Van Haandel and Lettinga, 1994)

Otro parámetro determinante para la forma y tamaño del reactor, es el tiempo de retención. Es recomendable para regiones tropicales y subtropicales manejar tiempos de retención aproximadamente de 6 horas. Este tiempo es indirectamente proporcional a la temperatura, es decir para temperaturas más bajas se necesitan tiempos de retención más largos, por ejemplo para una región con una Temperatura promedio entre 10-12°C es necesario manejar un rango de TRH entre 12 y 14 horas.

La altura también depende de los tiempos de retención, por lo general cuando los tiempos exceden de 6 horas los sistemas tienen una altura de 4 a 6 metros.

Existen dos formas geométricas básicas para los reactores UASB, rectangular y circular. Los circulares ofrecen la ventaja de una estabilidad estructural más alta, pero la construcción del separador de fases se hace más complicada en este tipo de reactores. (Van Haandel and Lettinga, 1994). También existen diseños combinados, como se muestra en la figura 4.

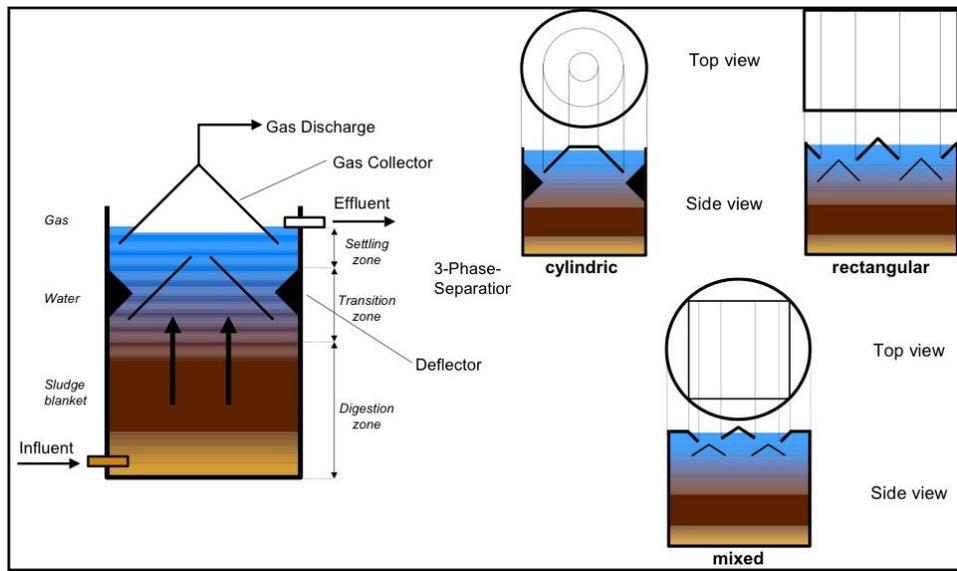


Figura 4. Diseños combinados para reactores UASB
 Autor: (Van Haandel and Lettinga, 1994)

4.2.2. Separador de fases.

El separador de fases es la característica más importante en los reactores EGSB. Estos mecanismos son los encargados de separar las tres fases que se generan en el reactor, sólido (S), líquido (L) y gas (G). Además estos separadores cumplen con las siguientes funciones:

- Colectar el biogás que se genera desde la fase líquida y el manto de lodos.
- Mantener bajas concentraciones de SST en el efluente.
- Permite la sedimentación de los sólidos en suspensión en la parte superior
- Mantener el manto de lodos dentro del reactor.

Para el correcto desempeño de los separadores trifásicos, el biogás generado en la zona de digestión no debe continuar a la zona de sedimentación, ya que esto causaría turbulencia dentro del reactor, perjudicando las condiciones del lodo y la eficiencia del sistema. (Van Haandel and Lettinga, 1994)

4.3. Reactor EGSB

El reactor EGSB del inglés (*Expanded Granular sludge bed*), es un reactor de configuración semejante al UASB, con la diferencia que es más alto, es decir que tiene una mayor relación altura/diámetro. Debido a la velocidad ascendente, la cama de lodos se expande y se logra un mejor contacto entre el lodo y el agua residual, usando eficientemente la totalidad del volumen del reactor, es decir se eliminan las zonas muertas. Los contaminantes disueltos se eliminan de forma eficiente pero no sucede lo mismo para los sólidos suspendidos, que no se remueven sustancialmente por la alta velocidad ascendente que se aplica.

El tratamiento de aguas residuales industriales a través de un EGSB tiene como objetivo la remoción de contaminantes orgánicos y en menor forma otros contaminantes.

Como primer paso el residuo líquido “afluente” que se quiere tratar se introduce por la parte inferior del reactor haciendo que fluya en sentido ascendente a través de un manto de lodo biológico o partículas de microorganismos en estado coloidal, logrando que los microorganismos se floculen o granulen de manera que permanezcan en el reactor degradando la materia orgánica, mediante el cual el agua residual es atravesada con una frecuencia y duración tales, que son suficientes para mantener un contacto entre el agua y el lecho del lodo para la remoción de la materia orgánica transformándola, mediante metabolización, a una gran parte de éstas en biogás como se muestra en la figura 5.

El flujo combinado del agua residual y el biogás puede expandir algunos de los sólidos del lodo a la parte superior del reactor. Un separador de tres fases está situado en la parte superior del reactor para separar el biogás, agua y lodo. El biogás se adhiere a las partículas biológicas, ascendiéndolas hacia la parte superior del reactor, hasta chocar con los deflectores desgasificadores, donde se produce la liberación del gas adherido a estas partículas. Las partículas desgasificadas suelen volver a caer hasta la superficie del manto de lodos. El gas libre es capturado en las campanas y conducido a un separador de

gases y luego a una tea para ser quemado, preferiblemente sobre todo si los volúmenes de gas son considerables. La fracción líquida “efluente” que contiene en algunos casos sólidos residuales, y alguno de los gránulos biológicos cae dentro de un canal situado en la parte superior del reactor, donde es descargada y conducida a una cámara de sedimentación con el fin de separar los sólidos residuales, que fueron arrastrados por el efluente. (Calderón y López, 2004)

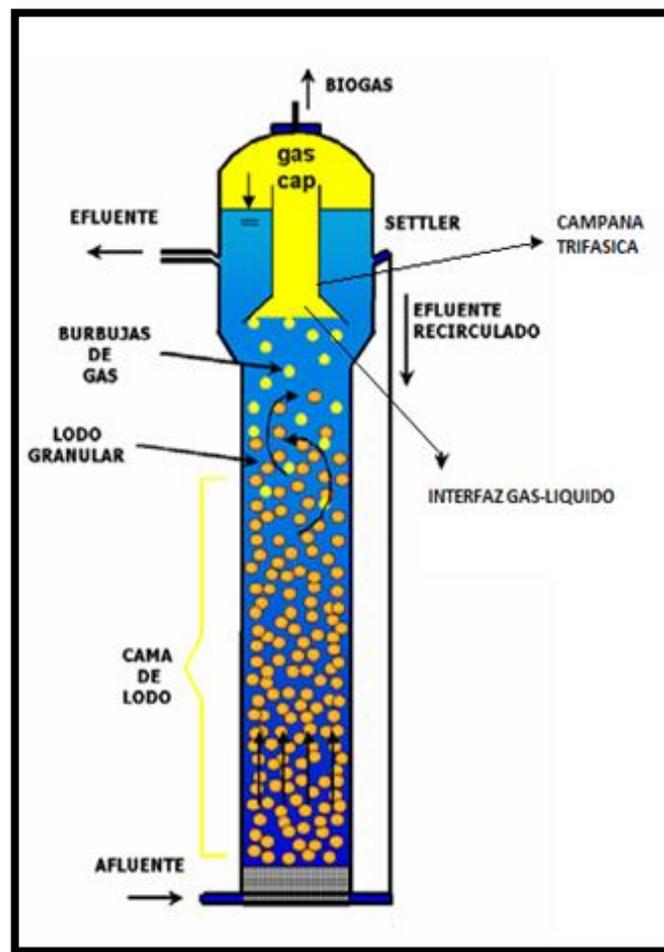


Figura 5. Modelo EGSB
Fuente: (Medhat and Usama, 2002)

Los reactores de lecho fluidizado son reactores trifásicos gas-líquido-sólido formados por un lecho de partículas de pequeño tamaño sobre las que se mantiene adherida la biomasa y a través del cual circula un fluido que provoca la fluidización del lecho. Para lograr la fluidización suele ser necesario recircular parte del efluente. La biomasa activa forma agregados fácilmente sedimentables que se obtienen por adhesión de microorganismos sobre pequeñas partículas inertes. Las biopartículas se trabajan con cargas volumétricas más altas de entre todos los tipos de digestores empleados en el tratamiento anaerobio de aguas residuales.

Los reactores de lecho fluidizado alcanzan las más altas cargas orgánicas volumétricas. Sus excelentes capacidades de transferencia de materia los hacen adecuados para tratar efluentes muy diluidos o muy concentrados. (Mesa, 2013)

Ventajas.

- Menor producción de lodos
- Menores costos de operación
- Producción de biogás
- El 90% de la energía es retenida como CH₄, del 5 – 7% es almacenada en la biomasa
- No requiere energía
- Acepta altas cargas orgánicas
- Degrada compuestos policlorados
- Requerimiento bajo de nutrientes
- Requiere pequeña área superficial
- El lodo anaerobio puede ser preservado (inactivo) por muchos meses sin serios deterioros
- Una efectiva separación del biogás, desagüe y el lodo
- El lodo anaerobio presenta una buena capacidad de sedimentación y principalmente, se desarrolla como un lodo granular

Desventajas.

- Requiere largos periodos de arranque, si no se cuenta con lodo adaptado
- Por ser recientemente establecidos, tienen bajo desarrollo para aplicaciones específicas y existe poca experiencia práctica, sin embargo la situación respecto a esto está cambiando rápidamente
- La digestión anaerobia normalmente requiere de un adecuado post-tratamiento para la remoción de DBO₅ remanente, amonio y compuestos de mal olor

4.4. Etapa de arranque.

El arranque de un reactor anaerobio es el periodo de tiempo durante el cual la biomasa anaerobia se adapta en cantidad y calidad a las características del agua residual. La duración de la etapa de arranque dependerá del tiempo que se requiera para obtener una calidad constante del efluente y una masa de lodo suficiente, que no varíe cualitativamente con el tiempo. Generalmente se identifica el final del arranque en lo que respecta a biomasa, con la aparición del fenómeno de granulación y/o formación de un floc o biopelícula estable.

Existen diversas metodologías para el arranque de reactores anaerobios, las cuales se basan fundamentalmente en el seguimiento de parámetros de operación y dependiendo de la salud del sistema, en el aumento paulatino de la carga. Se han podido definir tres fases en el arranque.

Adaptación primaria y crecimiento de bacterias degradadoras de los ácidos acético y propiónico

- Formación de una biomasa anaerobia metanogénica activa
- Formación de un lodo granular, si las condiciones del sustrato lo permiten.

El arranque se inicia con la aplicación de cargas orgánicas bajas, las cuales se incrementan cuando la salud del sistema lo permite, en lo que se refiere principalmente a contenidos de ácidos grasos volátiles (AGVs) y remoción de materia orgánica. Durante

el arranque, existe peligro de sobrecarga orgánica y si esta ocurre, la fermentación ácida puede volverse predominante sobre la fermentación metanogénica, resultando en la acidificación del sistema.

De otro lado, el arranque de reactores tratando aguas residuales domésticas es mucho más sencillo que el de reactores tratando aguas residuales industriales, ya que las características de las primeras proporcionan una capacidad buffer suficiente, que evitan la acidificación cuando existe acumulación de los productos de la fermentación ácida, debido principalmente a que en esta fase la población metanogénica es aún muy pequeña para convertirlos eficientemente. (Campos y Anderson, 1991)

4.4.1. Factores Ambientales.

De acuerdo con Zegers (1987), el desarrollo normal de todo proceso biológico, estriba en el suministro de condiciones ambientales adecuadas, que favorezcan el crecimiento y actividad de los organismos participantes. Si se provee un medio ambiental adecuadamente controlado se puede asegurar una estabilización efectiva del residuo, mediante el control de la tasa de crecimiento de los microorganismos. La actividad metabólica depende de muchos factores ambientales, es decir de la condiciones de vida. Según la especie y tipo de organismo, los factores ambientales aceleran, retardan o inhiben su crecimiento.

4.4.1.1. Temperatura.

Como otros procesos biológicos la digestión anaerobia depende fuertemente de la temperatura. De manera general, se puede decir que la tasa óptima de crecimiento de las bacterias, ocurre dentro de rangos de temperatura y pH relativamente limitados, a pesar de que su sobrevivencia puede ocurrir dentro de rangos más amplios. Temperaturas entre los 30 a 40°C presentan tasas máximas de digestión anaerobia, sin embargo esta es

posible a temperaturas bajas (10°C), pero la eficiencia y tasa de digestión disminuyen significativamente con la disminución de la temperatura. De esta forma, el proceso es más atractivo para su aplicación en regiones de clima tropical y subtropical, donde normalmente la temperatura del agua residual no está por debajo de los 18°C.

4.4.1.2. pH.

El valor y estabilidad del pH en el reactor anaerobio es muy importante, porque la actividad metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH comparado con las demás poblaciones presentes: si el pH está por debajo de 6,3 o por encima de 7,8 la metanogénesis disminuye significativamente. A bajos valores de pH la fermentación ácida prevalece sobre la fermentación metanogénica, resultando en la acidificación del contenido del reactor. Los AGV son tóxicos para la metanogénesis, solamente en la forma no ionizada. A pH neutro, los AGV están mayoritariamente (>99%) en la forma ionizada, cuando el pH disminuye, estos están menos disociados, es decir son tóxicos. (Zegers, 1987)

4.4.1.3. Tipo de Sustrato.

El tipo de sustrato determina la comunidad trófica que se desarrolla en el reactor. En ecosistemas complejos como el de un digestor anaerobio, el tamaño de cada grupo de organismos deberá ser proporcional al flujo de su correspondiente sustrato en el sistema, y la prevalencia de una u otra ruta metabólica está determinada por el acoplamiento entre la velocidad de producción y la capacidad de asimilación del mismo.

Cuando la DQO del agua residual, está compuesta por sustratos fácilmente biodegradables, la etapa limitante en la digestión anaerobia es la metanogénesis, porque las bacterias hidrolíticas y fermentativas tienen la capacidad de acidificar el sustrato a una velocidad ocho veces más rápida comparada con la velocidad con que las bacterias metanogénicas consumen los AGVs producto de la acidificación, como resultado la capacidad de utilización de la DQO total por parte de la población metanogénica presente en el reactor, determina la máxima carga de DQO que podrá aplicarse. Si la

velocidad de carga excede la capacidad metanogénica se producirá acumulación de AGVs en el reactor y el pH disminuirá (Zegers, 1987). Por otra parte es importante reconocer la composición promedio del agua residual con respecto a contenido de nutrientes y elementos traza (Fe, Co y Ni) así como presencia de tóxicos.

4.4.1.4. Nutrientes.

Explica Zegers (1987) que los nutrientes necesarios para el crecimiento de las bacterias al interior del reactor, dependen de la concentración de DQO del agua residual.

Aunque los requerimientos nutricionales de las bacterias durante el proceso de digestión anaerobia son bajos, y una buena parte de las aguas residuales que se generan no presentan deficiencia de nutrientes, algunos tipos de efluentes industriales como los producidos en la fabricación de papel, almidón y alcohol pueden tener deficiencia de ellos.

En (2005), Orozco sugiere que los nutrientes como el nitrógeno, y en menor proporción fósforo, azufre, potasio, calcio, hierro y magnesio, y como suplemento nutricional cantidades mínimas de zinc y molibdeno, son requeridos; sin embargo, es necesario controlar la concentración de amonio en el afluente del reactor, ya que un exceso de este puede causar toxicidad e inhibición de la población metanogénica. A fin de continuar sus funciones vitales adecuadamente, un organismo debe tener una fuente de energía y de carbono para la síntesis de nueva materia celular. Los elementos inorgánicos, tales como el nitrógeno y el fósforo, y otros elementos que se encuentran a nivel de vestigios como el azufre, potasio, calcio y magnesio son también vitales para la síntesis celular.

Nitrógeno: El N es el componente principal de las proteínas además conjuntamente con el fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas y protistos, específicamente de algas y bacterias necesarias para el TAR. Cantidades insuficientes de N afectan el tratamiento de las aguas residuales

Fósforo: El P, es otro nutriente esencial para el crecimiento de algas y bacterias. Es determinante en el proceso de eutroficación, pues algunas algas pueden suplir la ausencia de N en el agua fijándolo de la atmosfera.

Los requerimientos recomendados para hierro, cobalto, níquel y zinc son 0.02, 0.004, 0.003, y 0.02 mg/g de acetato producido, respectivamente. Ejemplos del incremento de la actividad anaerobia se observaron después de añadir trazas de hierro, níquel o cobalto. La cantidad exacta de nutrientes necesarios puede variar para diferentes aguas residuales y por lo que las pruebas de ensayo se utilizan para evaluar sus beneficios en los procesos anaerobios con altas concentraciones. Una dosis recomendada de metales traza por litro de volumen de reactor es 0.1 mg de FeCl_2 , 0.1mg de CoCl_2 , 0.1 mg de NiCl_2 y 0.1 de ZnCl_2 . (Metcalf & Eddy , 1998)

En la tabla 1 se presentan los requerimientos nutricionales de las bacterias metanogénicas.

Tabla 1. *Requerimientos nutricionales de las bacterias metanogénicas*

MACRONUTRIENTES		MICRONUTRIENTES	
Elemento	Concentración (mg/Kg células secas)	Elemento	Concentración (mg/Kg células secas)
N	650000	Fe	1800
P	10000	Ni	100
K	10000	Co	75
S	10000	Mo	60
Ca	4000	Zn	60
Mg	3000	Mn	20
		Cu	10

Fuente:(Morillo y Fajardo, 2005)

El exceso o limitación de nutrientes influye en la producción extracelular de sustancias poliméricas las cuales se creen ser las responsables de la atadura o agregación de la biomasa.

El requerimiento de nutrientes, en cualquier sistema de tratamiento biológico, se determina con base en el contenido de materia orgánica que va a ser degradada. En sistemas de tratamiento anaerobio se recomienda una relación DQO: N: P de 350:5:1 para aguas residuales acidificadas, esto con el fin de garantizar los requerimientos nutricionales de los microorganismos anaerobios. (Torres et al, 2005).

En la tabla 2 se plantean las relaciones adecuadas de C: N: P para aumentar la eficiencia de los sistemas.

Tabla 2. *Relación C: N: P*

DQO: N: P	100:7.2:1
DQO: N: P	100:0.7:1
DQO: N: P	350:5:1
DBO: N: P	100:5:1

Fuente:(Morillo y Fajardo, 2005)

Según (Orozco, 2005) el medio ambiente de las bacterias es muy importante para su supervivencia. El pH debe estar preferiblemente entre 6.5 y 7.5 la temperatura puede fluctuar entre -2 °C y 75°C de acuerdo con la subdivisión mostrada en la tabla 3. Las bacterias consumen el sustrato orgánico (DQO) y lo utilizan para la síntesis de material celular (medido como SSV) con un determinado gasto energético (medido con la respiración).

Tabla 3. Rangos típicos de temperatura para las bacterias

Tipo de bacterias	Rango de temperatura	
	General	Óptima
Clorofílicas	2-20	12-18
Mesofílicas	20-45	25-40
Termofílicas	45-75	55-65

Fuente:(Orozco, 2005)

4.5. Etapa de operación.

La operación del sistema se inicia una vez superada la etapa de arranque, cuando se alcanzan las condiciones de diseño de carga orgánica e hidráulica y la eficiencia de remoción de materia orgánica proyectada. En esta etapa se espera que el reactor funcione en condiciones de estado estable, en el cual las variables de salida del sistema se mantienen relativamente constantes a pesar de las variaciones temporales en cantidad y calidad del afluente.

De acuerdo con la experiencia reportada en la operación de diversos reactores anaerobios, se tiene entre otras las siguientes conclusiones:

- El origen y naturaleza del agua residual afecta el funcionamiento del reactor.
- Existe una tendencia general a disminuir la eficiencia de remoción cuando disminuye significativamente el tiempo de permanencia del agua residual dentro del reactor, especialmente cuando se alcanzan tiempos menores de 4 horas.
- Los reactores anaerobios presentan mayores eficiencias cuando tratan aguas residuales concentradas, sin embargo se han demostrado sus eficacias en el tratamiento de aguas residuales diluidas. (Rodríguez, 2006)

4.6. Actividad metanogénica específica

Todos los sistemas de digestión anaerobia requieren condiciones de funcionamiento, y de éstas depende la estabilidad de la degradación de materia orgánica, es decir de su eficiencia. Actualmente estos tratamientos además de dar un manejo ambientalmente sostenible a vertimientos residuales o industriales, son tecnologías de bajo costo económico y energético. La operación de estos reactores depende de un buen control de las condiciones ambientales del proceso fermentativo, así como el diseño del equipamiento. La biomasa anaerobia, responsable de la degradación de la materia orgánica de las aguas residuales, debe ser constantemente evaluada en su capacidad de depuración (Poetsch y Koetz, 1998). Para que ésta biomasa pueda ser preservada y monitoreada se han desarrollado técnicas para la evaluación del desempeño de la actividad microbiana de los reactores anaerobios. Dentro de las técnicas generadas se encuentra la caracterización de Actividad metanogénica específica (AME).

La actividad metanogénica específica (AME) es un parámetro que se utiliza para determinar la capacidad que tienen las bacterias metanogénicas para producir biogás, permitiendo clasificar el potencial de la biomasa para convertir el sustrato en metano y gas carbónico bajo diferentes condiciones ambientales (Penna, 1994).

Además de un indicador del adecuado arranque de un reactor anaerobio, la AME puede ser usada como análisis de rutina para cuantificar la actividad de la población metanogénica, además de ofrecer otras aplicaciones como son: evaluar el comportamiento de la biomasa bajo el efecto de compuestos potencialmente inhibidores, determinar la toxicidad relativa de compuestos químicos presentes en efluentes, establecer el grado de degradabilidad de diversos sustratos, monitorizar los cambios de actividad del lodo debido a una posible acumulación de materiales inertes, determinar la carga orgánica máxima que puede ser aplicada para un determinado tipo de lodo y evaluar parámetros cinéticos. La AME puede definirse como la máxima capacidad de producción de metano por un grupo de microorganismos anaerobios, realizada en

condiciones controladas de laboratorio que permita la máxima actividad bioquímica de conversión del sustrato orgánico a metano (Chernicharo, 2007). Las unidades en las que se expresa son mg DQO/g SSV · día, o ml CH₄/g SSV · día.

4.7. Sello hidráulico

Los separadores o campanas trifásicas pueden estar al límite de la superficie de agua o sumergidos dentro del reactor. De igual manera para cada tipo de separador existe un mecanismo de extracción básico. Si el separador está sumergido es necesario el uso de un sello hidráulico interno o externo. Este sello hidráulico permite generar suficiente presión sobre el separador para mantener la interfase y extraer el biogás, como se puede ver en la figura 6.

Las ventajas de usar un sello hidráulico dentro de un reactor son:

- Cuando se usa acero para construcciones, reduce la ocurrencia de problemas de corrosión, los cuales afectarían la formación de la interfase.
 - Mayor zona disponible para la sedimentación de los sólidos, por tanto se optimiza la retención del lodo.
 - El biogás generado se transporta más fácil hacia los puntos de cuantificación.
 - Forma un dispositivo de seguridad que evita explosiones de gas en un digestor.
- (Van Haandel and Lettinga, 1994)

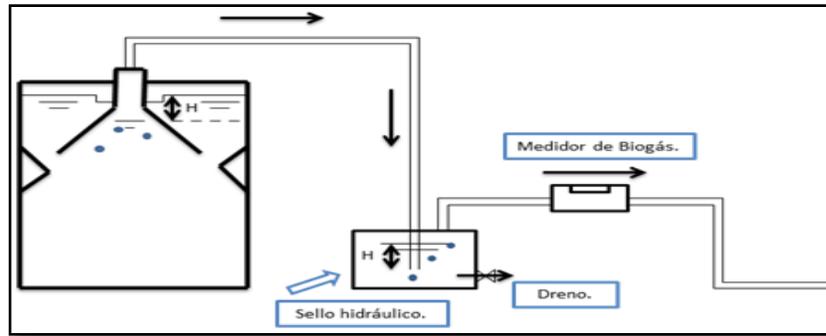


Figura 6. Sello hidráulico de un reactor anaerobio
Fuente: (Autores, 2014)

4.8. Paradoja de Pascal

En el desarrollo de la relación $\Delta p = \gamma h$, el tamaño del volumen pequeño de fluido no afecta el resultado. Además esta relación permitió hallar las presiones para los diferentes gradientes de altura de la estructura de sello hidráulico, determinando la altura más adecuada desde el nivel del suelo para ubicar el mismo, tomando como referencia los diferenciales de presión (Δp) entre la campana y la base de la estructura del SH. El cambio en la presión solo depende del cambio en la elevación y el tipo de fluido, no del tamaño del contenedor del fluido, además, la presión aplicada en un punto de un fluido contenido en un recipiente se transmite con el mismo valor a cada una de las paredes del mismo. Por tanto, todos los contenedores mostrados en la figura 7 tendrían la misma presión en su fondo, aun si contuvieran cantidades muy diferentes de fluido. A este fenómeno se le conoce como paradoja de Pascal, en honor de Blas Pascal, científico del siglo XVII, quien contribuyó al conocimiento del tratado de los fluidos. (Mott, 2006)

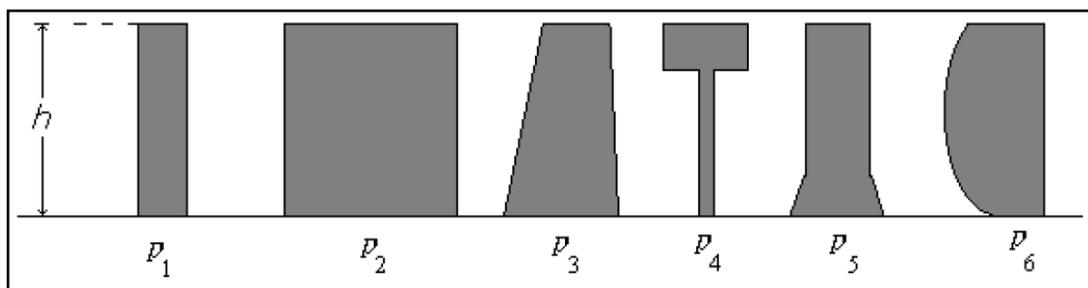


Figura 7. Paradoja de Pascal
Fuente: (Mott, 2006)

5. Metodología

A continuación se describen las fases en las que fue desarrollado el proyecto de grado, identificando las variables empleadas en la investigación.

Puesto que el proyecto tiene una relación causa-efecto, entendiendo la causa como la no existencia de un sello hidráulico en los reactores EGSB y el efecto la incidencia que tiene del mismo en la eficiencia del reactor, para el presente caso es posible determinar dos tipos de variables; las dependientes, que representan un efecto o consecuencia y las independientes que representan una causa eventual. La variable independiente, se define como la de DQO del afluente ya que proviene del vertimiento de la industria de textiles y el valor de esta concentración de DQO es ajena al proyecto, pero la variable dependiente, es decir la DQO del efluente si tiene relación directa con el resultado de la experimentación ya que esta concentración depende de que tan beneficioso sea la ubicación del sello hidráulico en el reactor EGSB. Ver figura 8.

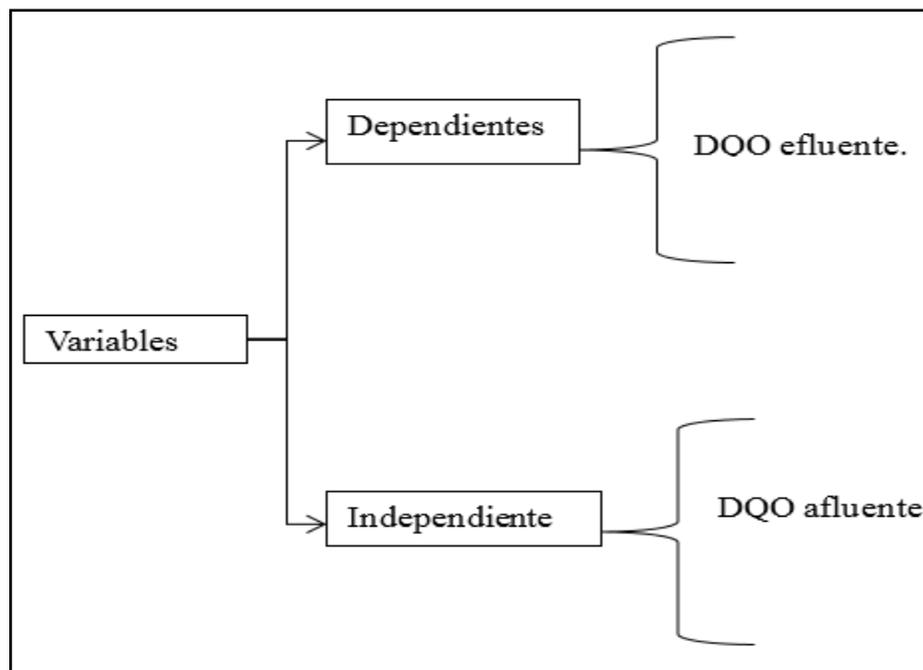


Figura 8. Tipos de variables

Fuente: (Autores, 2014)

En la figura 9 se hace un breve resumen de la metodología la cual es explicada detalladamente más adelante.

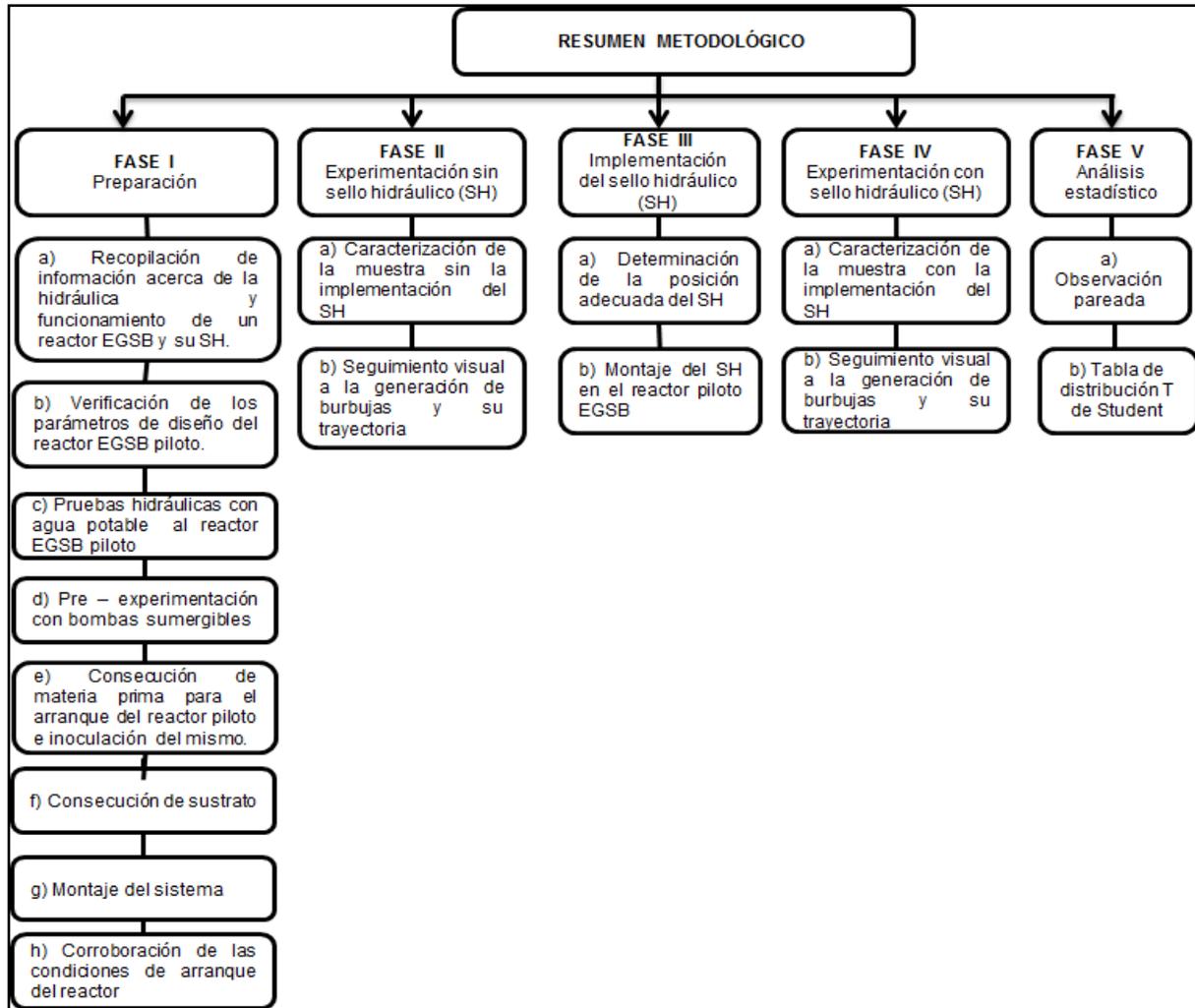


Figura 9. Resumen metodológico

Fuente: (Autores, 2014)

5.1. Fase I: Preparación

5.1.1. Recopilación de información acerca de la hidráulica y funcionamiento de un reactor EGSB y su sello hidráulico.

Se recopiló información acerca de reactores anaerobios UASB y EGSB específicamente aquellos con campana sumergida, y sobre todas las condiciones ambientales para una óptima operación y arranque de un reactor de este tipo. También se recopiló información sobre el sello hidráulico y su importancia en un reactor anaerobio con campana sumergida. Ver Marco teórico numerales (4.2-4.3-4.4 y 4.5).

5.1.2. Verificación de los parámetros de diseño del reactor EGSB piloto.

Se verificaron los parámetros de diseño del reactor EGSB, como: el caudal de entrada, la carga volumétrica, la carga hidráulica, tiempo de retención, posición de las campanas trifásicas y velocidad ascensional, de donde se calcularon: el diámetro, la altura y el volumen del mismo. Ver anexo 1.

5.1.3. Pruebas hidráulicas con agua potable al reactor EGSB piloto.

Se realizaron las pruebas hidráulicas con agua potable al Reactor piloto de lecho granular expandido (EGSB), donde se corroboró su correcto funcionamiento hidráulico, ausencia de fugas, pérdidas de carga, operación de las bombas de alimentación y de recirculación (Ver figura 10). Esto se hizo suministrando agua lluvia y potable al reactor a través de una bomba sumergible llenándolo en su totalidad con el fin de determinar el estado físico del reactor y la existencia de fugas dentro del mismo, ya que esta unidad fue construida en acrílico unos años atrás para otro trabajo de grado.



Figura 10. Pruebas hidráulicas
Fuente: (Autores, 2014)

En la figura 11 se pueden apreciar los accesorios hidráulicos que se instalaron para un correcto funcionamiento hidráulico del sistema tales como: flanches, válvula tipo “Y”, válvula cheque, racores de diferentes diámetros, manguera plástica de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ de diámetro, tubería en PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, pegamento, agarraderas metálicas, amarraderas plástica, entre otros. Todos estos materiales y accesorios fueron necesarios para realizar las conexiones entre los tanques de acondicionamiento, pre acidificación y el reactor.



Figura 11. Accesorios hidráulicos
Fuente: (Autores, 2014)

5.1.4. Pre experimentación con bombas sumergibles.

Durante la experimentación se presentaron una serie de inconvenientes con la bomba que conduce el agua del tanque de acondicionamiento al reactor, ya que al estar los tanque al nivel del suelo la bomba no cumplió con la cabeza hidráulica (3 m), por lo tanto fue necesario hacer unas modificaciones al montaje, subiendo el tanque de acondicionamiento a una altura de 2.50 m para disminuir la presión atmosférica, aumentar la energía potencial y hacer uso de la gravedad para cumplir con la cabeza de la bomba, es decir llevar el agua hasta el vertedero. Ver Figura 12

Cabe aclarar que con el agua potable la bomba sumergible si cumplió la cabeza de altura, pero con el agua residual llego hasta la mitad del reactor, deteniéndose en este punto, debido a los sólidos suspendidos contenidos en ella, los cuales afectaron el flujo ascendente dentro del reactor, puesto que estos generaron obstrucción en la válvula cheque y mayor densidad en el fluido a elevar. Lo mismo ocurrió cuando el lodo fue inoculado, el cual ocupó una tercera parte del reactor, y la potencia de la bomba tuvo que ser suficiente para fluir constantemente por el manto de lodos y el reactor.

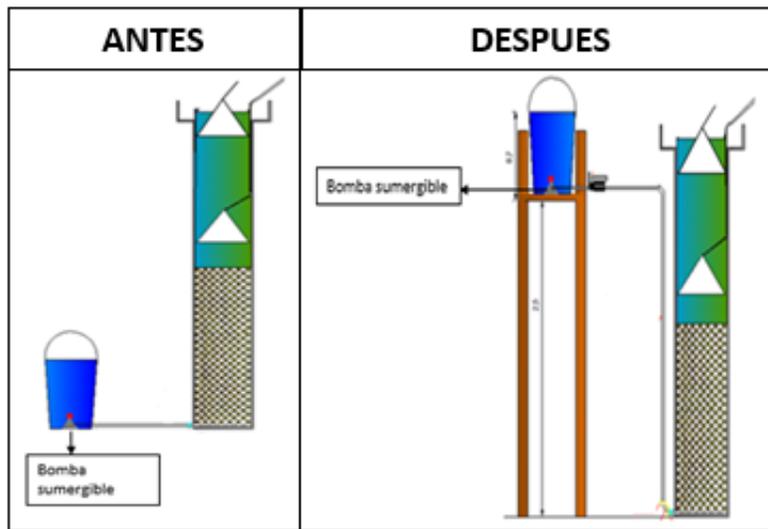


Figura 12. Ubicación de la bomba sumergible y su desempeño en dos posiciones de cabeza hidráulica diferentes.

Fuente: (Autores, 2014)

Características de la bomba

En la tabla 4 se presentan las características de la bomba sumergible usada para llevar el agua residual del tanque de acondicionamiento al reactor.

Tabla 4. *Características de la bomba*

Bomba tipo	Sumergible AQUA 25W
Potencia	25 W
Voltaje	120 V – 60 Hz
Corriente	0.440 A
Flujo Máx.	900 L/hr
Altura Máx.	2.40 m

Fuente: (Autores, 2014)

Para conocer si el comportamiento del fluido era laminar o turbulento, fue necesario determinar el número de Reynolds, el cual relaciona características propias del fluido como la densidad y la velocidad que tiene el mismo dentro de la tubería.

En la tabla 5 se presentan los cálculos para determinar la velocidad del fluido

Tabla 5. *Determinación de la velocidad del fluido*

Variable	Valor	Comentarios
Q (caudal)	$4.44 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 144 L/h	Caudal de alimentación al reactor.
D (Diámetro)	0.015 m 1/2"	Diámetro de manguera plástica.
A (Área)	$1.76 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	Área de la tubería de plástico.
Reemplazando	$V = \frac{4.44 \times 10^{-5}}{1.76 \times 10^{-4}}$	$V=Q/A$
V (Velocidad)	0.25 m/s	Velocidad del fluido dentro de la manguera.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 6 se presentan los cálculos para determinar el Número de Reynolds del agua residual

Tabla 6. *Determinación del Número de Reynolds para el agua residual*

Variable	Valor	Comentarios
ρ (Densidad)	1015 Kg/m^3	Densidad del agua residual.
V (Velocidad)	0.25 m/s	Velocidad del fluido dentro de la manguera.
D (Diámetro)	0.015 m	Diámetro de la tubería de plástico.
η (Viscosidad dinámica)	$1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	Viscosidad dinámica del agua residual, el mismo valor que la viscosidad del agua a 20°C.
Reemplazando	$Re = \frac{(1015) * (0.25) * (0.015)}{1 \times 10^{-3}}$	$Re = \frac{\rho * v * D}{\eta}$
Re (Número de Reynolds)	3806	Numero de Reynolds para el fluido.

Fuente: (Autores, 2014)

Según el número de Reynolds hallado en la tabla No. 6 se puede decir que el fluido tiene un comportamiento turbulento ya que su valor fue de 3806 muy cercano a 4000. (Mott, 2006)

En la tabla 7 se presentan los cálculos para determinar la rugosidad relativa de la manguera plástica utilizada en algunos tramos del sistema, la cual se entiende como la relación entre el diámetro de la tubería y la rugosidad promedio del propio material.

Tabla 7. *Determinación de la rugosidad relativa*

Variable	Valor	Comentarios
D (Diámetro)	0.015 m	Diámetro de la tubería de plástico.
ε (Rugosidad)	3.0×10^{-7} m	Rugosidad del plástico.
Reemplazando	$Rr = \frac{0.015}{3.0 \times 10^{-7}}$	Rugosidad relativa = D/e
Rr (Rugosidad relativa)	50000	Rugosidad relativa del material.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 8 se presentan los cálculos con los que se determinó el factor de fricción.

Tabla 8. *Determinación del factor de fricción*

Variable	Valor	Comentarios
D (Diámetro)	0.015 m	Diámetro de la tubería de plástico.
ε (Rugosidad)	3.0×10^{-7} m	Rugosidad del plástico.
Re (Número de Reynolds)	4000	Numero de Reynolds para el fluido
Reemplazando	$f = \frac{0.25}{\left(\text{Log} \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{0.015}{3.0 \times 10^{-7}} \right)} + \frac{5.74}{4000^{0.9}} \right)\right)^2}$	$f = \frac{0.25}{\left(\text{Log} \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{NR^{0.9}} \right)\right)^2}$
f (Factor de fricción)	0.04	Factor de fricción para pérdidas menores.

Fuente: (Autores, 2014)

El factor de fricción es necesario para determinar las pérdidas de energía, generadas por longitud de tuberías y accesorios hidráulicos, por lo tanto, la sumatoria de cada una de las pérdidas, representa la pérdida total en el sistema. En la tabla 9 se presentan los cálculos con los cuales se pudieron determinar las pérdidas por la manguera plástica de 2.10 m de longitud y ½” de diámetro. (Ver anexo 3)

$$hL = \Sigma hL$$

Tabla 9. *Pérdidas por longitud, tubería de plástico de 2.10 cm y diámetro ½”*

Variable	Valor	Comentario
F (Factor de fricción.)	0.04	Factor de fricción para pérdidas menores.
L (Longitud)	2.10 m	Longitud de la manguera en el primer tramo.
V (Velocidad)	0.25 m/s	Velocidad del fluido dentro de la manguera
D (Diámetro)	0.015 m	Diámetro de la manguera plástica.
G (Gravedad)	9.8 m/s ²	Aceleración de la gravedad.
Reemplazando	$hL = 0.04 * \frac{2.1}{0.015} * \frac{(0.25)^2}{2(9.8)}$	$hL = fr * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$
hL	0.017m	Pérdida por fricción para este tramo de tubería.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 10 se presentan los cálculos para determinar las pérdidas por válvula de verificación.

Tabla 10. *Pérdida por válvula de verificación*

Variable	Valor	Comentario
F (Factor de fricción.)	0.04	Factor de fricción para pérdidas menores
Le/D (Longitud equivalente)	150	Longitud equivalente respecto al diámetro de la tubería. (Ver anexo 4)
V (Velocidad)	0.25 m/s	Diámetro de la tubería de plástico
G (Gravedad)	9.8 m/s ²	Aceleración de la gravedad
Reemplazando	$hL = (0.04) * 150 * \frac{(0.25)^2}{2(9.8)}$	$hL = fr * \frac{Le}{D} * \frac{v^2}{2g}$
hL	0.019 m	Pérdida por válvula.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 11 se presentan los cálculos realizados para determinar la pérdida por codo de 90°.

Tabla 11. *Pérdida por codo de 90 °*

Variable	Valor	Comentario
F (Factor de fricción.)	0.04	Factor de fricción para pérdidas menores
Le/D (Longitud equivalente)	50	Longitud equivalente respecto al diámetro de la tubería.
V (Velocidad)	0.25 m/s	Diámetro de la tubería de plástico
G (Gravedad)	9.8 m/s ²	Aceleración de la gravedad
Reemplazando	$hL = 2((0.04) * 50 * \frac{(0.25)^2}{2(9.8)})$	$hL = fr * \frac{Le}{D} * \frac{v^2}{2g}$
hL	0.012 m	Pérdida por codo de 90°.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 12 se presentan los cálculos para determinar las pérdidas por longitud, tubería de PVC de 50 cm y diámetro ½”

Tabla 12. *Pérdidas por longitud, tubería de PVC de 50 cm y diámetro ½”*

Variable	Valor	Comentario
F (Factor de fricción.)	0.04	Factor de fricción para pérdidas menores.
L (Longitud)	1.2 m	Longitud de la tubería en el primer tramo.
V (Velocidad)	0.25 m/s	Velocidad del fluido dentro de la manguera
D (Diámetro)	0.015 m	Diámetro de la tubería de plástico.
G (Gravedad)	9.8 m/s ²	Aceleración de la gravedad.
Reemplazando	$hL = 0.04 * \frac{1.2}{0.015} * \frac{(0.25)^2}{2(9.8)}$	$hL = fr * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$
hL	0.01m	Pérdida por fricción para este tramo de tubería

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 13 se presentan los cálculos para determinar las pérdidas por la expansión que existió entre la tubería y el reactor. Fue necesario determinar el K, el coeficiente que relación los diámetros donde surgió la expansión,

Tabla 13. *Pérdida por expansión gradual*

Variable	Valor	Comentario
V (Velocidad)	0.25 m/s	Velocidad del fluido dentro de la manguera
D1 (Diámetro 1)	0.015 m	Diámetro de la manguera plástica.
D2 (Diámetro 2)	0.52 m	Diámetro del reactor.
G (Gravedad)	9.8 m/s ²	Aceleración de la gravedad.
k	$K = (1 - (\frac{0.015}{0.52})^2)^2 = 0.0016$	$K = (1 - (\frac{D1}{D2})^2)^2$
Reemplazando	$hL = 0.0016 * \frac{(0.25)^2}{2(9.8)}$	$hL = K * \frac{v^2}{2g}$
hL	0.0000051 m	Pérdida por fricción por expansión gradual.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 14 se presentan los cálculos para determinar las pérdidas generadas por el vertedero ubicado en la parte superior del reactor.

Tabla 14. *Pérdida por vertedero*

Variable	Valor	Comentario
Q (Caudal)	4.44X10 ⁻⁵ m ³ /s	Caudal que llega al vertedero, el mismo de la entrada al reactor.
P (Perímetro)	0.37 m	Perímetro del vertedero.
Reemplazando	$\ln *h = \ln (4.28X10^{-3})$ $e^{\ln *h} = e^{\ln (4.28X10^{-3})}$	Se despejo h de la siguiente ecuación $Q = 1.84 * P * h^{1.51}$
hL	0.004 m	Pérdida de energía pro vertedero

Fuente: (Autores, 2014)

Después de hallar cada una de las pérdidas en el sistema, se realizó la sumatoria entre ellas para obtener las pérdidas totales. Ver tabla 15

Tabla 15. *Pérdida de energía total en el sistema*

Variable	Valor	Comentario
hL1	0.017m	Pérdida por fricción
hL2	0.019 m	Pérdida por válvula
hL3	0.012 m	Pérdida por codos
hL4	0.01 m	Pérdida por fricción
hL5	0.0000051m	Pérdida por expansión.
hL6	0.004m	Perdida por vertedero
Reemplazando	hL = (0.017+0.019+0.012+0.01+0.000005+0.04)	ΣhL
hL	0.09 m.	Pérdida total

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 16 se presentan los cálculos para determinar la potencia de la bomba sumergible, utilizada para impulsar el agua residual del tanque de acondicionamiento al reactor EGSB piloto.

Tabla 16. *Potencia de la bomba sumergible*

Variable	Valor	Comentario
Q	$4.44 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal de alimentación al reactor.
γ	$12766 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$	Peso específico del agua residual
Ha	1.79 m	Energía por bomba
R	0.7 m	(% rendimiento)
Reemplazando	$P = \frac{(4.44 \times 10^{-5}) * (12766) * (1.79)}{0.7}$	$P = \frac{Q * \gamma * Ha}{R}$
P	1.44 Watts.	Potencia requerida por la bomba

Fuente: (Autores, 2014)

Para este cálculo se tuvo en cuenta las pérdidas de energía dentro del sistema, la altura estática (0.5m) y se asumió un valor de 1.20 m para la pérdida de energía por fricción con el lodo anaerobio, ya que esta fue la longitud de altura del lecho expandido.

5.1.5. Consecución de materia prima e inoculación del reactor piloto EGSB.

La dinámica de un proceso anaerobio es muy rigurosa, por lo cual se deben proporcionar todas las condiciones químicas, físicas y ambientales al reactor para que éste obtenga resultados eficientes. La inoculación del lodo anaerobio en el reactor es uno de los pasos más importantes porque en él se contiene la biomasa encargada de degradar la materia orgánica presente en el agua. El inóculo debe presentar estructura de lodo granular que posee elevada densidad y alta actividad metanogénica, para disminuir el periodo de arranque del reactor; por eso, es recomendable obtener el lodo de otro reactor anaerobio. Es necesario, además, que posea buena actividad biológica y concentración elevada de microorganismos lo que permite manejar una carga volumétrica ($\frac{Kg\ DQO}{m^3-d}$) alta.

El lodo a inocular se obtuvo de un reactor anaerobio UASB de la planta de tratamiento de agua residual de una industria de alimentos el cual presentó buena sedimentabilidad y alta actividad metanogénica.

La AME (actividad metanogénica específica) fue evaluada en el laboratorio de química ambiental de la Universidad de La Salle obteniendo un valor de 0.4 Kg DQO/Kg SSV-día, ésta se determinó con el fin de cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presentes en el lodo anaerobio. También es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y permite establecer la capacidad máxima de remoción de DQO de la fase líquida, permitiendo estimar la carga orgánica máxima que puede ser aplicada al reactor impidiendo su desestabilización; asimismo, la AME permite determinar la concentración mínima de biomasa requerida en el reactor para garantizar la reducción de la carga orgánica aplicada (Torres et al, 2005) de la siguiente manera:

$$DQO = AME * Biomasa \text{ (Ver anexo 2)}$$

El lodo inoculado se mezcló con estiércol de caballo para acelerar los procesos metabólicos y proporcionar fósforo y nitrógeno, y se mezcló también con un activador “ACTY PRAD” el cual es un abono orgánico mineral con el fin de aumentar la cantidad de nutrientes y agilizar la degradación de materia orgánica y la producción de biogás. Esta mezcla (lodo, estiércol y activador) se introdujo en el reactor ocupando entre un 35 a un 45 % de su volumen total y se dejó en reposo por un período de 24 horas para generar condiciones de adaptación a la temperatura ambiente. También se suministró melaza al agua residual como fuente de energía en los periodos en que no se contaba con la suficiente agua residual a alimentar puesto que la empresa de textiles únicamente permitió la toma de muestra en tres ocasiones por seguridad y política dentro de la misma empresa. La cantidad de melaza se suministró haciendo un seguimiento visual de la generación de biogás, fácilmente detectable en las burbujas. Cuando se manifestaron eventos de disminución en la producción de biogás, se agregó melaza paulatinamente hasta presentarse condiciones de “estabilidad” de producción del mismo.

5.1.6. Consecución del sustrato.

Con el fin de obtener una muestra representativa y homogénea, se realizó un muestreo compuesto en una industria textil el cual tuvo una duración de 24 horas, comenzando a las 2 pm del día 22 de Julio del 2014 y finalizando a las 2 pm del día 23 de Julio de 2014, como se puede observar en la figura 13.

Debido a procesos como: apresto, enjuagado, descrude, lanzado, estirado, blanqueado, mercerizado, tinción y acabado químico, el sector textil se considera de alto impacto ambiental y de acuerdo a la clasificación de CINSET, se puede catalogar como “Alta significación ambiental ASA”, siendo uno de los impactos más negativos de los efluentes líquidos (Garcés y Peñuela, 2007). Es por esto que es de vital importancia el tratamiento de este tipo de agua residual mediante la tecnología anaerobia para mitigar el impacto generado al medio ambiente.



Figura 13. Muestreo compuesto de agua residual en la industria textil
Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 17 se presentan los cálculos realizados para componer la muestra, así como el caudal promedio de la empresa de textiles.

Tabla 17. *Composición de la muestra de agua residual de la industria textil*

COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA							
Hora	V (ml)	T (s)	Q (ml/s)	Q (L/s)	Volumen total a componer (L)	Alícuota (L)	ml
1	1800	3	600	0,6	5	0,061	60,77
2	2700	3	900	0,9	5	0,091	91,15
3	3200	3	1066,67	1,067	5	0,108	108,03
4	3000	3	1000	1	5	0,101	101,28
5	8700	3	2900	2,9	5	0,294	293,70
6	11600	3	3866,67	3,87	5	0,392	391,60
7	10800	3	3600	3,6	5	0,365	364,59
8	2500	3	833,33	0,83	5	0,084	84,40
9	5320	3	1773,33	1,77	5	0,180	179,60
10	10100	3	3366,67	3,37	5	0,341	340,96
11	2880	3	960	0,96	5	0,097	97,23
12	2000	3	666,67	0,67	5	0,068	67,52
13	11070	3	3690,00	3,69	5	0,374	373,71
14	10730	3	3576,67	3,58	5	0,362	362,23
15	12700	3	4233,33	4,23	5	0,429	428,74
16	9240	3	3080,00	3,08	5	0,312	311,93
17	7600	3	2533,33	2,53	5	0,257	256,57
18	9320	3	3106,67	3,11	5	0,315	314,63
19	8000	3	2666,67	2,67	5	0,270	270,07
20	1900	3	633,33	0,63	5	0,064	64,14
21	1300	3	433,33	0,43	5	0,044	43,89
22	3300	3	1100,00	1,10	5	0,111	111,40
23	2050	3	683,33	0,68	5	0,069	69,21
24	6300	3	2100	2,10	5	0,213	212,68
			Q promedio=	2,06			
			Número total de muestras	24			

Fuente: (Autores, 2014)

Después de ejecutado el muestro, se realizó una caracterización fisicoquímica al vertimiento, (ver tabla 18), para corroborar que el agua fuera apta para ser sometida a tratamiento anaerobio. Esto se hizo el día 5 de Agosto de 2014 en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de La Salle. Con el fin de obtener datos confiables y representativos a la muestra obtenida en la industria textil se tomó dos (2) veces el dato de DQO en la misma semana antes de iniciar la experimentación, ya que éste es el parámetro más importante del proyecto, obteniendo un valor promedio de DQO de 2394 mg/L, el cual se tomó como DQO inicial.

Tabla 18. *Caracterización de la muestra*

CARACTERIZACIÓN			
PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	FECHA
DQO 1	2400	mg/L	05/08/2014
DQO 2	2388	mg/L	08/08/2014
DQO Promedio	2394	mg/L	08/08/2014
Nitrógeno total	<5	mg/L	05/08/2014
Ortofosfatos	1,25	mg/L PO4	05/08/2014
Sólidos sedimentables	0,01	ml/L	05/08/2014
Sólidos suspendidos (SST)	225	mg/L	05/08/2014
Grasas y Aceites	4,25	mg/L	05/08/2014
Detergentes aniónicos	0,72	mg/L	05/08/2014
DBO	732	mg/L	05/08/2014
Fenoles	1,45	mg/L	05/08/2014
Tamaño de los sólidos (lodo granular)	2	mm	05/08/2014
Velocidad de sedimentación del lodo granular	39	m/h	05/08/2014

Fuente: (Autores, 2014)

5.1.7. Montaje del sistema.

Después de corregir las falencias hidráulicas encontradas en las pruebas realizadas y cumplir con el principio de la cabeza hidráulica, se inició el paso del agua residual a través del sistema, realizando pruebas de recirculación y variando la velocidad ascensional en el reactor.

El montaje completo estuvo compuesto por dos tanques: el primero es el tanque de acidificación y el segundo es el de acondicionamiento. El flujo continuo hacia al reactor donde se llevó a cabo toda la degradación de materia orgánica y por último paso al sedimentador o se recirculó al tanque de pre acidificación.

5.1.7.1. Tanque de acidificación.

Esta fue la primera etapa del tratamiento anaerobio, donde el agua residual de la industria textil se almacenó con el fin de efectuar una recirculación dentro del tanque, a través de una bomba sumergible que permitió una homogenización y mezcla completa del fluido para la generación de ácido acético, sustrato fundamental para las bacterias metanogénicas que se encontraron en el manto de lodos dentro del reactor.

Dentro del tanque de acidificación se manejaron tiempos de retención de aproximadamente 6 a 24 horas, variando los valores de pH del agua. Las dimensiones del tanque fueron: 60 cm de diámetro, una altura de 70 cm, y un volumen efectivo de 70 L como se muestra en la figura 19.

5.1.7.2. Tanque de acondicionamiento.

Después del tanque de acidificación, el fluido ingresó al tanque de acondicionamiento a través de una bomba sumergible, ver figura 19. La función de este tanque era estabilizar cargas orgánicas y reducir las sustancias inhibidoras, con el fin de mejorar el proceso de descomposición anaerobia y la tratabilidad del agua en general. Dentro de este tanque también se colocó una bomba sumergible, la cual fue la encargada

de suministrar el agua al reactor ascensionalmente. Las dimensiones obedecen a las mismas del tanque de acidificación. En la salida del tanque se instaló una válvula tipo “Y” que permitió regular el caudal de entrada al reactor.

5.1.7.3. Reactor piloto EGSB.

El reactor piloto EGSB, fue construido en acrílico transparente (Ver Figura 14), con una base en el mismo material. El reactor tuvo una altura de 2.90 m, un diámetro interno de 16.2 cm, para un volumen total de 60 L. Toda la pre-experimentación con el reactor se llevó a cabo en la Planta Piloto de la Universidad de La Salle, Bogotá.

El reactor estaba constituido por los siguientes elementos: una (1) válvula cheque en la entrada, para contener en totalidad el fluido, tres (3) válvulas en su parte inferior para realizar control de calidad al manto de lodos; dos (2) campanas trifásicas con mangueras de extracción para la separación de biogás, los sólidos y el agua; y en la parte superior el vertedero o zona de clarificado.

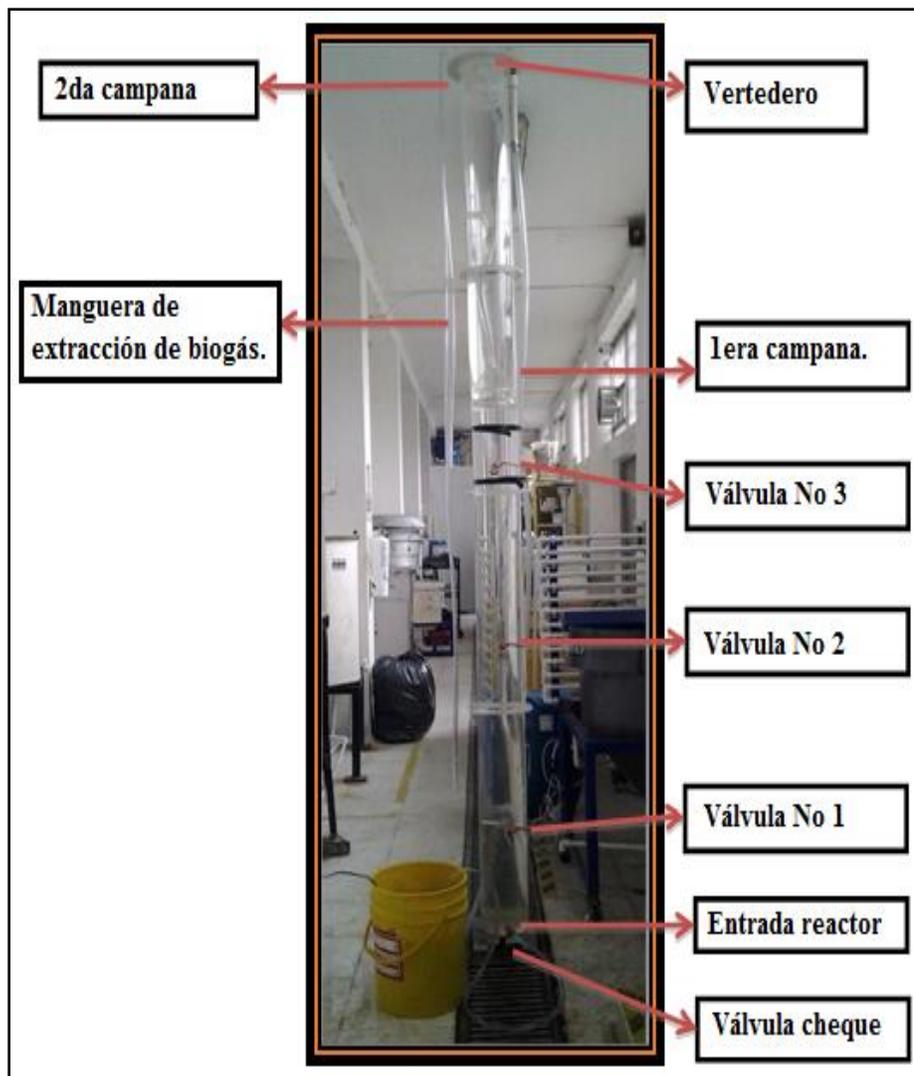


Figura 14. Reactor piloto EGSB
Fuente:(Autores, 2014)

En tres secciones del reactor ocurrían las diferentes etapas para el correcto funcionamiento del reactor, así:

- **Sección 1 o de mezclado:** Allí se llevó a cabo la etapa de mezcla como se muestra en la figura 15, iniciando desde que el afluente ingresaba al reactor, produciendo turbulencia, y se presentó homogenización y mezcla del agua residual a través de un ligero manto de lodos.



Figura 15. Sección 1 o de alimentación al reactor
Fuente: (Autores, 2014)

- **Sección 2 o de manto de lodos del Reactor EGSB:** Hace referencia al manto de lodos. En esta zona se produce la expansión del lodo con el flujo ascensional del agua residual, ver figura 16. Mientras esto ocurre, los microorganismos y bacterias degradan la materia orgánica y generan biopartículas que ascienden con el lodo hasta chocar con los deflectores y liberar el biogás, que es atrapado y extraído por la campana.

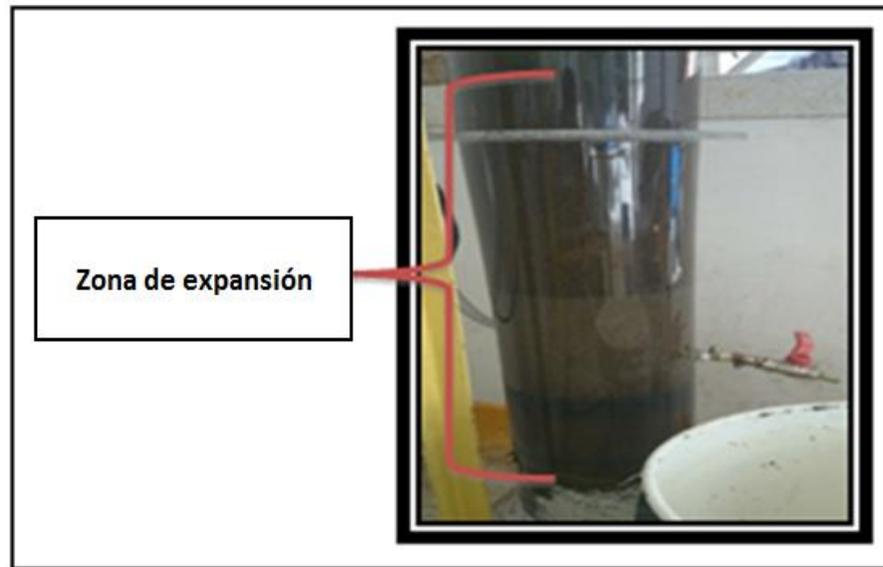


Figura 16. Sección 2 o de manto de lodos del Reactor EGSB

Fuente: (Autores, 2014)

- Sección 3 o de clarificación en el EGSB:** Es la etapa final dentro del reactor, conocida como la etapa de clarificación, donde el fluido después de pasar por la primera campana, continúa su recorrido hasta alcanzar el vertedero (ver figura 17) y seguido a esto, dirigirse al sedimentador, para eliminar partículas sobrantes y sólidos suspendidos contenidos en el efluente.

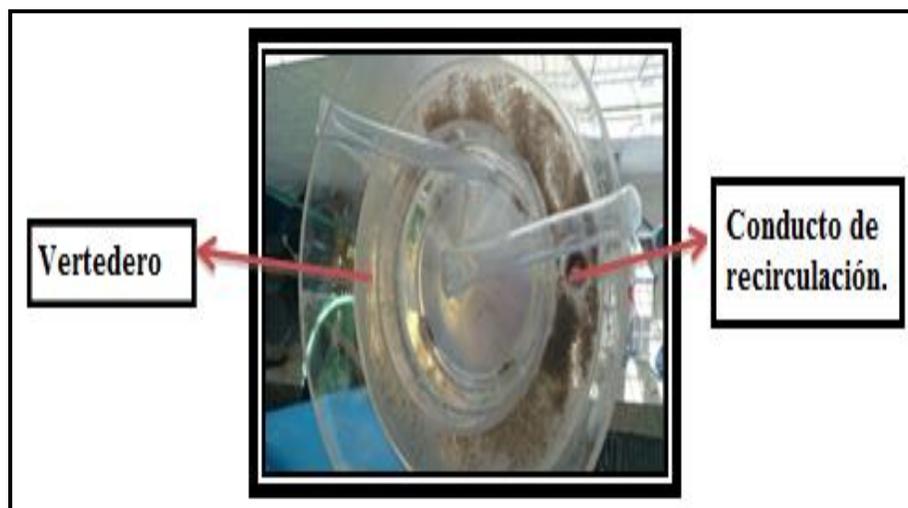


Figura 17. Sección 3

Fuente: (Autores, 2014)

El régimen hidráulico de los componentes del montaje fue bastante estricto y requirió seguimiento y observación. Por esta razón cada uno de estos componentes fue indispensable para el correcto funcionamiento del sistema. Ver figura 18 y Ver plano Ingeniería de detalle Anexo 3.



1. Tanque de acidificación.
2. Tanque de acondicionamiento.
3. Válvula reguladora de caudal.
4. Entrada al Reactor.
5. Manto de lodos.
6. Campana trifásica.
7. Vertedero.

Figura 18. Estructura del montaje
Fuente: (Autores, 2014)

5.1.8. Corroboración de las condiciones de arranque del reactor.

En la tabla 19 se pueden observar las condiciones de arranque con las que se operó el reactor EGSB después de inocular el lodo anaerobio procedente de un reactor UASB. Ver anexo 1.

Tabla 19. *Condiciones de arranque del reactor*

Parámetro	Rango o valor
Temperatura ambiente	11-16 ° C
Caudal	0.384 m ³ /d
pH	6-8
TRH	8 horas
Concentración de DQO inicial	2394 mg/L
Carga contaminante	0.92 Kg/d
Volumen del reactor	0.06 m ³
Velocidad de entrada	0.8 m/h
Carga orgánica volumétrica	15.36 $\frac{\text{Kg DQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$

Fuente: (Autores, 2014)

La velocidad de entrada al reactor fue menor a 1 m/h para evitar remoción y arrastre de biomasa. Se escogió el valor de 0.8 m/h ya que velocidades menores implicaban caudales menores en los cuales la bomba sumergible no garantizaba la cabeza de bombeo, con este valor se manejó una carga orgánica volumétrica (COV) inicial de $15.36 \frac{\text{Kg DQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$, que fue aumentando progresivamente mientras se estabilizaba el sistema, tiempo durante el cual el agua fue recirculada al tanque de pre acidificación y atravesaba nuevamente el reactor EGSB. Luego de la estabilización se recirculó el 91% del efluente al tanque de pre acidificación y el 9 % restante se condujo al sedimentador,

esto se hizo para conservar materia orgánica y nutrientes y garantizar el cumplimiento de la cabeza hidráulica por parte de la bomba sumergible. Ver anexo 2.

El tiempo de retención hidráulico fue prolongado al iniciar el arranque del reactor ya que se debía asegurar el contacto de los sólidos y el atrapamiento de estos en el manto de lodos, como también garantizar las condiciones óptimas que necesitan los microorganismos para llevar a cabo sus procesos metabólicos; así mismo, fue evidente que para valores entre 0.6 m/h y 0.8 m/h de velocidad de alimentación se tuvo buena producción de burbujas de biogás, y se aseguró la correcta distribución del afluente a través del manto de lodos, asegurando la no existencia de zonas muertas. Adicionalmente la velocidad de alimentación no debía ser muy alta puesto que influía significativamente en la pérdida de SST y a su vez en la pérdida de biomasa.

5.2. Fase II: Experimentación sin sello hidráulico (SH)

En esta fase se arrancó el reactor piloto EGSB, garantizando las condiciones óptimas para su correcto funcionamiento. Después de esto se recirculó el agua residual a través de todo el sistema mientras se aseguraba la estabilidad del mismo; se tomó el valor de DQO de entrada y de DQO de salida para verificar la eficiencia de remoción de este contaminante, ya que en ésta etapa no se había implementado la estructura que aseguraba el sello hidráulico, la campana sumergida siempre estuvo inundada lo que impidió su funcionamiento; por lo cual, solo estuvo en ejercicio la campana no sumergida ubicada en la parte superior del reactor, reduciendo la eficiencia de remoción de contaminantes y la extracción de biogás del mismo.

5.2.1. Caracterización de la muestra sin la implementación del sello hidráulico.

Se realizó la caracterización de la muestra evaluando principalmente DQO, porcentaje de sólidos suspendidos en el efluente, tamaño de los sólidos (lodo granular) y velocidad de sedimentación del lodo granular. Estas pruebas se llevaron a cabo después de arrancar el reactor pero antes de la implementación del sello hidráulico (Ver tabla

20). Se tomaron 7 muestras de DQO antes de implementar el sello hidráulico, para obtener resultados confiables y para cumplir con lo estipulado en el análisis estadístico T de Student (Ver numeral 5.5.)

Tabla 20. *Relación de parámetros con el número de muestras antes de la implementación del sello hidráulico*

Parámetro	No. De muestras
DQO	7
Sólidos suspendidos en el efluente	1
Tamaño de los sólidos (lodo granular)	1
Velocidad de sedimentación del lodo granular	1

Fuente: (Autores, 2014)

En la figura 19 se aprecia el procedimiento para determinar de la velocidad de sedimentación del lodo granular, antes de la implementación del sello hidráulico, la cual se calculó de la siguiente manera: se introdujo el lodo en una probeta de 500 ml, se marcó una distancia de 25 cm en la misma y se midió el tiempo en el cual el lodo recorrió esta distancia. Los resultados de esta determinación, se pueden apreciar en la tabla No. 22.

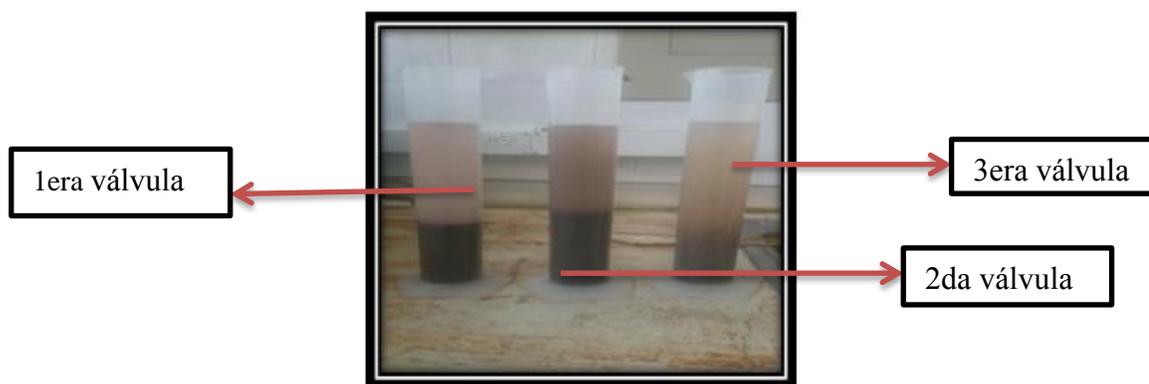


Figura 19. Velocidad de sedimentación del lodo granular antes de la implementación del sello hidráulico.

Fuente: (Autores, 2014)

En la figura 20 se observa el procedimiento de medición del tamaño de los sólidos (lodo granular), antes de la implementación del sello hidráulico, se tomaron diferentes gránulos de lodo, se pusieron en una hoja milimetrada y se midió el tamaño de los mismos. Los resultados de esta determinación, se pueden apreciar en la tabla No. 22.

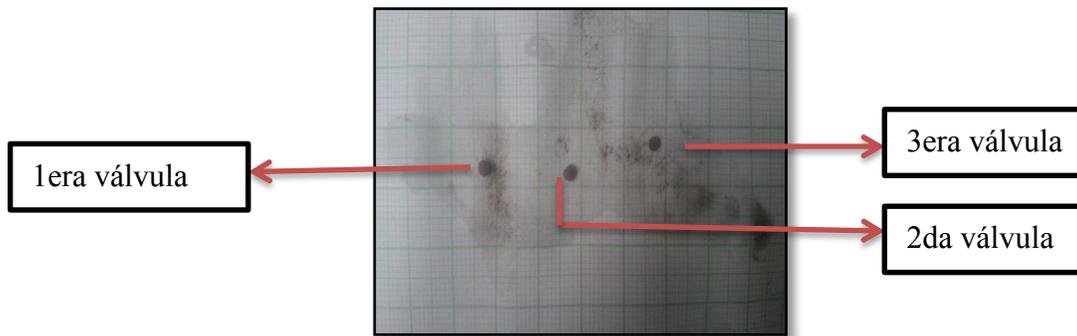


Figura 20. Medición del tamaño del lodo granular
Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 21 se presentan los valores de DQO de entrada, análisis realizados el día 25 de Agosto después de manifestarse equilibrio en el sistema, se pudo observar que el valor es más bajo que el de la primera caracterización del día 5 de Agosto (Ver tabla 18), debido a que durante la estabilización del sistema se presentó degradación de materia orgánica por parte de los microorganismos presentes en el agua residual. En la primera semana de Septiembre se tomaron los valores del agua residual ya tratada (efluente) por el reactor piloto EGSB para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes respecto a los valores tomados en el afluente.

Tabla 21. *Concentración de DQO del afluente y el efluente para las 7 muestras tomadas y % de reducción del mismo*

Muestra No.	[] DQO mg/L inicial (afluente)	Fecha	[] DQO mg/L efluente sin SH	Fecha	% Reducción
1	2210	25/08/2014	1300	01/09/2014	41,18
2	2210	25/08/2014	1310	01/09/2014	40,72
3	2210	25/08/2014	1279	02/09/2014	42,13
4	2210	25/08/2014	1282	02/09/2014	41,99
5	2210	25/08/2014	1290	04/09/2014	41,63
6	2210	25/08/2014	1261	04/09/2014	42,94
7	2210	25/08/2014	1249	05/09/2014	43,48
			Promedio 1281,57		Promedio 42,01

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 22 se observan los valores de la muestra después de arrancar el reactor piloto EGSB pero antes de implementar el sello hidráulico, para parámetros como: sólidos suspendidos en el efluente, tamaño de los sólidos (lodo granular) y velocidad de sedimentación del lodo granular se realizó una sola determinación, mientras que para la DQO se realizaron siete (7) determinaciones, con el fin de cumplir con lo estipulado en el análisis estadístico (Ver numeral 5.5)

Tabla 22. Valores de la caracterización de la muestra antes de la implementación del sello hidráulico

Parámetro	Valor inicial	Fecha	Valor final	Fecha	% de eficiencia
DQO	2210 mg/L (Ver tabla No. 19)	25 de Agosto	1281 mg/L (Ver tabla No. 19)	1-5 de Septiembre	42.01
Sólidos suspendidos en el efluente	225 mg/L (Ver tabla No.16)	5 de Agosto	157.5 mg/L	4 de Septiembre	30
Tamaño de los sólidos (lodo granular)	2 mm (Ver tabla No. 16)	5 de Agosto	2 mm	4 de Septiembre	-
Velocidad de sedimentación del lodo granular	39 m/h (Ver tabla No.16)	5 de Agosto	33 m/h	4 de Septiembre	15.38

Fuente: (Autores, 2014)

5.2.2. Seguimiento visual a la generación de burbujas y su trayectoria.

En esta fase se observó que el diámetro de las burbujas fue de 2 a 5 cm aproximadamente (esto se hizo visualmente). Las burbujas se generaban de forma lenta, no fue posible que entraran por la primera campana (sumergida) puesto que estaba inundada por la ausencia del sello hidráulico, así que cuando el lecho se expandió por encima de esta campana las burbujas que se formaron ingresaron por la segunda campana.

5.3. Fase III: Implementación del sello hidráulico

Para mejorar la eficiencia del reactor piloto EGSB debían funcionar paralelamente las dos campanas, para asegurar una buena extracción de biogás, ya que el biogás que era atrapado por la primera campana (sumergida), al continuar su recorrido era atrapado por la segunda campana. Por tal motivo fue indispensable implementar una estructura que aseguraba el sello hidráulico con el fin de evitar la inundación y obstrucción de la campana sumergida.

5.3.1. Determinación de la posición adecuada de la estructura que aseguró el sello hidráulico.

Se determinó la posición adecuada del sello hidráulico en el prototipo de EGSB mediante el principio fundamental de la hidrostática y el teorema de Pascal. (Ver numeral 6.1)

5.3.2. Montaje de la estructura que aseguró el sello hidráulico en el reactor.

Se implementó el sello hidráulico según los resultados obtenidos en el numeral 6.1, variando la altura desde el nivel del suelo del sello hidráulico hasta una altura por encima de la campana sumergida, para corroborar visualmente en que altura se dio la mayor extracción de biogás por el sello hidráulico. Estas pruebas de gradiente de altura se realizaron del 8 al 19 de Septiembre.

5.4. Fase IV: Experimentación con sello hidráulico.

De acuerdo con el numeral 5.3 y 6.1, la mejor altura para posicionar el sello fue la altura al nivel del suelo, ya que en este punto se observó mayor producción de biogás y mayor velocidad de salida del mismo, por ende el sello hidráulico se dejó ubicado en este punto, para realizar las posteriores pruebas en eficiencia de remoción de contaminantes. De igual manera se observó que al implementar el sello hidráulico la campana sumergida dejó de estar inundada, se generó la interfase gas-liquido dentro de la misma y se pudo extraer biogás, mejorando significativamente la eficiencia en remoción de contaminantes del sistema como se puede observar en la tabla No. 24.

5.4.1. Caracterización de la muestra con la implementación del sello hidráulico.

Se realizó la caracterización de la muestra evaluando principalmente DQO, % sólidos suspendidos en el efluente, tamaño de los sólidos (lodo granular) y velocidad de sedimentación del lodo granular. Estas pruebas se llevaron a cabo después de la implementación del sello hidráulico (Ver tabla 23). Se tomaron 7 determinaciones para DQO después de la implementación del sello hidráulico para obtener resultados confiables y para cumplir con lo estipulado en el análisis estadístico T de Student (Ver numeral 5.5.)

Tabla 23. *Relación de parámetros con el número de muestras después de la implementación del sello hidráulico*

Parámetro	No. De muestras
DQO	7
Sólidos suspendidos en el efluente	1
Tamaño de los sólidos (lodo granular)	1
Velocidad de sedimentación del lodo granular	1

Fuente: (Autores, 2014)

En la figura No. 21 se observa el procedimiento para determinar de la velocidad de sedimentación del lodo granular, después de la implementación del sello hidráulico, la cual se calculó de la siguiente manera: se introdujo el lodo en una probeta de 500 ml, se marcó una distancia de 25 cm en la misma y se midió el tiempo en el cual el lodo recorrió ésta distancia. Los resultados de esta determinación, se pueden apreciar en la tabla No. 25.

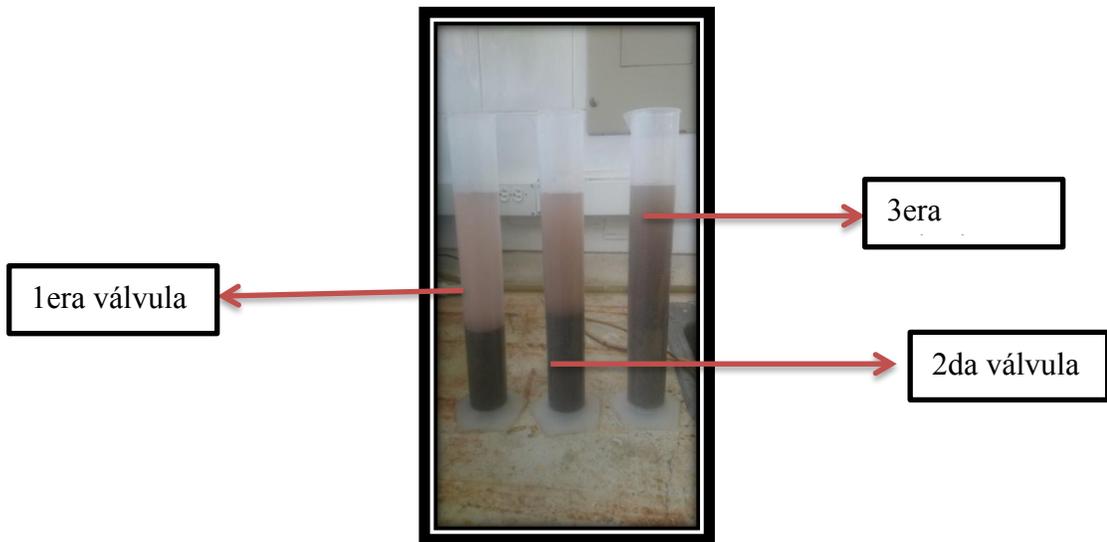


Figura 21. Velocidad de sedimentación del lodo granular después de la implementación del sello hidráulico

Fuente: (Autores, 2014)

En la figura No. 22 se observa el procedimiento de medición del tamaño de los sólidos (lodo granular), después de la implementación del sello hidráulico, se tomaron diferentes gránulos de lodo, se pusieron en una hoja milimetrada y se midió el tamaño del mismo. Los resultados de esta determinación, se pueden apreciar en la tabla No. 25.

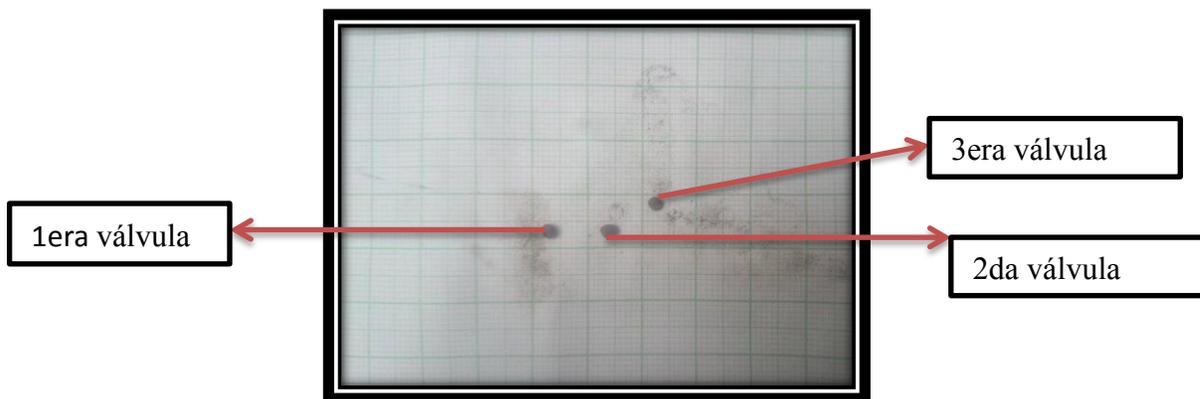


Figura 22. . Medición del tamaño del lodo granular

Fuente: (Autores, 2014)

Para realizar la evaluación del porcentaje de reducción en la concentración de DQO, después de la implementación del sello hidráulico, se tomó el valor de DQO de entrada contra el valor de DQO de salida. El valor de DQO de entrada se tomó según el valor de DQO de salida de la fase II: Experimentación sin sello hidráulico (tabla 21), ya que por tener poco volumen de agua debido a que la empresa de textiles solo dejó realizar tres muestreos por políticas y seguridad de la empresa se debió recircular la misma, y usarla en las diferentes etapas.

En la tabla 24 se observa el porcentaje de reducción del parámetro DQO después de la implementación del sello hidráulico.

Tabla 24. *Concentración de DQO y % de reducción del mismo en el efluente con la implementación del sello hidráulico según la concentración inicial*

Muestra No.	[] DQO mg/L inicial (afluente)	Fecha	[] DQO mg/L efluente con SH	Fecha	% Reducción
1	1184	19/09/2014	378	22/09/2014	68,07
2	1184	19/09/2014	372	23/09/2014	68,58
3	1184	19/09/2014	368	23/03/2014	68,92
4	1184	19/09/2014	357	24/03/2014	69,85
5	1184	19/09/2014	365	25/03/2014	69,17
6	1184	19/09/2014	360	25/03/2014	69,59
7	1184	19/09/2014	356	25/03/2014	69,93
			Promedio 365,14		Promedio 69,16

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 25, se observan los valores de la muestra después de implementar el sello hidráulico, para parámetros como: sólidos suspendidos en el efluente, tamaño de los sólidos (lodo granular) y velocidad de sedimentación del lodo granular se realizó una sola determinación, mientras que para la DQO se realizaron siete (7) determinaciones, con el fin de cumplir con lo estipulado en el análisis estadístico. (Ver numeral 5.5)

Para los sólidos suspendidos en el efluente, tamaño de los sólidos (lodo granular) y velocidad de sedimentación del lodo granular, el valor inicial se tomó, según el valor del efluente en la fase de experimentación sin sello hidráulico (Ver tabla 22), el valor de DQO disminuyó según el valor anterior tomado en la tabla 22 ya que los microorganismos presentes en el agua residual siguen consumiendo materia orgánica.

Tabla 25. Valores de la caracterización de la muestra después de la implementación del sello hidráulico

Parámetro	Valor inicial	Fecha	Valor final	Fecha	% de eficiencia
DQO	1184 mg/L (Ver tabla 20)	19 de Septiembre	365.14 mg/L (Ver tabla No. 22)	22-25 de Septiembre	69.16
Sólidos suspendidos en el efluente	157.5 mg/L (Ver tabla 20)	4 de Septiembre	54 mg/L	24 de Septiembre	65.71
Tamaño de los sólidos (lodo granular)	2 mm (Ver tabla 20)	4 de Septiembre	2 mm	24 de Septiembre	-
Velocidad de sedimentación del lodo granular	33 m/h (Ver tabla 20)	4 de Septiembre	22 m/h	24 de Septiembre	33.33

Fuente: (Autores, 2014)

5.4.2. Seguimiento visual a la generación de burbujas y su trayectoria

En esta etapa se pudo evidenciar que la generación de burbujas fue mayor respecto al seguimiento realizado en la etapa anterior a la implementación del sello hidráulico. Las burbujas con la implementación de sello hidráulico presentaron un diámetro de 4 a 7 cm aproximadamente, estas se generaban de forma rápida y consecutiva e ingresaban por la primera campana (sumergida), seguían por el ducto de extracción de biogás y llegaban al sello hidráulico; cuando el lecho se expandió por encima de la primera campana se formaron burbujas de biogás que se introdujeron por la segunda campana.

5.5. Fase V: Análisis estadístico de la experimentación.

A continuación se desarrolló el análisis estadístico: prueba T-Student que se utilizó para estimar si el resultado de la investigación fue significativo y representativo estadísticamente. Se realizó una observación pareada, procedimiento por el cual se comparan dos medias de diferentes muestras. Se eligió éste método puesto que permite trabajar con menor cantidad de muestras, por lo tanto resulta más pequeño el porcentaje de error en la determinación y así mismo se reducen los costos en análisis de muestras (DQO).

5.5.1. Observación pareada y planteamiento de hipótesis.

En esta estructura de pareamiento las condiciones de las muestras se asignan de forma aleatoria dentro de la unidad homogénea (Agua residual). Esta metodología permite el planteamiento de dos hipótesis una nula (H_0) que es la hipótesis que se rechazó al finalizar el proyecto y la hipótesis alternativa (H_1) que fue la deseada para verificar la eficiencia del sello hidráulico en el prototipo de Reactor de lecho granular expandido (EGSB). Ver tabla 26.

Tabla 26. Planteamiento de hipótesis

	Descripción	Ecuación estadística	Comentarios
H₀ (Hipótesis nula)	La concentración de DQO en el efluente no cambia con y sin la implementación del sello hidráulico	$H_0 = []_{sSH} - []_{cSH} = 0$ $H_0 = (1244 - 852.71) = 391.29$ $H_0 \neq 0$ <p>Se rechaza la hipótesis nula ya que el valor resultante es diferente de 0 (cero)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • H₀ = Hipótesis nula • []_{sSH} = Concentración de DQO sin la implementación de sello hidráulico. Ver tabla No. 12 • []_{cSH} = Concentración de DQO con la implementación de sello hidráulico. Ver tabla No. 15
H₁ (Hipótesis alternativa)	La concentración de DQO en el efluente es menor con la implementación del sello hidráulico	$H_1 = ([]_{sSH} - []_{cSH}) > 0$ $H_1 = (1244 - 852.71) = 391.29$ $H_1 = (1244 - 852.71) > 0$ <p>Se acepta la hipótesis alternativa ya que el valor resultante es mayor a 0 (cero)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • H₁ = Hipótesis alternativa • []_{sSH} = Concentración de DQO sin la implementación de sello hidráulico. Ver tabla No. 12 • []_{cSH} = Concentración de DQO con la implementación de sello hidráulico. Ver tabla No. 15
α = Nivel de significancia	Se escoge un nivel de significancia que hace referencia a la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera	El margen de error usualmente se escoge en un rango de 5 a 10 % para éste caso, se asume un nivel de significancia del 10%, debido a que no existe total certeza de los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio y por errores de operación durante la investigación.	α = 0.10
V = Grados de libertad		$n - 1$ <p>n = Número de muestras</p> <p>Se trabajaron 2 grupos de 7 muestras, puesto que el método permite trabajar con cantidades menores a 30 muestras.</p>	7 - 1 = 6

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 27 se presentan las variables para la siguiente ecuación, la cual describe el intervalo de confianza que debe ser encontrado dentro de la gráfica de distribución T-Student

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Tabla 27. Variables para la ecuación de la observación pareada

Variable	Fórmula o definición	Valor	Comentarios
\bar{x}	Media: Promedio de la diferencia de concentraciones de DQO antes y después de la implementación de sello hidráulico. Ver tabla No. 26	311	Diferencia de las medias de concentración de DQO de las dos observaciones que se confrontaron en el procedimiento estadístico Para este caso es un valor numérico adimensional.
μ_0	Valor especificado de la hipótesis nula: Valor específico de la evaluación de la hipótesis nula de la media de las muestras estudiadas.	0	Este valor se hace 0, ya que corresponde a la hipótesis nula, éste valor debe ser rechazado, para comprobar la significancia de la investigación. Ver tabla No 24.
S^2	Varianza: $S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$	1006.33	Medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.
S	Desviación estándar $\sqrt{S^2}$	31.72	La desviación estándar es una medida de dispersión que indica cuanto se separan los datos, en este caso las concentraciones de las pruebas.
\sqrt{n}	Raíz del número de muestras	2.64	Siendo 7 el número de muestras.
t	Reemplazando en la ecuación principal: $t = \frac{311 - 0}{31.72/\sqrt{7}}$	25.93	Intervalo de confianza que debe ser encontrado dentro de la distribución T-Student.

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 28 se determina el valor de la media, promediando los valores de las concentraciones antes y después de la implementación del sello hidráulico.

Tabla 28. *Valor de la media (\bar{X}). Promedio de la diferencia de concentraciones de DQO antes y después de la implementación de sello hidráulico*

No de Muestra	[] DQO mg/L efluente sin SH	[] DQO mg/L efluente con SH	[] DQO sin SH - [] DQO con SH.
1	1200	855	345
2	1190	847	343
3	1144	833	311
4	1090	840	250
5	1150	849	301
6	1180	870	310
7	1192	875	317
Promedio	1163,71	852,71	311

Fuente:(Autores, 2014)

5.5.2. Tabla de distribución T de Student.

Puesto que el resultado de la prueba T de Student está dentro de las regiones críticas, fue posible afirmar que la Hipótesis nula quedo rechazada, por lo tanto se comprobó estadísticamente la veracidad de los resultados de la investigación.

Para realizar la lectura de los resultados se ubicó en la tabla de distribución T de Student los grados de libertad en la columna y en la fila el nivel de significancia, al relacionar estos dos datos se obtuvo el valor 1.440 el cual estuvo dentro de la región de aceptación.

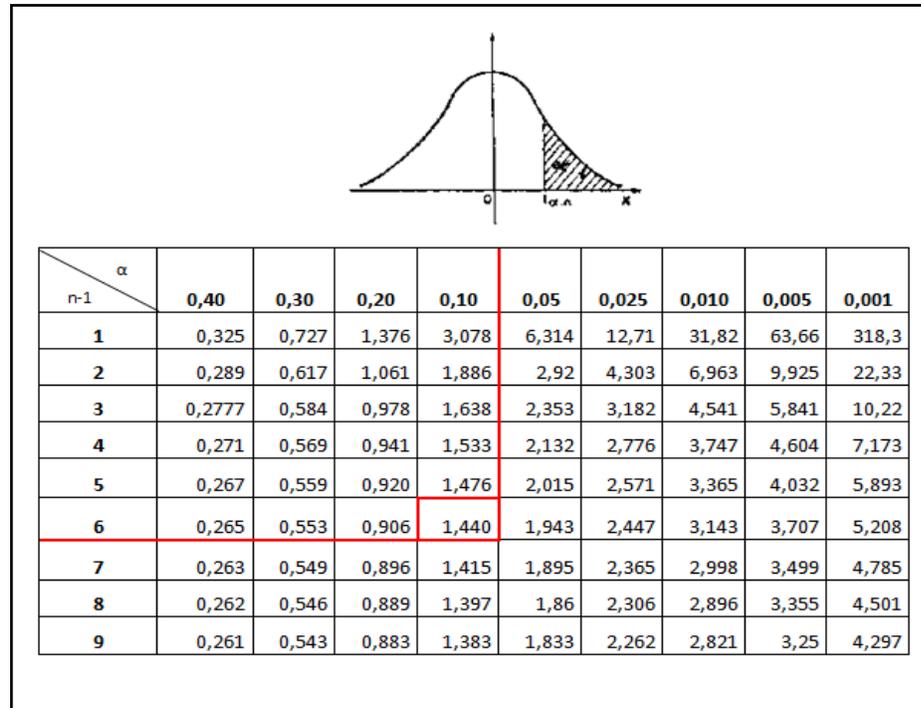


Figura 23. Tabla de distribución T de Student

Fuente: (Walpole et al, 2012)

En la figura 25 se observa que el dato 1.440 según lo relacionado en la figura 24 está dentro del rango crítico que va de 0 a 25.9 (Ver tabla 25) lo que afirma la veracidad de la hipótesis alternativa.

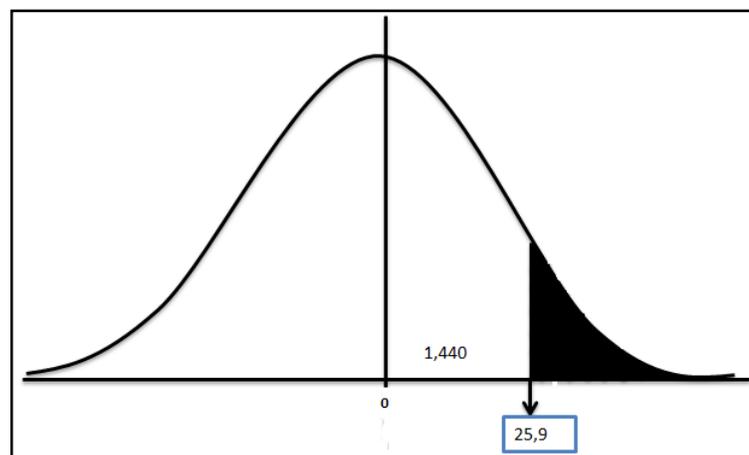


Figura 24. Relación de datos

Fuente: (Autores, 2014)

6. Resultados y análisis de resultados

A continuación se presentan los cálculos realizados con los que se determinó la correcta posición de la estructura que aseguró el sello hidráulico, con base en el teorema de Pascal y la ecuación fundamental de la hidrostática de fluidos.

6.1. Sello hidráulico

Con el fin de evitar el arrastre de sólidos a través del ducto que conduce el biogás de la campana sumergida del reactor piloto EGSB, se implementó una estructura que aseguró el sello hidráulico ubicado afuera del mismo. Ésta consiste en una estructura cilíndrica de plástico de 19 cm de diámetro y 1 m de longitud, la cual se llenó con agua potable y se le introdujo la manguera de extracción de biogás, para evitar la obstrucción de la misma, garantizando una contrapresión del agua contenida en la estructura y el gas generado; de esta forma se aseguró la interfase gas- líquido en la campana trifásica sumergida. A la estructura que aseguró el sello hidráulico se le varió la altura desde el nivel del suelo con el fin de determinar la posición adecuada para obtener la mayor producción de biogás, esto se corroboró mediante el comportamiento en cada una de las alturas, analizando la trayectoria de la burbuja, la formación de la interfase agua-gas y la cantidad de burbujas de biogás producidas en un lapso de tiempo que salieron a través de la estructura que garantizó el sello hidráulico.

Gradiente de alturas

Con el fin de ratificar que la mejor posición en donde se debió ubicar la estructura que garantizó el sello hidráulico fue a nivel del suelo, se usó la ecuación fundamental de la hidrostática; hallando la presión dentro de la campana sumergida, la presión en la estructura del sello hidráulico y por último la presión en el punto final de la manguera de extracción de biogás que se introdujo en el sello hidráulico. De igual manera se tomaron los mismos datos para cada gradiente de altura para confrontarlos con el gradiente de la

posición adecuada. En la figura 26 se observa la presión en el punto B y A y las distancias que se tomaron para los respectivos cálculos.

- **Calculo de la presión en el punto B, es decir la presión dentro de la campana trifásica sumergida, en función del punto A.**

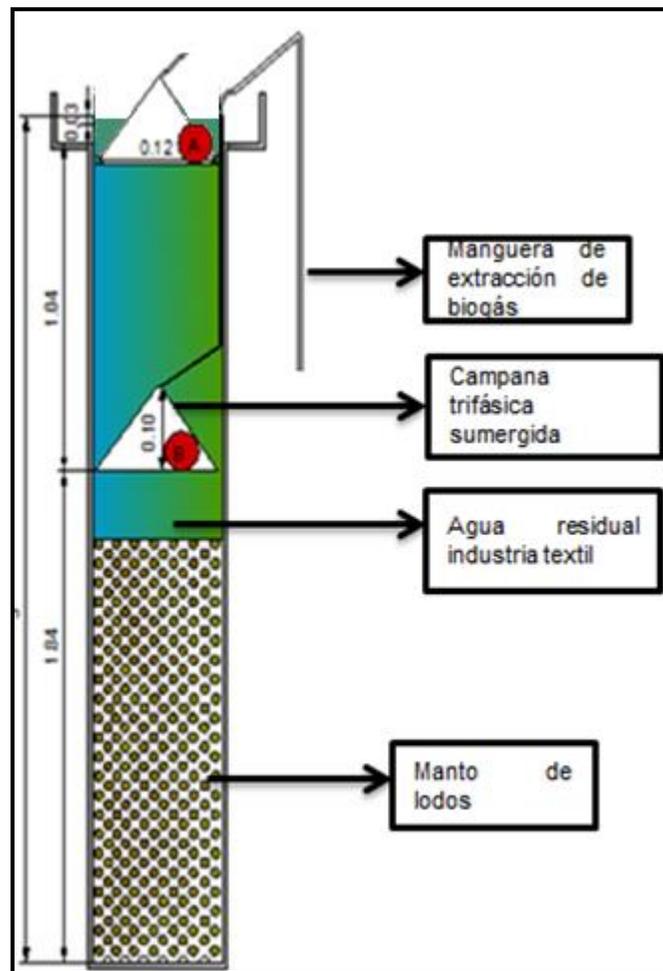


Figura 25. Presión en el punto B, en función del punto A
Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 29 se presentan los cálculos realizados para hallar la presión en el punto B, es decir dentro de la campana sumergida, la cual no se va a alterar, así el sello hidráulico se desplace.

Tabla 29. Variables de la ecuación fundamental de la estática de presión para el punto B.

VARIABLES	Valor	Comentarios
Ecuación	$P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot (\Delta h)$	Ecuación de la estática de presión
P_B	X	La presión en el punto B, la presión a calcular.
P_A	0	La presión en el punto A se toma como cero (0), ya que éste punto está en contacto con la atmósfera
ρ agua residual	$1015 \frac{Kg}{m^3}$	El agua residual de la industria textil se halló en el laboratorio por el método del picnómetro
g	$9.81 \frac{m}{s^2}$	Aceleración de la gravedad
Δh	1.04 m	La diferencia de alturas, es la diferencia entre el inicio de la primera campana (sumergida), hasta el nivel superior de agua.
Despejando P_B	$P_B = \rho \cdot g \cdot \Delta h$	
Reemplazando	$P_B = (1015 \frac{Kg}{m^3}) * (9.81 \frac{m}{s^2}) * (1.05 m)$	
P_B	$10.45 \frac{KN}{m^2}$	
P_B	10.45 KPa Equivale a : 1.515 PSI o 1.065 mcda	La presión en el punto B, que se mantiene para los diferentes gradientes, en KPa, PSI y mcda (metro de columna de agua)

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 30 se presentan los cálculos para hallar la presión que ejerce el agua potable en la estructura que aseguró el sello hidráulico, esta presión va a ser una constante ya que el sello hidráulico en todos los ensayos manejó las mismas características en cuanto a altura, gravedad y densidad del fluido que contenía.

Tabla 30. *Variables de la ecuación fundamental de la estática de presión para la presión en el sello hidráulico*

Variables	Valor	Comentarios
Ecuación	$P_{SH} = \rho \cdot g \cdot (\Delta h)$	Ecuación de la estática de presión
P_{SH}	x	La presión a calcular que ejerce la columna de agua potable dentro de la estructura que aseguró el sello hidráulico
ρ agua potable	$1000 \frac{Kg}{m^3}$	Densidad teórica del agua potable
g	$9.81 \frac{m}{s^2}$	Aceleración de la gravedad
Δh	1 m	Longitud de la estructura que asegura el sello hidráulico
Reemplazando	$P_{SH} = ((1000 \frac{Kg}{m^3}) (9.81 \frac{m}{s^2}) (1 m))$	
P_{SH}	9.81 KPa Equivale a: 1.422 PSI o 1 mcda	La presión dentro de la estructura que asegura el sello hidráulico, la cual va a ser la misma para los diferentes gradientes, en KPa, PSI y mcda (metro de columna de agua)

Fuente: (Autores, 2014)

La estructura que garantizó el sello hidráulico se ubicó en cuatro (4) alturas diferentes desde el nivel del suelo, con el fin de determinar la ubicación más eficiente en cuanto a velocidad de salida del biogás a través del sello, esto se realizó de la siguiente manera:

- **Gradiente de altura No. 1**

Altura = 0, Nivel de referencia

En la figura 27 se observa el gradiente de altura número 1, el cual se hizo a 0 m del nivel del suelo, para hallar la presión en el punto C.

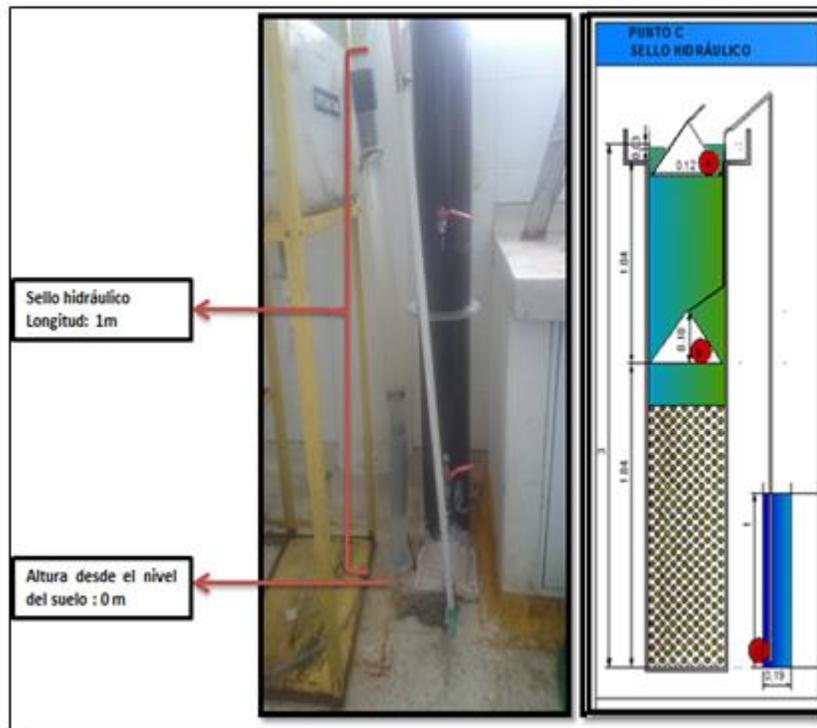


Figura 26. Gradiente de altura de la estructura que aseguró el sello hidráulico en el reactor EGSB piloto No. 1

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 31 se presentan los cálculos para hallar la presión en el punto C, según el principio fundamental de la hidrostática.

Tabla 31. *Variables de la ecuación fundamental de la estática de presión para el punto C en el interior del tubo*

Variabes	Valor	Comentarios
Ecuación	$P_C - P_B = \rho \cdot g \cdot (\Delta h)$	Ecuación de la estática de presión
P_C	x	La presión a calcular dentro de la manguera de biogás en su parte final (dentro del sello hidráulico) para el punto C
P_B	10.45 KPa	Presión en el punto B calculada en la tabla No. 29
ρ metano	$0.67 \frac{Kg}{m^3}$	Densidad teórica del gas metano
g	$9.81 \frac{m}{s^2}$	Aceleración de la gravedad
Δh	1.84 m	Diferencia de altura entre el punto B y el punto C
Calculando P_C	$P_C = ((0.67 \frac{Kg}{m^3}) (9.81 \frac{m}{s^2}) (1.84 m))$ $P_C = 0.012 \text{ KPa}$	Calculando la presión individual en C
Calculando la P_C en función de la P_B	$P_C = (\rho \cdot g \cdot \Delta h) + P_B$	
Reemplazando	$P_C = 0.012 \text{ KPa} + 10.45 \text{ KPa}$ $P_C = 10.462 \text{ KPa}$	
P_C	10.462 KPa Equivale a: 1.517 PSI o 1.066 mcda	Presión en el punto C, en función de la presión en B, en KPa, PSI y mcda (metro de columna de agua)

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla 32 se presentan los cálculos para determinar la velocidad de salida de la burbuja de gas para el punto C.

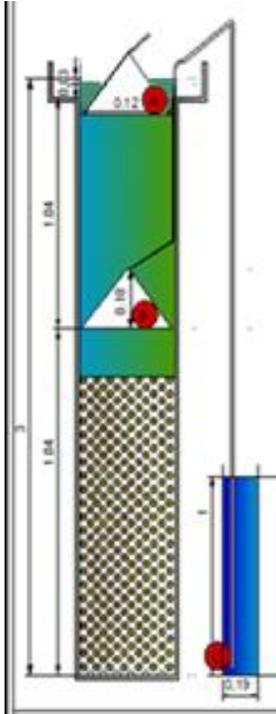
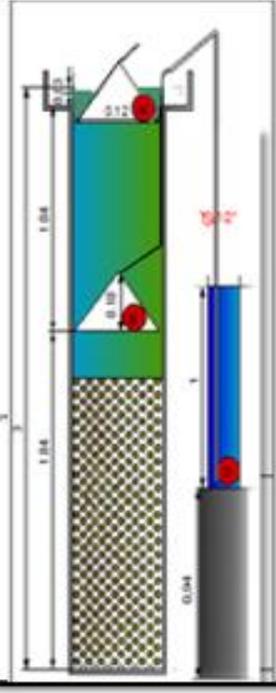
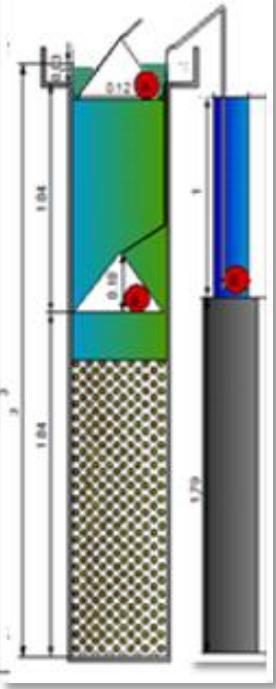
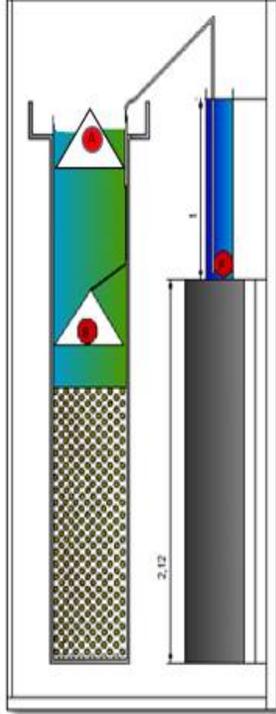
Tabla 32. *Velocidad de salida de la burbuja de gas para el punto C*

Variables	Valor	Comentarios
Ecuación	$V^2 = \frac{2(P_B - P_C)}{\rho_{\text{metano}}} + 2(Z_1 - Z_2)g$	Ecuación para hallar la velocidad de salida de la burbuja en el punto C. La velocidad, el diferencial de presión y la diferencia de altura son directamente proporcionales.
P_B	10.45 KPa	Presión en el punto B, calculada en la tabla No. 29
P_C	0.0122 KPa	Presión individual en el punto C, calculada en la tabla No. 31
ρ_{metano}	$0.67 \frac{Kg}{m^3}$	Densidad teórica del gas metano
g	$9.81 \frac{m}{s^2}$	Aceleración de la gravedad
Z_1	1.84 m	Altura de la campana sumergida desde el nivel del suelo
Z_2	0 m	Altura de la estructura que asegura el sello hidráulico medida desde el nivel del suelo.
Reemplazando	$V = \sqrt{\frac{2(10.45 \text{ KPa} - 0.0122 \text{ KPa})}{0.67 \frac{Kg}{m^3}} + 2(1.84 \text{ m} - 0 \text{ m}) * 9.81 \frac{m}{s^2}}$	Despejando la Velocidad para el punto C de la ecuación principal
V_C	$8.20 \frac{m}{s}$	Velocidad de salida de la burbuja de gas para el punto C

Fuente: (Autores, 2014)

En la tabla No. 33 se presentan las ilustraciones para los diferentes gradientes de altura en los que se ubicó la estructura que aseguró el sello hidráulico.

Tabla 33. *Ilustraciones de los diferentes gradientes de altura*

Gradiente de altura No. 1 Altura desde el nivel del suelo: 0 m	Gradiente de altura No. 2 Altura desde el nivel del suelo: 0.94 m	Gradiente de altura No. 3 Altura desde el nivel del suelo: 1.79 m	Gradiente de altura No. 4 Altura desde el nivel del suelo: 2.12 m
<p style="text-align: center;">PUNTO C</p> 	<p style="text-align: center;">PUNTO D</p> 	<p style="text-align: center;">PUNTO E</p> 	<p style="text-align: center;">PUNTO F</p> 

Fuente: (Autores, 2014)

Para los gradientes de altura 2, 3 y 4, se calculó la presión en cada punto y la velocidad de salida del biogás por el mismo método que se calculó para el gradiente No. 1 (ver tabla 31 y 32), en la tabla 34 se presenta una tabla resumen de los cálculos realizados, para los cuatro gradientes de altura.

Tabla 34. *Tabla resumen de presión y velocidad para los cuatro gradientes*

Gradiente y altura	Presión	Velocidad	Comentarios
<p>PUNTO C</p> <p>Gradiente No. 1</p> <p>Altura: 0 m desde el nivel del suelo</p>	10.462 KPa	$8.20 \frac{m}{s}$	<p>En este punto el diferencial de presión (ΔP) fue alto, debido a la diferencia de altura entre el sello y la campana sumergida, permitiendo mayor escape del biogás a mayor velocidad.</p> <p>A si mismo se evidenció la generación de burbujas, las cuales se produjeron de forma constante y a gran velocidad, es decir mayor extracción de biogás. Esto se debe a que la presión en el punto C =10.462 KPa, fue la presión más alta entre todos los demás puntos del ensayo, superando la presión que se encuentra fuera de la manguera, es decir la presión ejercida por la columna de agua potable dentro de la estructura que garantiza el sello hidráulico $P_{SH} =9.81$ KPa, lo que permite al biogás vencer la columna de agua y salir.</p>
<p>PUNTO D</p> <p>Gradiente No. 2</p> <p>Altura: 0.94 m desde el nivel del suelo</p>	10.455 KPa	$6.98 \frac{m}{s}$	<p>En el punto D, se evidencio que la generación de burbujas fue un poco más lenta, es decir que la velocidad de salida de biogás $V_D = 6.98m/s$, ver tabla 34, disminuyó respecto al punto C, permitiendo a la burbuja tener más tiempo de formación y obtener un tamaño más grande, aproximadamente entre 1 y 2 cm de diámetro. De igual manera, la estructura que garantizó el sello hidráulico ubicado a una altura de 0.94, evitó el arrastre de sólidos suspendidos por el ducto de extracción de biogás y permitió la extracción del mismo, pero en menor cantidad; debido a que el diferencial de presión (ΔP) fue menor.</p>
<p>PUNTO E</p> <p>Gradiente No. 3</p> <p>Altura: 1.79 m desde el nivel del suelo</p>	10.450 KPa	$5.67 \frac{m}{s}$	<p>Ya que en este punto el diferencial de presión se hizo menor (ΔP), disminuyó la extracción del biogás y la velocidad de salida del mismo.</p>
<p>PUNTO F</p> <p>Gradiente No. 4</p> <p>Altura: 2.12 m desde el nivel del suelo</p>	10.448 KPa	$6.05 \frac{m}{s}$	<p>En el punto F se mantuvo la interfase en la campana trifásica. No se presentó obstrucción por arrastre de sólidos o inundación en la campana.</p> <p>Debido a que la presión en F fue menor a la presión dentro de la campana trifásica es decir en el punto B la burbuja de gas no tuvo la fuerza para hacer el recorrido a través de la manguera, por ende no se visualizó el burbujeo en la estructura que garantizó el sello hidráulico normalmente presentado en los anteriores ensayos.</p>

Fuente: (Autores, 2014)

Según la tabla 34 la mejor posición para ubicar la estructura que aseguró el sello hidráulico, fue el gradiente 1 a una altura de cero (0) metros desde el nivel del suelo, ya que a esta altura hay un mayor diferencial de presión lo que aseguró que la burbuja de gas pudiera realizar todo su recorrido a través de la manguera de extracción de biogás y finalmente salir por el sello hidráulico, del mismo modo a esta altura se evidenció la mayor velocidad de salida de burbujas, de manera constante y rápida.

En los otros puntos del ensayo también se observó la salida de biogás a través de la estructura que aseguró el sello hidráulico, pero de forma lenta e inestable debido a que el diferencial de presión se hizo menor, gracias a la diferencia de altura entre el sello hidráulico y la campana sumergida también disminuía según cada gradiente.

En la tabla 35 se analizaron cualitativamente los parámetros que se observaron después de implementar el sello hidráulico.

Tabla 35. *Caracterización cualitativa*

Parámetro	Observación	Análisis
Generación de interfaz líquido-gas.	Se evidencio la formación de la interfaz líquido- gas dentro de la campana sumergida.	La presión que ejerce el sello hidráulico sobre la campana sumergida a través del ducto de extracción de biogás, permite la formación de la interfaz líquido-gas, evitando que el fluido ascensional tome un camino preferencial por la campana y de esta manera es posible extraer el biogás eficientemente.
Arrastre de sólidos.	Evito el arrastre de solidos por el ducto de extracción de biogás.	Sin la implementación del sello hidráulico el arrastre de sólidos y el taponamiento del ducto de extracción de biogás fue una condición constante, pero esto se solucionó cuando se implementó la contra columna de agua fuera del reactor (sello hidráulico), ya que al ejercer presión a través de la manguera de extracción, evitó el taponamiento e inundación de la misma. Además evitar el arrastre de solidos permite mantener una concentración constante de biomasa.
Generación de burbujas.	Se formaron burbujas de pequeño diámetro.	El diferencial de presión existente entre la campana sumergida y el sello hidráulico tiene una relación directamente proporcional a la velocidad de salida de biogás, es decir si este se hace mayor, la velocidad también lo será. Por esta razón las burbujas tienen menos tiempo de formación, a lo que atribuimos su pequeño diámetro.

Fuente: (Autores, 2014)

7. Conclusiones

- Para garantizar un correcto funcionamiento de un reactor anaerobio con campana sumergida, es indispensable la implementación de una estructura que garantice el sello hidráulico, la cual evita el arrastre de sólidos por el ducto de extracción de biogás y a su vez asegura el contenido de biomasa dentro del reactor, además incide directamente en la eficiencia de reducción de materia orgánica del reactor piloto EGSB, esto se corroboró experimentalmente ya que el porcentaje de reducción sin la implementación del sello hidráulico fue de 42%, y con la implementación del sello hidráulico fue de 69.1%, mejorando la eficiencia del sistema en un 27%.
- La posición de la estructura que garantiza el sello hidráulico en un reactor EGSB con campana sumergida, deberá estar ubicada a una altura donde la diferencia de presión entre la campana sumergida y la estructura que asegura el sello hidráulico sea lo suficientemente alta para mantener una interfase gas-líquido y salida permanente de biogás a través del ducto de extracción del mismo, de igual manera la longitud de la estructura que asegura el sello hidráulico, debe ser semejante a la distancia que hay entre la campana sumergida y la cota superior del agua residual en el reactor anaerobio.
- Para que se genere la interfase líquido-gas durante la digestión anaerobia, es necesario un proceso de degradación constante, que produzca así mismo un flujo continuo de biogás, ya que éste es el que permite la formación de la interfase impidiendo el paso de agua por la campana trifásica.
- Para garantizar un exitoso arranque del reactor es indispensable proporcionar condiciones óptimas de funcionamiento como: la actividad metanogénica de la biomasa, que debe ser suficiente para degradar la materia orgánica presente, la carga volumétrica y la velocidad de alimentación.
- Es fundamental conocer el comportamiento hidráulico de todos los dispositivos del sistema, un reactor biológico no solo se compone de biomasa sino de circuitos

hidráulicos que, de estar mal calculados, ocasionarían deterioro del componente biológico, por la presencia de puntos muertos, caminos preferenciales o algún tipo de falla hidromecánica en los mismos equipos.

Recomendaciones

- Cabe resaltar que los sistemas anaerobios son muy estrictos en su etapa de arranque, puesto que requieren muchas condiciones ambientales e hidráulicas para lograr que el sistema se encuentre estabilizado y de esta manera garantizar un correcto funcionamiento. Para este caso, la etapa de arranque tuvo que ser acelerada por motivos de tiempo, puesto que la Universidad de La Salle requería el espacio donde estaba ubicado el reactor, lo que pudo afectar el rendimiento del mismo, al no alcanzar total estabilidad. Por tal motivo, es pertinente realizar una etapa de arranque un poco más prolongada para asegurar que el sistema esté completamente estabilizado y así mismo garantizar resultados más confiables, con el fin que la disminución en la DQO sea efecto de la implementación del sello hidráulico y no por desestabilización en el sistema.
- Es pertinente realizar un estudio sobre como determinar las pérdidas de energía que se generan dentro del reactor debido a la fricción con el manto de lodos, puesto que no existe ningún factor de fricción que permita calcular esta pérdida menor dentro del sistema.
- Es conveniente instalar dos manómetros en el reactor, uno en la entrada y otro sobre la campana sumergida, con el fin de obtener los datos de presión exactos y poder determinar el diferencial existente y de esta manera tener más certeza en los resultados obtenidos.
- Es adecuado realizar las pruebas en un laboratorio externo al del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la universidad de La Salle, puesto que los resultados obtenidos pueden estar sujetos a porcentajes de error altos debido a que los reactivos han sido alterados en anteriores prácticas y los equipos no están calibrados.

Bibliografía

- Arango, O. y Sanches, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria Láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. Popayán, Colombia.
- Calderón, A y López, H. (2004). Evaluación del desempeño de un reactor anaerobio de lecho expandido a escala laboratorio con agua residual de una industria de vinos en la ciudad de Bogotá D.C (tesis de grado). Universidad de la Salle, Bogotá.
- Campos, C. y Anderson, G. (1991). The effect of the liquid upflow velocity and the substrate concentration on the start up and the steady state periods of lab scale UASB reactors. In: 6° International Symposium on anaerobic Digestion: São Paulo, Brasil .
- Chernicharo, C. (2007). Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidad Federal de Minas Gerais. Brasil.
- Conil, P. (2008). La tecnología anaerobia U.A.S.B. en el tratamiento de las aguas residuales domesticas: 10 años de desarrollo y maduración en América Latina.
- Díaz, M., Espitia, S., y Molina, F. (2002). Digestión Anaerobia: Una aproximación a la tecnología. Unibiblios .51-53
- Garcés, L., Peñuela, G. (2007). Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil. Revista Lasallista de investigación. Vol 4 No. 2, 24.
- Gómez, D. (2010). Diseño de una antorcha en instalaciones de regasificación de GNL (proyecto fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, España.
- González, M. (2013). Estudio hidrodinámico en un reactor anaerobio de flujo ascendente mediante dinámica de fluidos computacional (tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Celaya, México.
- Medhat, M. and Usama, F. (2002). UASB/EGSB Applications for industrial wastewater treatment. Seventh International Water Technology Conference. Egypt.
- Mesa, M. (2013). Estudio de la biodegradabilidad de mezclas de compuestos fenólicos alquil-sustituidos bajo condiciones de metanogénesis (tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana, México.

- Metcalf, A & Eddy, J . (1998). Ingeniería de aguas residuales. Tratado, vertido y reutilización. Tercera edición. Vol 1. Madrid, España.
- Morillo, F. y Fajardo, E. (2005). Estudio de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la Esmeralda. Manizales, Colombia.
- Mott, R. (2006). Mecánica de fluidos. Sexta edición. p 61.
- Orozco, Á. (1986). Tratamiento biológico de las aguas reiduales. Asociación Colombiana de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Medellín, Colombia.
- Orozco, A. (2005). Bioingeniería de Aguas Residuales. Teoría y diseño. Acodal, 20-22, 42-43.
- Pachecho, J y Magaña, A. (2003). Arranque de un reactor anaerobio. Yucatán, México.
- Penna, J. (1994). Estudo da metodologia do teste de atividade metanogênica específica. Brasil: Tese de doutorado. Escola de Engenharia USP-São Carlos.
- Poetsch, P y Koetz, P. (1998). Sistema de determinação da atividade metanogênica específica de lodos anaeróbios. 4: 161-165: Brasil.
- Rodríguez, J. (2006). Arranque y operación de reactores anaerobios.
- Romero, J. (2001). Tratamiento de aguas residuales. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Torres, P., Rodríguez, J., Barba, A., y Narváez, J. (2005). Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB. Ingeniería y desarrollo. Cali, Colombia.
- Van Haandel, A and Lettinga, G. (1994). Anaerobic sewage treatment. A practical guide for regions with a hot climate. Chichester, England.: 163-172.
- Walpole, R., Myers, R y Myers, S. (2012). Probabilidad y estadística para ingenieros. Novena edición, 321-329.
- Zegers, F. (1987). Microbiología, arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos UASB. Universidad del Valle, CVC. Universidad agrícola de Wageningen: Cali.

Anexos

Anexo 1

Parámetros de diseño reactor EGSB piloto

EGSB				
Parámetro	Unidad	Rango	Valor	Formula
Caudal	0,384		m ³ /d	
	0,016		m ³ /h	
DQO inicial	2400		mg/L	
	2,4		Kg/m ³	
Carga contaminante	0,9216		Kg/d	Caudal* DQO inicial
Velocidad	0,8	0,5-1	m/h	Asumido
Tiempo de retención	4-8	6-12	h	Asumido
Volumen	0,064		m ³	Caudal* tiempo de retención
Carga Orgánica	14,4	15-35	kg DQO/d-m ³	Carga contaminante/ volumen
Área	0,02		m ²	Caudal/velocidad
Alto	2,9		m	
Diámetro	0,52		m	
Radio	0,26		m	
Carga hidráulica	19,2		m ³ /m ² -d	Caudal/Área
CAMPANAS				
Velocidad de flujo	76,8		m/d	4* Carga hid.
	3,2		m/h	
Inclinación	70	> 60	grados	Asumido
Área de abertura	0,005		m ²	
Área secc. transversal	0,015		m ²	Área-área abertura
Radio mayor	0,069		m	raíz(área secc trans/Pi)
Ancho de la abertura	0,191		m	Radio-Radio mayor
Ancho mínimo interno de la campana	0,02		m	Asumido
Altura tope del separador GLS sobre la superficie del líquido	0,02		m	Asumido
Ancho Campana	0,12		m	Radio-Ancho abert- 0,5(altura top)
Altura Campana	0,1		m	ancho campa * tan60
DEFLECTORES				
Inclinación	45		grados	Asumido
Traslapo	0,286		m	1,5 * ancho abertura
Ancho de los deflectores	0,477		m	Traslapo + ancho de abertura
Longitud de deflectores	1,6		m	2*(ancho defl)*tan45

Anexo 2

VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN Y RECIRCULACIÓN

	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Fórmula
Q máx. bomba	0,62	$\frac{m^3}{h}$	612	$\frac{L}{h}$	Aforo
Altura	3	m			
Volumen	60	L	0,06	m^3	Área*altura
Área	0,20	m^2			Vol/Altura

Velocidad alimentación (bomba sumergible)	Unidad	Área	Unidad	Caudal	Unidad	Caudal	Unidad	
0,5	$\frac{m}{h}$	0,20	m^2	0,10	$\frac{m^3}{h}$	100	$\frac{L}{h}$	
0,6	$\frac{m}{h}$	0,20	m^2	0,12	$\frac{m^3}{h}$	120	$\frac{L}{h}$	
0,7	$\frac{m}{h}$	0,20	m^2	0,14	$\frac{m^3}{h}$	140	$\frac{L}{h}$	
0,8	$\frac{m}{h}$	0,20	m^2	0,16	$\frac{m^3}{h}$	160	$\frac{L}{h}$	Velocidad inicial escogida
0,9	$\frac{m}{h}$	0,20	m^2	0,18	$\frac{m^3}{h}$	180	$\frac{L}{h}$	
1	$\frac{m}{h}$	0,20	m^2	0,20	$\frac{m^3}{h}$	200	$\frac{L}{h}$	

VOLUMEN DE LODO A INOCULAR EN EL REACTOR

$$\text{DQO máx} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{d}} \right) = \text{AME} \left(\frac{\text{Kg DQO}}{\text{Kg SSV-d}} \right) * \text{SSV (Kg SSV)}$$

Variables	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Fórmula o comentarios
DQO inicial	2394	$\frac{\text{mg}}{\text{L}}$	2,39	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$	Laboratorio
Q real de la bomba	0,16	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	3,84	$\frac{\text{m}^3}{\text{d}}$	Asegurando una velocidad de entrada de 0,8 m/h
Carga contaminante	9,19	$\frac{\text{Kg}}{\text{d}}$			CC= DQO inicial* Q real de la bomba
AME	0,4	$\frac{\text{Kg DQO}}{\text{Kg SSV - d}}$			Laboratorio
Densidad del agua residual	1015	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$			Laboratorio
Sólidos suspendidos volátiles en el reactor (Base seca)	22,19	Kg SSV en base seca			SSV (base seca)= $\frac{\text{DQO máx}}{\text{AME}}$
Base húmeda	221,90	Kg SSV en base húmeda			Base húmeda= $\frac{\text{Base seca}}{\% \text{ de sólidos}}$ 10 % = Sólidos 90 % = Agua
Volumen calculado de lodo a inocular en el reactor	0,21	m^3	218,60	L	Volumen de lodo= Base húmeda/ densidad del agua residual

Porcentaje de recirculación					
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Fórmula o comentarios
Volumen real de lodo inoculado	20	L	0,02	m ³	33 % del volumen total del reactor
Base húmeda	20,3	Kg SSV en base húmeda			Base húmeda=(Volumen real de lodo inoculado)* (ρ del agua residual)
Base seca	2,03	Kg SSV en base seca			Base seca= Base húmeda* % sólidos 10 %= sólidos 90 %= agua
Q de entrada según el volumen real de lodo inoculado	0,339	$\frac{m^3}{d}$	0,014	$\frac{m^3}{h}$	Q máx inicial= $\frac{AME*SSV}{DQO\ inicial}$
Total de recirculación	Se tiene que asegurar 0,146	$\frac{m^3}{h}$	91	%	- $0,16 \frac{m^3}{h}$ = caudal que asegura una velocidad de 0,8 m/h - $0,014 \frac{m^3}{h}$ = caudal a manejar según la DQO inicial y el volumen de lodo inoculado - $(0,16-0,014) = 0,146$ = caudal a recircular - 0,16=100 % - 0,146 =91 %

Anexo 3

Anexo 4

10.10 Coeficientes de resistencia para válvulas y acoplamientos

TABLA 10.4 Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D .

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de ángulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
— $3/4$ abierta	35
— $1/2$ abierta	160
— $1/4$ abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a 90°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Fuente: Crane Valves, Signal Hill, CA.

Fuente: (Mott, 2006)