

Diseño de un digestor anaeróbico de flujo ascendente y estudio de adaptación a la variabilidad de los residuos sólidos orgánicos

Mydory Nakasima¹, Nicolás Velázquez¹, Sara Ojeda², Néstor Santillán³, Luis Uribe¹, Gabriel Pando¹, Adolfo Ruelas¹

Centro de Estudios de las Energías Renovables¹, Laboratorio de Residuos Sólidos², Laboratorio de Meteorología y Climatología³

Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México

[mydory.nakasima, nicolas.velazquez, sara.ojeda.benitez, nsantillan, gonzalezl18, gabriel.pando, ruelasa]@uabc.edu.mx

Abstract— This paper presents the design of a upflow anaerobic sludge blanket digester and a study of adaptation to varying concentration and amount of organic solid waste from the residential sector. Dimensioning methodology is developed considering the physical and operational design constraints, besides a parametric study is performed that allows to find a design point. The construction of the digester at pilot scale with continuous feed is adapted to the quantity of waste that varies from 8.2 - 60 kg/day. The results indicate that this technology has great advantages due to its flexibility in operation, and it is adaptable to the variability present such waste, which must be pre-treated to be easily processed and increase the biogas production.

Keyword— *Organic solid waste, design, upflow anaerobic sludge blanket digester, parametric study, biogas.*

Resumen—Este trabajo presenta el diseño de un digestor anaeróbico de flujo ascendente y un estudio de adaptación a la cantidad y concentración variable de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial. Se desarrolla una metodología de dimensionamiento considerando restricciones físicas y operativas del diseño, además se realiza un estudio paramétrico que permitió encontrar un punto de diseño. La construcción del digestor a escala piloto con alimentación continua, se adapta a una cantidad de residuos de 8.2 - 60 kg/día. Los resultados indican que esta tecnología presenta grandes ventajas debido a su flexibilidad en la operación, ya que es adaptable a la variabilidad que presentan dichos residuos, los cuales deben ser pre-tratados para procesarlos fácilmente e incrementar la producción de biogás.

Palabras claves— *Residuos sólidos orgánicos, diseño, digestor anaeróbico de flujo ascendente, estudio paramétrico, biogás.*

I. INTRODUCCIÓN

Debido al rápido crecimiento de la población y sobre todo en los países desarrollados, se cuenta con el mayor índice de consumo provocando un incremento en la generación de residuos. Mexicali, Baja California, México no es la excepción, ya que en el año 2010 se han registrado 936,826 habitantes, lo que corresponde aproximadamente al 30% del total de la población del estado de Baja California [1]. En el año 2005 en la ciudad de Mexicali, se han registrado 58.26% de residuos sólidos orgánicos del sector residencial compuestos principalmente por desechos de comida y jardines [10], equivalentes a 470 toneladas diarias que a su vez corresponden a 0.501 kg/hab/día., es importante mencionar que estos valores son estimados compuestos solamente de residuos orgánicos [11]. Actualmente, existen opciones tecnológicas aplicadas para reducir los efectos negativos que ocasionan este tipo de residuos [2], los cuales contienen un gran potencial para ser utilizados como fuente de energía.

Entre los tratamientos biológicos, la degradación de residuos orgánicos por digestión anaeróbica usualmente es considerada el proceso más rentable debido a la alta recuperación de energía pero sobre todo por su limitado impacto ambiental, este proceso consiste en la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, como producto principal se obtiene biogás rico en metano, dióxido de

carbono y trazas de otros gases, donde el metano es un producto potencialmente valioso que se puede utilizar como combustible para la producción de energía eléctrica y térmica [3,9]. Sin embargo, la aplicación de la tecnología de digestión anaeróbica para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos no está muy extendida, debido al tiempo que se necesita para alcanzar una bioestabilización en comparación con el tratamiento aeróbico [4].

En las últimas décadas se han desarrollado numerosos procesos para el tratamiento de residuos de alto contenido de materia orgánica, tal como los residuos de alimentos. Sin embargo, de todos ellos los más empleados, por eficiencia en remociones, son los sistemas anaerobios de flujo ascendente, como los reactores tipo UASB [12]. Es por eso que se propone el diseño de un digestor de manto de lodos anaeróbico de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés), el cual consiste en un sistema de tratamiento anaeróbico ampliamente aplicado con una alta eficiencia de tratamiento y un corto tiempo de retención hidráulico (TRH) [8]. El TRH se logra aplicando un adecuado pre-tratamiento al residuo, debido a que los residuos de comida se encuentran en partículas de gran tamaño, la hidrólisis (primer fase del proceso de digestión anaeróbica) es por lo general la etapa limitante para sustratos en forma de partículas disminuyendo la velocidad de reacción, para mejorar la eficiencia del proceso general de digestión anaeróbica, se hace uso de un pre-tratamiento mecánico y térmico, el primero consiste en una trituración del residuo que ayuda a reducir su tamaño inicial, el segundo consiste en aplicar cocción a altas temperaturas para desdoblar la materia orgánica en partículas más simples logrando acelerar el proceso de degradación además disminuye el TRH [9]. La razón principal por la que se realiza este trabajo, se debe a que en Mexicali B.C., no se han desarrollado estudios para el tratamiento anaeróbico de los *residuos sólidos orgánicos del sector residencial*. La tecnología propuesta en este artículo se considera fácilmente adaptable al gran problema de la variabilidad que presentan los residuos sólidos orgánicos específicamente del sector residencial en cuanto a su *cantidad y concentración* expresada en kg de demanda química de oxígeno (DQO).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Descripción física y operativa del sistema

El digestor anaeróbico propuesto a escala piloto, es un sistema diseñado que tiene como objetivo principal tratar residuos sólidos orgánicos del sector residencial (desperdicios de comida y poda de jardín), además tiene la capacidad de tratar aguas residuales (domiciliarias, industriales, agrícolas, etc.), así como realizar codigestión anaeróbica utilizando diferentes tipos de residuos orgánicos con la finalidad de aumentar el rendimiento en la producción de biogás. Básicamente, el principio de funcionamiento de los UASB es que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, influente (sustrato) entra por la parte inferior del tanque, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. El tratamiento anaeróbico de flujo ascendente, son sistemas en los que los microorganismos se agrupan formando biogránulos [7]. El sistema consiste en tres tanques colocados sobre una estructura metálica que los mantiene fijos y en posición horizontal, el cual cuenta con un molino triturador (d) que sirve para pre-tratar los residuos sólidos orgánicos antes de ser degradados y además está integrado a un subsistema de calentamiento solar que permitirá mantener la temperatura ideal en cualquier época del año (Fig. 1).

El primer tanque “influyente” (a) de acero inoxidable, tiene la función de recibir los residuos pre-tratados mecánica y térmicamente, diluirlos, mezclarlos y alimentar al digestor. La forma de alimentar es con una bomba sumergible colocada en el interior del tanque.

El segundo tanque, es el digestor anaeróbico (b) de acero inoxidable, cuenta con 4 puntos de muestreo (e) a diferentes alturas que servirán para analizar el sustrato y ver el comportamiento de cada

una de las variables implicadas en el proceso de digestión anaeróbica (sólidos volátiles, pH, temperatura, relación C/N, demanda química de oxígeno, etc.).

En el interior del tanque específicamente en la parte inferior, es por donde se alimenta con el sustrato previamente preparado en el primer tanque, en este caso la forma de alimentar en el interior, es por medio de una distribución de cuatro tubos en forma de T (f) lo que permitirá mantener el flujo ascensional. Por la parte de abajo, cuenta con una tubería de PVC para la purga de los lodos anaeróbicos una vez que se haya cumplido el tiempo de retención, el cual se considera como un bioabono sólido. En su interior cuenta con un serpentín de acero inoxidable (g) por donde pasará fluido (agua) y que servirá como medio de calentamiento o enfriamiento dependiendo de la temperatura externa que puede afectar a la temperatura interna del digestor, la cual debe mantenerse a 35°C para lograr la correcta degradación de la materia orgánica. En la parte externa cuenta con entradas para sensores (h), en este caso de pH y temperatura que deberá estar monitoreándose en todo momento. La parte de arriba del tanque es en forma de domo, cuenta con una entrada para un sensor de presión (i), un separador de agua y biogás (j) así como salida del sobrenadante (k) y salida del biogás (l) acumulado que se encuentra direccionado a un pequeño quemador de biogás (m) el cual es encendido automáticamente mediante un pequeño panel fotovoltaico (n).

El control de la temperatura interna se basa en un subsistema de calentamiento que se compone por un colector solar tipo CPC “Colector Parabólico Compuesto” (ñ) por el cual fluirá el agua caliente misma que será calentada por los rayos solares captados durante el día y que se encuentra conectado al serpentín interno de acero inoxidable del digestor; un tanque de almacenamiento de agua caliente (o) en la parte de arriba que sirve para almacenar la energía térmica absorbida en el fluido para utilizarse cuando se requiera de acuerdo a la demanda, tiene una capacidad de 160 litros y cuenta con aislante térmico para reducir las pérdidas de energía al ambiente. Las conexiones están posicionadas en la parte inferior, tanto la salida de agua fría como la entrada del agua caliente que se interconectan al colector y por último cuenta con un calentador auxiliar “boiler” (p) que será utilizado cuando no se alcance la temperatura deseada, es decir, se colocó como respaldo para cuando la energía almacenada en el tanque de almacenamiento no satisfaga el nivel de temperatura requerido por el digestor. El boiler auxiliar se encarga de suministrar la energía faltante para lograr la temperatura requerida. Este equipo funciona con gas LP y biogás, de esta manera se logra satisfacer la demanda energética con fuentes renovables. El equipo está interconectado con el tanque de almacenamiento en serie (agua caliente) para aprovechar al máximo la energía almacenada de la fuente solar, de esta forma el boiler solo funcionará cuando la energía solar no logre satisfacer la calidad de la energía. Para re-direccionar los flujos de agua caliente y agua fría automáticamente se hace uso de un sistema de control, el cual pone a funcionar una bomba hidráulica, esta bomba se utiliza para proporcionar la circulación del agua caliente que va a suministrarse en el digestor y que después retornará al colector para volverla a calentar. La bomba cuenta con recirculación para poder manipular el flujo y controlar el nivel de temperatura de salida del agua del colector. También cuenta con válvulas selenoides encargadas de abrir y cerrar la bomba hidráulica, así como la válvula proporcional de 3 vías encargada de re-direccionar el flujo de agua caliente hacia el colector o torre de enfriamiento que opera en un rango de 0 a 90 grados para variar el flujo de agua y así tener un control óptimo de temperatura.

Tomando en cuenta que en Mexicali el clima es extremo, es decir, se cuenta con una temperatura menor a 5°C en invierno y mayor de 45°C en verano, para este último, si el fluido llegara a sobrecalentarse, el subsistema cuenta con una torre de enfriamiento (q) para equilibrar esos gradientes de temperatura, que como se mencionó anteriormente, cuando la sonda de temperatura marque arriba de 35 °C, la válvula proporcional de 3 vías automáticamente re-direccionará el flujo de agua caliente hacia la torre de enfriamiento para bajar la temperatura del fluido y mantenerlo en la temperatura deseada.

Por último, el tercer tanque “efluente” (c) de PVC tiene como función principal, la recepción del bioabono líquido o agua tratada la cual podrá ser utilizada como riego para las plantas o ser descargada directamente al drenaje sin problemas de contaminación.

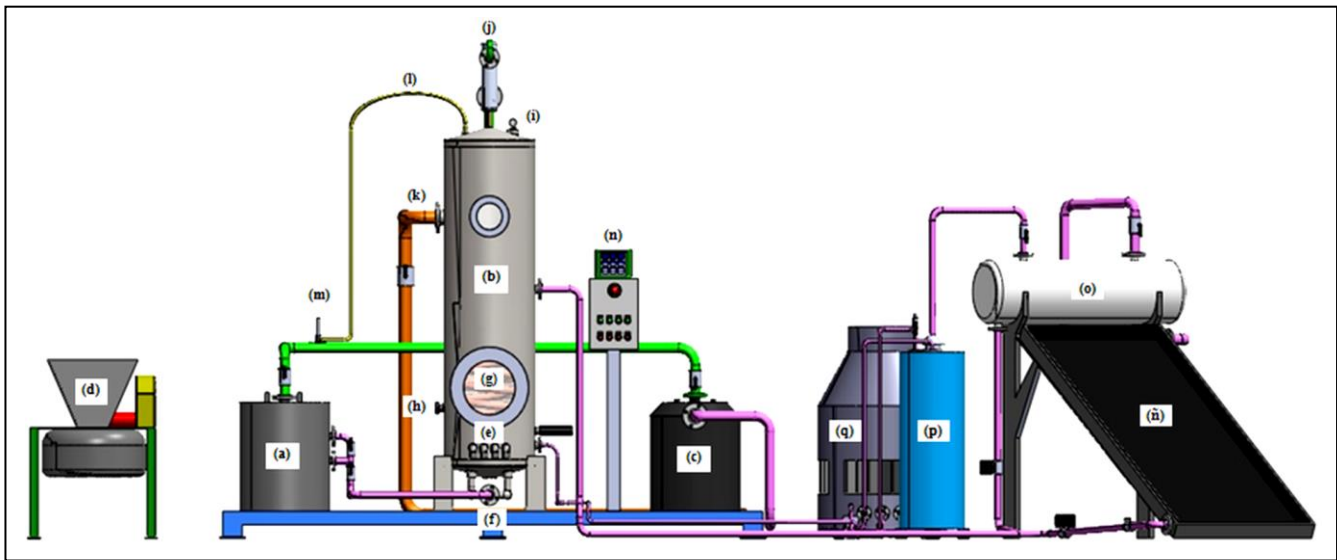


Fig. 1. Esquema del digester anaeróbico UASB a escala piloto.

B. Metodología de dimensionamiento

Existen varios factores importantes que deben considerarse cuando se habla de la viabilidad al diseñar un sistema de digestión anaeróbica para tratar los residuos de alimentos como son: el sustrato principal de entrada, es decir, el tipo de residuo; el índice de generación de residuos y las condiciones ambientales locales [4]. En la Fig. 2, se muestran todos los cálculos necesarios para llevar a cabo el dimensionamiento del digester anaeróbico UASB propuesto, el cual cuenta con una alimentación continua de residuos.

El primer paso importante en el proceso del diseño de un digester, es estimar la cantidad de residuo orgánico (CRO) disponible y a su vez caracterizarlo, por lo cual se debe definir la demanda química de oxígeno que contenga el residuo (DQOr) así como la demanda química de oxígeno que se desea tener en el sustrato (DQOs), para esta última variable se recomienda operar en un rango óptimo a 35 °C que varía del 5-15 kg DQO/m³ [7]. Uno de los parámetros más importantes en los sistemas de digestión anaeróbica es determinar la cantidad de agua (X_{H_2O}) que se añadirá al residuo para preparar el sustrato respetando la concentración previamente establecida que corresponde a la DQOs. Como ya se mencionó anteriormente, la alimentación del sustrato se va a realizar mediante un sistema de bombeo, por lo cual se debe determinar la densidad del residuo ($\rho_{residuo}$) y la densidad del agua (ρ_{agua}) de dilución para la preparación del sustrato, con estos datos se procederá a calcular el flujo volumétrico (Q) de alimentación. Una vez definida la concentración del sustrato, es necesario establecer la velocidad de carga orgánica (vCO) máxima a la que puede operar el sistema de tratamiento anaeróbico sin tener problemas de estabilización, lo cual suele llevarse a cabo en forma experimental a nivel planta piloto o a mayores escalas. La vCO es un parámetro operacional muy importante en tecnologías de tratamiento anaeróbico como los UASB, ya que sirve para definir el volumen mínimo lo cual le da mayor rentabilidad económica al sistema, por lo tanto, se debe respetar el siguiente rango de operación 3-24 kg

DQO/m³ día a 35 °C [7], en el caso de que se exceda el límite máximo de operación, puede haber problemas de sobre-alimentación, una rápida caída de pH, paro total del proceso de degradación y un remanente con una cantidad considerable de materia orgánica. Al conocer el Q de alimentación, la concentración del sustrato DQOs y la vCO se procede a calcular el volumen nominal (Vn) de tratamiento efectivo, el cual es ocupado por el manto de lodos y la biomasa activa.

Para el cálculo del volumen líquido (Vl) que corresponde al 70% del volumen total del tanque, tomando en cuenta que el resto es el espacio que se deja para la acumulación de biogás, se debe establecer el factor de efectividad (E) que corresponde a una proporción del volumen efectivo de trabajo en la degradación de la materia orgánica y que va en un rango de 0.8-0.9 para digestores UASB [7], conociendo el Vl, se procede a calcular el volumen total del tanque (Vt) y el TRH que este último depende del tiempo total que tardará en salir el efluente tratado y el flujo de alimentación.

Antes de realizar los cálculos correspondientes para determinar la altura total del tanque (Htb) se debe establecer la velocidad de flujo ascensional (v), esta variable juega un papel muy importante en su correcta operación, ya que es la que permite mantener el lecho fluidizado y proporciona una mayor superficie de contacto de la materia orgánica con los microorganismos anaeróbicos presentes. El rango de operación recomendado por bibliografía es de 0.5 – 1.25 m/h [7], sin embargo, cuando se cuenta con una velocidad de flujo ascensional menor al rango recomendado debe ser corregido con recirculación del efluente, dado que si no se incrementa dicha velocidad ascensional, se pueden presentar problemas de sedimentación y si sobrepasa el límite superior podría haber salida de microorganismos anaeróbicos en el efluente. Otra variable que debe definirse es el factor de recolección de gas (Fg) con un valor de 0.3 ya que toma en cuenta el volumen líquido ocupado por el sustrato, recordando que el resto sirve como almacenamiento para el biogás acumulado.

Las restricciones recomendadas para calcular las dimensiones del tanque de mezclado donde se prepara el sustrato antes de ser alimentado al digestor, se basan en heurísticas basadas en las dimensiones del tanque, donde el volumen total del tanque de mezclado (Vtm) corresponde a la quinta parte del volumen total del digestor, con la finalidad de que el tanque de mezclado sea más pequeño, este dato puede variar dependiendo del tamaño del que se desee conservar y también se le agrega un 10 % para evitar derrames. En cuanto a la altura del tanque de mezclado, se utiliza un rango que varía entre 1.25-3 veces el diámetro para que ocupe menos espacio sin ser tan alto.

Para estimar la producción de biogás, metano y energía, se deben definir ciertos parámetros operacionales, los cuales consisten en valores experimentales para sistemas de tratamiento UASB como son: la fracción de DQO destruida (fDQO_{dest}) que varía en un rango de 0.75-0.8 (75-80%), factor de metano generado (FCH_{4gen}) con un valor de 0.40 m³/kg DQO a 35 °C, la fracción de concentración de metano (fC_{metano} = 0.6-0.7), densidad del metano (ρ_{metano}) que equivale a 0.6346 g/l a 35 °C y el contenido energético del metano (CE_{metano} = 50.1 kJ/g) [7].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. *Estudio comparativo de las tecnologías de digestión anaeróbica para la selección y diseño de la planta piloto*

Los criterios para el análisis comparativo y selección de la tecnología para la digestión anaeróbica de los residuos sólidos orgánicos, están basados en los factores operativos incluyendo la naturaleza de los residuos a tratar, la carga orgánica, rendimiento de producción de biogás, entre otros. La Tabla I, muestra una variedad de diseños de digestores anaeróbicos que fueron clasificados de acuerdo a su proceso evolutivo: de primera, segunda y tercera generación.

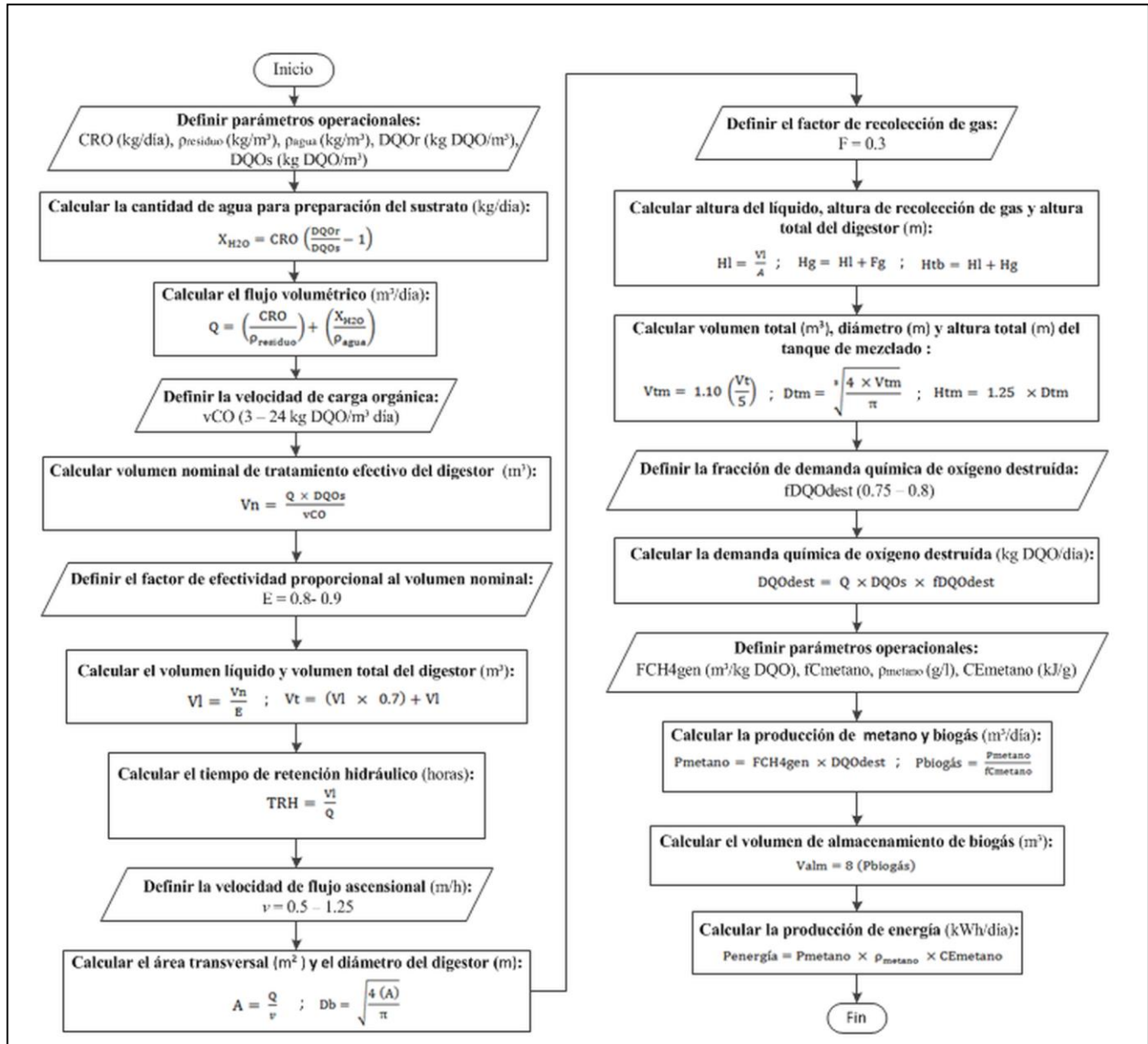


Fig. 2. Metodología de dimensionamiento del digestor UASB.

Buscando el diseño que se adapte a las diferentes cantidades y composición de los residuos sólidos orgánicos que se generan en el sector residencial y basándose en la tabla comparativa, se propone el digestor UASB a escala piloto.

Este modo de operación resulta de especial interés cuando se tiene alta generación de residuos sólidos orgánicos, las características principales en este modo de operación es que puede procesar altas cargas orgánicas, tiene tiempos de retención hidráulicos muy cortos y cuenta con una distribución uniforme de concentraciones, tanto del sustrato como de los microorganismos implicados en el proceso de digestión anaeróbica, entre otros.

Tabla 1. Estudio comparativo de digestores anaeróbicos clasificados por su proceso evolutivo

Proceso Evolutivo	Digestor Anaeróbico	Aplicaciones (tipo de residuo)	Carga Orgánica (kg/m ³ /día)	Características Principales	Referencias
Primera Generación	Laguna Anaeróbica Tanques Sépticos Modelo Hindú Modelo Chino Mezcla Completa sin Recirculación (CSTR) Mezcla Completa con Recirculación (Contacto anaeróbico)	Aguas residuales industriales (alimenticia, doméstica, agrícola, cervecera), residuos de frutas y vegetales.	2 - 8	Debido a su baja capacidad de procesamiento de residuos, la producción de biogás también es baja, maneja altos tiempos de retención hidráulicos, se consideran biodigestores de fácil manejo y bajo costo. Su mantenimiento es poco frecuente, cuentan con una buena descomposición de la materia suspendida y su alimentación es por lotes/batch, es decir, operan en régimen discontinuo.	[7], [8]
Segunda Generación	Filtro Anaeróbico Circulación Interna Manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) Híbrido (UASB + Filtro anaeróbico) Flujo de pistón horizontal Geomembrana	Residuos sólidos orgánicos domiciliarios, agropecuarios, industriales y municipales, aguas residuales (alimenticia, agrícola y doméstica).	10 - 35	Operan en régimen continuo, es decir, su alimentación al biodigestor es constante, no requiere de agitadores externos ya la agitación se da de forma natural al momento de ser alimentado por la parte de abajo, cuenta con una buena retención de los microorganismos.	[9]
Tercera Generación	Manto de lodos Fluidizado Manto de lodos Granular Expandido (EGSB)	Residuos sólidos municipales, aguas residuales (mataderos, alimenticias).	15 - 43	Son biodigestores de alta eficiencia por la gran capacidad de procesar los residuos a altas cargas orgánicas, por lo tanto se obtiene una mayor producción de biogás, cuenta con tiempo muy cortos de retención hidráulica.	[10], [11]

B. Comportamiento de las principales variables de diseño y operación para un digestor tipo UASB

Al diseñar un reactor anaeróbico UASB que cuente con la flexibilidad para adaptarse a la cantidad y composición de los residuos orgánicos a tratar, es necesario hacer un análisis de la influencia que tiene el comportamiento operativo del digestor en las dimensiones del mismo, buscando no violar ninguna de las restricciones que demandan una correcta operación del sistema propuesto. Los cálculos se realizaron bajo la plataforma *Engineering Equation Solver* (EES).

En la Fig. 3 (a) se observa que al incrementar la CRO aumentan las dimensiones del digestor: D_b , V_t y área transversal (A); de igual forma se demanda un mayor Q . La altura del tanque y el TRH se mantienen constantes, ya que estas dos variables dependen directamente de la demanda química de oxígeno del sustrato ($DQOs = 3.5 \text{ kg DQO/m}^3$), la velocidad de carga orgánica ($vCO = 13.7 \text{ kg DQO/m}^3$) y la velocidad de flujo ascensional ($v = 0.3 \text{ m/h}$). El V_n y V_l aumentan a la misma razón que se incrementa el V_t , tal y como se observa en la Fig. 3 (b). Una vez que se calcularon las dimensiones del tanque, en la Fig. 3 (a) se observa que se puede procesar una CRO que permite adaptarse a una variación en la generación de residuos orgánicos en un rango de 8.2 a 60 kg/día. En el caso de contar con una cantidad de residuos orgánicos menor a la del punto de diseño, se recomienda hacer uso de la recirculación del efluente para mantener una velocidad de flujo ascensional (v) en el rango de 0.5 a 1.25 m/h [7], con lo cual se logra mantener en suspensión los microorganismos anaeróbicos, haciendo más efectivo el contacto con la materia orgánica presente en el sustrato. Al hacer uso de la recirculación del efluente, se incrementa la población bacteriana, se tiene un mayor TRH y como consecuencia se logra un mayor agotamiento de la materia orgánica, teniendo un mejor funcionamiento cuando se tengan cantidades menores de residuos orgánicos a la del punto de diseño.

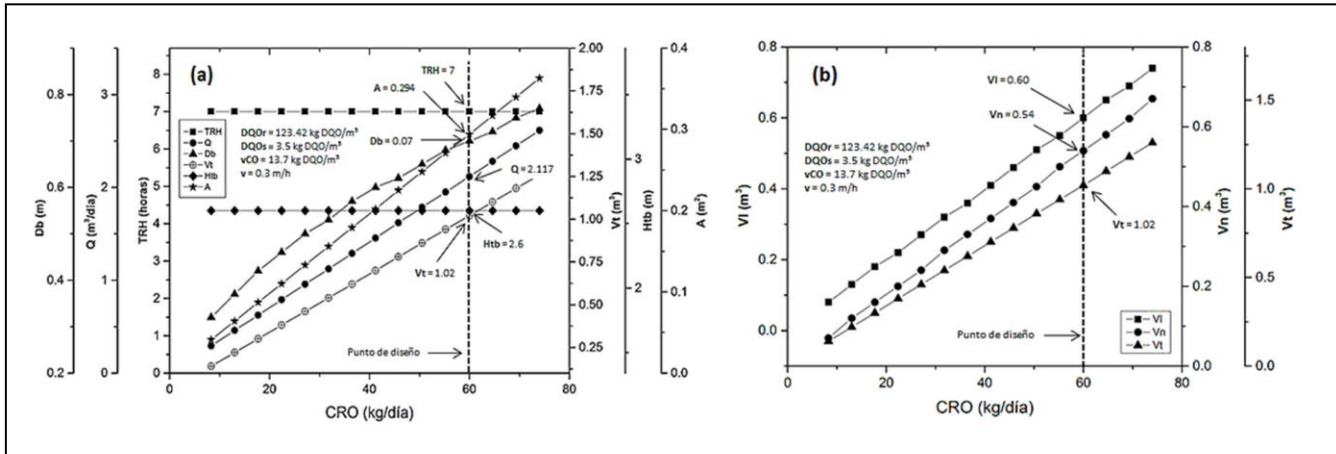


Fig. 3. Influencia de la cantidad de residuo orgánico sobre el comportamiento de las principales variables del sistema.

A parte de determinar la cantidad del residuo orgánico que se va a procesar, es muy importante conocer la concentración expresada en kg DQO/m³, ya que de ello dependen las dimensiones y operación del tanque. En la Fig. 4 (a y b) se muestran los puntos de diseño para diferentes concentraciones del residuo (DQOr), pudiéndose apreciar el nivel de influencia que se tiene en el dimensionamiento del tanque. También se puede observar que al incrementar la DQOr aumentan todas las variables de diseño, excepto la Htb y el TRH los cuales se mantienen constantes, ya que como se mencionó anteriormente en la Fig. 3 (a), estas dos variables dependen directamente de la DQOs, vCO y v. Para subsanar la variabilidad de la concentración del residuo, en la Figura 9 (a) se observa que la máxima DQOr permisible es de 123.42 kg DQO/m³ y cuando se tengan menores concentraciones se optará por hacer uso de la recirculación del efluente para compensar el descenso de Q, lo cual favorece la operación ya que aumenta el TRH y a su vez el agotamiento del sustrato. El límite inferior de operación de DQOr (6.1 kg DQO/m³).

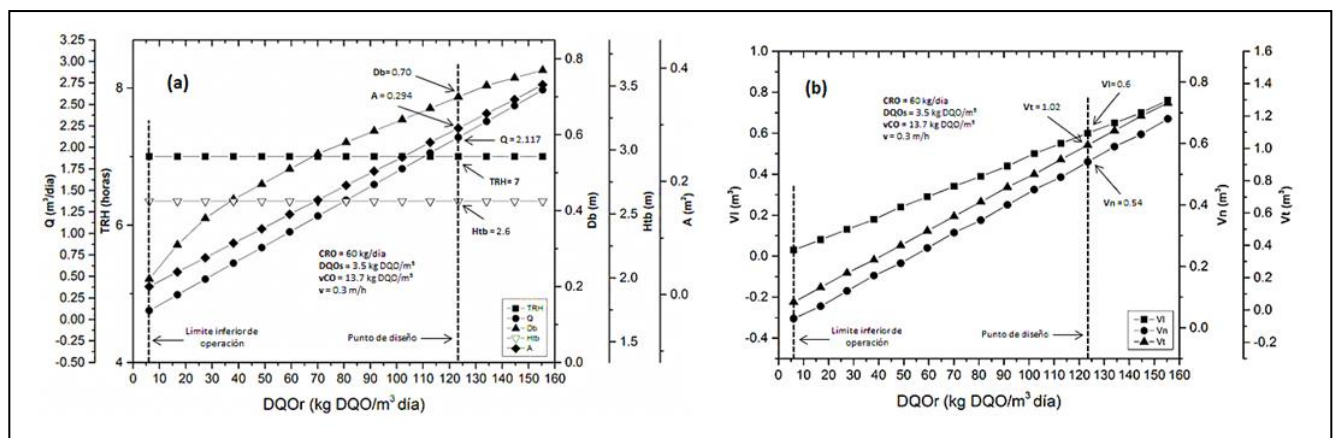


Fig. 4. Influencia de la concentración del residuo orgánico sobre el diseño y operación del sistema.

Acorde a lo planteado anteriormente, resulta de especial interés la variación de la producción de biogás conforme cambian las características del residuo orgánico recolectado. Es por eso que en la Fig. 5 (a y b) se muestra la producción de biogás estimada conforme varía la cantidad y concentración del residuo orgánico.

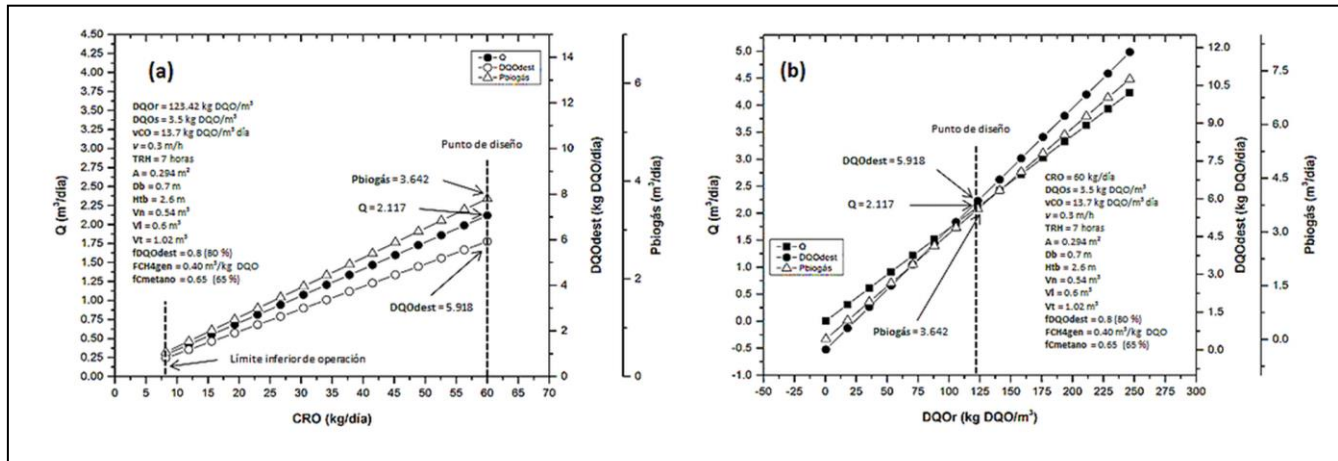


Fig. 5. Influencia del cantidad y concentración del residuo orgánico sobre el comportamiento de la producción de biogás estimada.

La Tabla II muestra el resumen de los resultados de diseño y operación de la tecnología propuesta. Un punto importante a resaltar es el rango de variabilidad que tiene la CRO, con un TRH de 7 horas y para lograr ese corto tiempo de retención, es necesario que se invierta en un pre-tratamiento más riguroso el cual consiste en un pre-tratamiento mecánico y térmico con la finalidad de desintegrar lo más posible los residuos sólidos orgánicos, aunque este proceso de pre-tratamiento es más costoso, se compensa porque se puede procesar una mayor cantidad residuos en un menor tiempo de retención hidráulico con un incremento en la producción de biogás.

El sistema de tratamiento anaeróbico a escala piloto se muestra en la Fig. 6 y fue construido siguiendo las especificaciones obtenidas anteriormente y que se resumen en la Tabla II. Con la construcción de la planta piloto, se validarán los resultados obtenidos y se obtendrán los parámetros experimentales utilizados en la metodología específicamente para el tipo de residuo en cuestión. Los resultados experimentales se reportarán en un siguiente artículo.

C. Ventajas del digestor anaeróbico propuesto con respecto al desarrollo de digestores UASB en América Latina

En América Latina se han realizado diversos estudios acerca del tratamiento anaeróbico de aguas residuales con alto contenido en materia orgánica utilizando este tipo de digestores (UASB), mostrando los beneficios adquiridos con el uso de esta tecnología, por ejemplo, en Colombia es altamente utilizado para tratar las aguas residuales de la industria lechera [13], en Cuba y Chile se ha trabajado en el tratamiento anaerobio de vinazas provenientes de las aguas residuales de melazas a escala piloto [14,15], por otro lado, en México se ha estudiado el comportamiento de un sistema de digestión anaerobia en dos fases; hidrólisis en un reactor mesofílico y metanogénesis en un reactor termofílico, para una mezcla de dos clases de lodo: lodo del tratamiento primario y lodo secundario como una opción para la

estabilización de la materia orgánica y reducción de microorganismos patógenos en reactores alimentados con flujo ascendente [16].

El digester propuesto en este trabajo tiene como ventaja principal subsanar la variabilidad que presentan los residuos de comida específicamente en el sector residencial, ya que varían constantemente de un día a otro tanto en cantidad como en concentración.

El estudio paramétrico realizado con las dimensiones finales del tanque fue de gran utilidad ya que se plantearon diversos escenarios con sus respectivas recomendaciones, por ejemplo, en caso de que la cantidad de residuos disminuya de un día a otro al igual que su concentración respecto al rango requerido en la Tabla II, se recomienda hacer uso de la recirculación del efluente, primeramente para evitar paros en el proceso de tratamiento, con ello se logra incrementar el TRH sin tener que modificar las dimensiones del tanque ni el volumen nominal y líquido del sustrato obteniendo un mayor agotamiento de la materia orgánica, incrementando la población bacteriana y sobre todo manteniendo la velocidad de flujo ascensional requerida para mantener el lecho fluidizado.

Además de que a diferencia de otros digestores el control de temperatura interno se realiza mediante un sistema de calentamiento solar lo que le da un mayor valor agregado porque lo que se busca es disminuir el uso de energías fósiles. Otro punto muy importante es que con esta investigación, se suma conocimiento para el tipo de residuo en cuestión, ya que como se mencionó anteriormente, los estudios acerca del tratamiento anaeróbico de los residuos de alimentos no se han extendido en Mexicali, B.C., México.

Tabla 2. Resumen del diseño y operación del digester anaeróbico UASB

Digester Anaeróbico UASB	
<i>Variables de diseño</i>	<i>Variables operativas</i>
<p>Db = 0.7 m Htb = 2.6 m Vt = 1.02 m³ Vl = 0.6 m³ Vn = 0.54 m³ A = 0.294 m²</p>	<p>CRO = 8.2 - 60 kg/día TRH = 7 horas DQOr = 6.1 - 123.42 kg DQO/m³ DQOs = 3.5 kg DQO/m³ DQOdest = 5.918 kg DQO/día vCO = 13.7 kg DQO/m³ día Q = 2.117 m³/día v = 0.3 m/h fDQOdest = 0.8 (80%) fCmetano = 0.65 (65%) FCH4gen = 0.4 m³/kg DQO Pmetano = 2.637 m³/día Pbiogás = 3.642 m³/día</p>



Fig. 6. Digestor anaeróbico UASB a escala piloto acoplado a un subsistema de calentamiento solar y a una torre de enfriamiento.

IV. CONCLUSIONES

El sistema anaeróbico diseñado y construido tiene la flexibilidad para adaptarse a la variación de los residuos (cantidad y concentración), cumpliendo con las normas ambientales y obteniendo la máxima producción de biogás. Cuando el digestor propuesto trabaje por debajo de las condiciones límite en cantidad y concentración del residuo sólido orgánico, el nivel de agotamiento del sustrato será mayor del requerido por las normas ambientales. El desarrollo de digestores anaeróbicos con flexibilidad para adaptarse a la variación de los residuos puede provocar un mayor aprovechamiento de los mismos e incrementar la potencialidad energética de este recurso renovable.

RECONOCIMIENTOS

Los autores extienden su agradecimiento a CONACYT por su apoyo a través del proyecto con clave CB-2011-01-167794 y la beca otorgada para los estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- [1] INEGI (2010) *Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 284 Indicadores Principales del Banco de Información INEGI*. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=02> (Accesado: 17 Junio 2014).
- [2] Taboada, P., Aguilar, Q. and Ojeda, S. (2011). 'Análisis estadístico de residuos sólidos domésticos en un municipio fronterizo de México'. *Avances en ciencias e ingeniería*. 2(1). pp. 9-20.
- [3] Mata, J., Macé, S. and Llabrés, P. (2000). 'Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives'. *Bioresource technology*. 74. pp. 3-16.

- [4] Hilkih, A., Ayotamuno, M., Eze, C., Ogaji, S. and Probert, S. (2008). 'Designs of anaerobic digester for producing biogas from municipal solid waste'. *Applied Energy*. 85. pp. 430-438.
- [5] Curry, M. and Pillay, P. (2012). 'Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment'. *Renewable Energy*. 41. pp. 200-209.
- [6] Rico, C., Rico, J., Tejero, I., Muñoz, N. and Gómez, B. (2011). 'Anaerobic digestion of the liquid fraction of dairy manure in pilot plant for biogas production: Residual methane yield of digestate'. *Waste Management*. 31. pp. 2167-2173.
- [7] Metcalf & Eddy. (2004) *Wastewater engineering, treatment and reuse*. 4th edn. Mc Graw Hill.
- [8] Radjaram, B. and Saravanane, R. (2011). 'Start up study of UASB reactor treating press mud for biohydrogen production'. *Biomass and Bioenergy*. 35. pp. 2721-2728.
- [9] Lim, J. and Wang, J. (2013). 'Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste'. *Waste Management*. 33. pp. 813-819.
- [10] Ojeda, S. (2005). 'Generación de residuos sólidos domésticos y su diferenciación por estrato socioeconómico en la familia mexicana'. En Mérida, Yucatán: *AIDIS / DIRSA*, pp. 1-10.
- [11] INE-SEMARNAP (1997) *Instituto Nacional de Ecología SEMARNAP. Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México*, 1era edn., México. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=128> (Accesado: 02 Marzo 2014)
- [12] Lettinga, G., Van Velsen, A., Hobma S., Zeeuw, W. and Klapwijk A. (1980). 'Use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment'. *Biotechnology and Bioengineering*. 22 (4). pp. 699 – 734.
- [13] Arroyave, D., González, M. and Gallego D. (2008). 'Evaluación de un reactor UASB utilizado en una industria lechera'. *Ingeniería Química*. 460. pp. 140-147.
- [14] Ramos, J., Obaya, M. and Valdés, E. (1992). 'Selección de una microflora acidogénica para un proceso difásico de digestión anaerobia'. *Rev. ICIDCA*, XXVI (2).
- [15] Chamy, R., Pizarro, C., Vivanco, E., Schiappacasse, M.C., Jeison, D., Poirrier, P. and Ruiz-Filippi, G. (2007) 'Selected experiences in Chile for the application of UASB technology for vinasse treatment'. *Water Science & Technology*. 56 (2). pp 39–48.
- [16] Terreros, J., Olmos, A., Noyola, A., Ramírez-, F. and Monroy, O. (2009). 'Digestión anaerobia de lodo primario y secundario en dos reactores UASB en serie'. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 8 (2). Pp 153-161.