



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Evaluación técnico económica de generación de biogás por digestión anaerobia a partir de residuos sólidos orgánicos generados en una industria restaurantera

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta el

IBT. Edgar Daniel Alanis Silva

Director de Tesis:

Dr. José Apolinar Cortes

Codirectora:

Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga

Morelia, Michoacán, Septiembre del 2017

RESUMEN

El manejo de los residuos es una problemática que ha acompañado a la humanidad desde el surgimiento de la revolución industrial, en general el estudio del manejo de los residuos industriales peligrosos ha tenido un gran auge debido a los peligros ambientales que estos conllevan, sin embargo los residuos sólidos urbanos (RSU), aquellos generados en las actividades cotidianas humanas, se han ido dejando de lado; por lo que este estudio busca la implementación de la anaerobiosis para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU (FORSU)

El tratamiento de los residuos comenzó con su pulverización en medio líquido con la finalidad de obtener una suspensión de los residuos a partir de la cual se realizaron los estudios de caracterización. Entre los resultados a destacar se encontró una concentración promedio de materia orgánica de 132000 mg/L, lo cual indica el gran potencial de dichos residuos para la generación de biogás a partir de ellos.

El tratamiento de los residuos se llevó a cabo dentro de un reactor anaerobio tipo UASB modificado, el cual fue alimentado con una suspensión a base de la FORSU previamente molida y diluida, la cual se mantuvo entre los 15000-30000 mg DQO/L. El reactor fue operado a temperatura ambiente, la cual se situó entre los 16-25°C durante los 161 días de su operación, obteniendo una producción máxima diaria de 16 litros de biogás una vez estabilizado el pH del proceso y la temperatura superara los 20°C.

El biogás obtenido presento una composición del 50% CH₄, 49% CO₂, 1% de H₂S. Tras el proceso de limpieza del biogás en un reactor de burbujeo con una solución saturada de Ca(OH)₂ se logró obtener un gas con una composición del 98% de CH₄, con lo cual el biogás puede ser utilizado como un sustituto de gas L.P.

Finalmente, los costos de producción del biogás tratado y listo para su implementación como sustituto de gas L.P. presento un precio de \$3.91 M.N. por litro de gas en comparación con el precio del gas L.P. en la ciudad de Morelia el cual es de \$8.79 M.N.

PALABRAS CLAVE: Anaerobiosis, Residuos Orgánicos, Biogás, Residuos Solidos Urbanos.

Abstract

The management of solid waste has been a problem that has accompanied the humanity since the beginning of the industrial revolution, in general the study of the management of the dangerous industrial waste has been a great rise in the late years due the environmental hazardness that they carry, however the municipal solid waste (MSW), those generated in the everyday human activities, have been left aside; so that this work search the application of the anaerobic digestion of the organic fraction of the municipal solid waste (OFMSW).

The treatment of the organic waste begins whit the pulverization in liquid medium whit the purpose of obtained a suspension of the organic waste to witch will be made the characterization of the waste. Among the results to highlight it was found a COD of 132 mg/L, which is an indicative of the potential of such waste for the generation of biogas.

The treatment was carried out in a modified UASB anaerobic reactor, which waste feed with a suspension of bases in the OFMSW previously milled and diluted this dilution was fixed between 15000-30000 mg COD/L. the reactor was operated for 161 days at room temperature, between 16-25 °C, obtaining a maximum production of 16 liters of biogas per day once the pH was stabilized and the temperature surpass the 20°C.

The obtained biogas presented a composition of 50% CH₄, 49% CO₂, 1% de H₂S after the scrubbing process of the biogas in the bubble column reactor with a solution of Ca(OH)₂ the biogas presents a composition of 98% of CH₄ with which it can be used as substitute of liquefied petroleum gas (LPG).

Finally the cost of production of the cleaned biogas presents a price of \$0.22 USD per liter in compared with the price of \$0.5 USD per liter of LPG in the city of Morelia.

Dedicatoria

A mis padres por el regalo de la vida y el apoyo incondicional brindado a lo largo del camino de la vida y cuyo esfuerzo se hace presente en cada logro de mi vida.

Hermanos quienes a pesar de los momentos dulces y amargos que hemos vivido siempre han sido un apoyo para enfrentar los retos que nos presenta la vida.

A los compañeros y amigos que me acompañaron a lo largo de este camino quienes transformaron las arduas horas de trabajo en momentos amenos y agradables.

Índice

Capítulo I Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
Capítulo II Marco Teórico	4
2.1 Residuos sólidos urbanos	5
2.1.1 Legislación mexicana sobre los residuos sólidos urbanos.....	6
2.1.2 Fracción orgánica de los residuos sólidos	7
2.2 Anaerobiosis	7
2.2.1 Bases de los procesos anaerobios	8
2.2.2 Parámetros de operación.....	10
2.3 Reactores anaerobio tipo UASB	14
2.3.1 Ventajas y desventajas de reactores UASB	17
2.3.2 Producción de biogás	18
2.4 Tratamiento del biogás.....	19
2.5 Antecedentes	25
2.6 Justificación	29
2.7 Pregunta de investigación	29
2.8 Hipótesis	29
2.9 Objetivo general.....	30
2.10 Objetivos específicos	30
Capítulo III Metodología	29
3.1 Recolección y caracterización de residuos	30
3.2 Diseño y construcción de reactores	30
3.3 Puesta en marcha del reactor UASB	31
3.3.1 Preparación del Inóculo	31
3.3.2 Alimentación de los residuos alimenticios al reactor UASB modificado.....	32
3.4 Operación del reactor UASB modificado.....	32
3.4.1 Carga orgánica	32
3.4.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH)	32

3.4.3 Monitoreo de operación del reactor	33
3.4.4 Medición del volumen de biogás generado.....	33
3.4.5 Composición del biogás.....	33
3.5 Técnicas y equipos implementados	34
Capítulo IV Resultados y discusión de resultados.....	35
4.1 Caracterización de los residuos orgánicos.....	36
4.1.1 Recolección de muestra	36
4.1.2 Trituración de los residuos orgánicos	36
4.1.3 Caracterización de los residuos orgánicos	37
4.2 Diseño y construcción de reactores	38
4.2.1 Construcción del reactor anaerobio UASB modificado	38
4.2.2 Construcción del reactor de burbujeo	39
4.3 Puesta en marcha del reactor UASB modificado	40
4.3.1 Preparación del inóculo	40
4.3.2 Inoculación y operación del reactor	41
4.3.3 pH	42
4.3.4 Conductividad	43
4.3.5 Temperatura	44
4.3.6 DQO.....	45
4.3.7 Producción de biogás	46
4.3.8 Evaluación de costos de producción.....	47
Capítulo V Conclusiones	48
5.1 Conclusiones.....	49
Recomendaciones.....	50
Bibliografía	52
Anexo	56
Anexo I Manual de operación del reactor anaerobio UASB modificado alimentado con residuos orgánicos	57
Anexo II Evaluación del comportamiento del pH posterior a la alimentación del reactor UASB modificado.....	59

Anexo III Determinación de la cantidad de hidróxido de calcio para la neutralización del pH del sustrato	60
--	----

Índice de Tablas

Tabla 1 Ventajas y desventajas de reactores UASB	17
Tabla 2 Composición típica del biogás y del gas natural, adaptado de (Yang, et al., 2014).....	19
Tabla 3 Fuente posible e impacto negativo de las impurezas, adaptado de (Yang, et al., 2014).....	20
Tabla 4 Ventajas y desventajas técnicas de los métodos de purificación de biogás (Yang, et al., 2014).....	24
Tabla 5 Métodos y técnicas utilizadas	34
Tabla 6 Caracterización de residuos orgánicos.....	37
Tabla 7 Cálculos de la producción estimada al tratar la totalidad de los residuos generados semanalmente, así como una comparación de costos de la cantidad de gas L.P. utilizados en la actualidad.....	47
Tabla 8 Costos considerados en el cálculo de precio del biogás tratado.	48
Tabla 9 Cálculo de costos de producción de biogás en M.N.....	48

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Transformación de la materia orgánica en procesos anaerobios.....	9
Ilustración 2 Diagrama de la anaerobiosis.	10
Ilustración 3 Diagrama general de un reactor UASB.....	15
Ilustración 4 Diseño reactor UASB modificado.....	31
Ilustración 5 Recolección de residuos sólidos.	36
Ilustración 6 Suspensión de residuos orgánicos.	37
Ilustración 7 Reactor anaerobio modificado.	39
Ilustración 8 Reactor de burbujeo.....	40

Abreviaturas

RSU: Residuos sólidos urbanos.

FORSU: Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

CO₂: Dióxido de carbono.

CH₄: Metano.

H₂S: Sulfuro de hidrógeno.

DQO: Demanda química de oxígeno.

AGV's: Ácidos grasos volátiles.

SV: Sólidos volátiles.

ST: Sólidos totales.

C/N: Relación carbono-nitrógeno.

NH₄⁺: Amonio.

pH: Potencial de hidrógeno.

LGPGIR: Ley general para la prevención y control integral de los residuos.

RME: Residuos de manejo especial.

RP: Residuos peligrosos.

AGCL: Ácidos grasos de cadena larga.

HS⁻: Hidrógenosulfuro.

S⁼: Sulfuro.

PSA: Adsorción por cambio de presión.

NH₃: Amoníaco.

Ca(OH)₂: Hidróxido de calcio o cal apagada.

NaOH: Hidróxido de sodio.

PVC: Del inglés: *Polyvinyl Chloride*, Policloruro de vinilo.

CPVC: Del inglés: Chlorinated Polyvinyl Chloride, Cloruro de policloruro de vinilo.

UASB: Del inglés: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, Reactor anaerobio de flujo ascendente.

O₂: Oxígeno.

N₂: Nitrógeno.

CO: Monóxido de carbono.

H₂: Hidrógeno.

H₂O: Agua.

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindar los espacios para el desarrollo de este proyecto.

Al programa de maestría en ciencias en ingeniería ambiental y al posgrado de la facultad de Ingeniería química y por la oportunidad y espacios brindados para el desarrollo de este proyecto.

Al Consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACyT) por la beca brindada.

Al Dr José Apolinar Cortés y a la Dra Ma. del Carmen Chávez Parga por la paciencia, confianza y apoyo brindado para la realización de este proyecto

A mis compañeros de laboratorio Claudia y Omar los cuales fueron un gran apoyo a lo largo de este proyecto.

A Diana y Carmen por el regalo de la amistad y apoyo brindado a lo largo de este nuevo reto.

Capítulo I

Introducción

1.1 Generalidades

La generación de residuos es un tema que ha acompañado a la humanidad desde sus comienzos, sin embargo, los residuos comenzaron a considerarse como un problema a partir de la revolución industrial, la cual es considerada como una etapa de transición tanto en los aspectos tanto sociales como económicos. El cambio de

mayor trascendencia fue la transición de una económica rural la cual se basaba en la agricultura a una economía de carácter urbano la cual por el contrario dependía de la industrialización y mecanización.

La revolución industrial trajo consigo cambios en la economía, condiciones higiénicas, sanitarias y alimenticias que tuvieron gran impacto en la reducción de la tasa de mortalidad, lo cual llevo a un incremento demográfico, que aunado a los desarrollos tecnológicos trajo a su vez un crecimiento acelerado de las urbes.

Un problema creciente a enfrentar en las ciudades es el manejo de los desechos generados debió a un inexistente programa para el manejo de los desechos. El manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) es un tema el cual en las últimas décadas ha tomado gran importancia, dada la variedad de los componentes presentes en dichos residuos (Castells, 2012).

La forma tradicional del manejo y la disposición final de los RSU es el llevarlos a rellenos sanitarios, sitio donde se espera que se dé la degradación de la fracción orgánica de los mismos (FORSU); sin embargo, esta degradación trae consigo una serie de desventajas ambientales, tales como la contaminación de mantos freáticos por generación de lixiviados, la generación de gases de efecto tóxicos e invernadero (H_2S , CH_4 y CO_2), y la proliferación de fauna nociva (Rios & Kaltschmitt, 2016). Por lo cual es necesario buscar una nueva forma de manejo de residuos que permita mitigar las desventajas ambientales pero que además genere la posibilidad de un aprovechamiento de los mismos.

Una propuesta que ha ido tomando auge en las últimas décadas es el proceso de separación de la FORSU y llevarla a un proceso de digestión anaerobia, con el cual se pretende lograr la generación de biogás y biosólidos. La recuperación de biogás permite ser utilizado como fuente de energía y los biosólidos como mejoradores de suelos.

Este trabajo explora la implementación de un proceso anaerobio para el tratamiento de la FORSU que se genera dentro de la industria restaurantera, con el fin de obtener metano con una concentración mayor al 95%.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1 Residuos sólidos urbanos

De acuerdo a la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos se denomina a los residuos sólidos urbanos (RSU) como aquellos generados en la casa habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes en las vías y lugares que no sean considerados como residuos de otra índole. Por lo cual se entiende que los RSU son los desperdicios generados en las actividades cotidianas de las personas. Sin embargo, para poder comprender de donde surge el creciente interés en procesos para un mejor manejo y control de los desechos es necesario comprender los efectos nocivos que conllevan un mal manejo de los desechos.

Factores como el desarrollo económico, la industrialización y la implantación de nuevos modelos económicos conlleva a un aumento significativo en el volumen y la composición de los residuos producidos por la sociedad. A su vez esto acarrea consecuencias ambientales negativas tanto para la salud de las personas como para los ambientes naturales, entre los que destacan:

- Generación de contaminantes y gases de efecto invernadero
- Adelgazamiento de la capa de ozono
- Contaminación de suelos y cuerpos de agua
- Proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades

Cada uno representa un nuevo reto a afrontar, de ahí que surja un interés creciente para lograr un mejor manejo y control de los desechos (Castells, 2012).

2.1.1 Legislación mexicana sobre los residuos sólidos urbanos

El país cuenta con una normatividad específica para tratar el tema de los residuos generados en su interior, existe una variedad de leyes las cuales se encargan de delegar las responsabilidades correspondientes, así como dar a conocer la normatividad necesaria para el control y manejo de los RSU.

La ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR) se encarga de establecer el manejo integral de los residuos, la delegación de responsabilidades en el tema de manejo de residuos, así como establecer un control de los procesos de manejo de los residuos.

Así mismo se encarga de clasificar a los residuos en tres grandes grupos: 1) los residuos sólidos urbanos (RSU), 2) residuos de manejo especial (RME), y 3) los residuos peligrosos (RP); de tal forma que esta ley define a los RSU como “aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que proviene de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta ley como residuos de otra índole”.

La composición de los RSU muestra variaciones dependiendo del país y el grado de desarrollo económico que dicho país presente, al ser los países con un desarrollo económico inferior los que presentan una menor generación de residuos sólidos, los cuales presentan una composición en su mayoría de origen orgánico, en contraparte los países que presentan un mayor desarrollo económico presentan una mayor producción de residuos sólidos con una menor conformación orgánica.

2.1.2 Fracción orgánica de los residuos sólidos

La Fracción orgánica de los residuos sólidos o FORSU por sus siglas, como su nombre lo indica, es aquel porcentaje orgánico presente en los RSU, del cual los principales representantes son los restos alimenticios, residuos de la poda de jardines, dicha fracción comúnmente. El destino común de gran mayoría de los RSU es su vertido y contención en sitios destinados denominados vertederos. Estudios desarrollados sobre análisis de ciclo de vida en vertederos concluyen que el mayor impacto ambiental de las emisiones proviene de la biodegradación de los residuos fermentables o FORSU.

Emisiones incontroladas de biogás producen malos olores, riesgo de explosiones y diversos efectos negativos sobre el medio ambiente. Se calcula de 1 m³ de biogás se produce a partir de 10 kg de materia fermentable (Castells, 2012).

2.2 Anaerobiosis

La digestión anaerobia se divide en procesos consecutivos para la degradación del sustrato: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis; los cuales se encuentran constituidas por cuatro etapas, a través de las cuales es posible obtener un gas combustible conocido como biogás. El biogás, contiene una alta proporción en metano (CH₄), en concentraciones superiores al 60%.

- Etapa hidrolítica: los compuestos orgánicos complejos, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono sufren un proceso de despolimerización, mediado por enzimas hidrolíticas, para transformarse en moléculas solubles y fácilmente degradables, como azúcares, aminoácidos, alcoholes, ácidos grasos de cadena larga, etc.
- Etapa acidogénica: los compuestos solubles obtenidos en la etapa anterior son convertidos en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), ácido acético, butírico, propiónico y valérico principalmente.

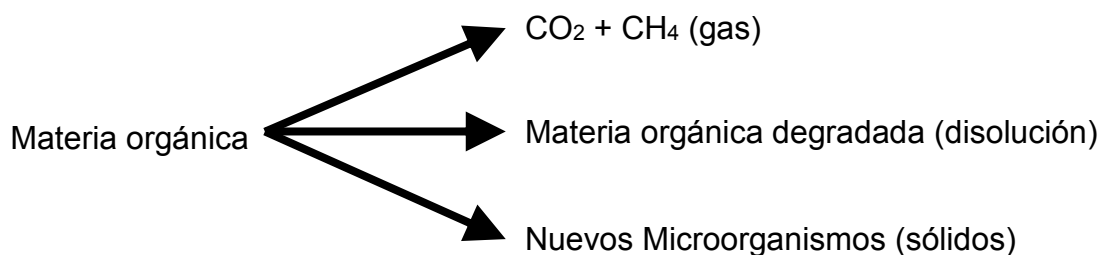
- Etapa acetogénica: los ácidos grasos de cadena corta con excepción del ácido acético, conocidos como compuestos intermedios, son transformados en por bacterias acetogénicas obteniendo como productos principales ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (CO₂).
- Etapa metanogénica: constituye la eta final del proceso, en la cual los compuestos como el ácido acético, hidrógeno y CO₂ son transformados en CH₄ y CO₂. Este proceso puede realizarse por dos vías distintas dependiendo del tipo de compuesto a utilizar, la metanogénesis acetoclástica, en la cual es ácido acético es aprovechado para la formación del CH₄, y la metanogénesis hidrogenofílica, la cual se basa en el aprovechamiento del hidrógeno como sustrato. La principal vía de formación de CH₄ es la metanogénesis acetoclástica, con alrededor del 70% de la producción del metano de forma general (Castells, 2012).

2.2.1 Bases de los procesos anaerobios

Para poder comprender de mejor forma la aplicación de los procesos anaerobios en la degradación de los FORSU es necesario comprender las bases de dicho proceso. Por lo cual este apartado explica las características y bases de los procesos anaerobios.

Mecanismos

El proceso de depuración anaerobia se basa de forma concreta en la transformación de la materia orgánica por acción de los microorganismos en: (1) biogás, (2) materia orgánica en disolución y (3) nuevos microorganismos (Fernández-Polanco & Seghezzeo, 2015).



De forma general las reacciones bioquímicas que tiene lugar en la degradación
Ilustración 1 Transformación de la materia orgánica en procesos anaerobios.

anaerobia pueden clasificarse en 4 fases.

Hidrólisis: etapa en la cual la materia orgánica compleja (carbohidratos, proteínas y lípidos) y es transformada en materia orgánica sencilla como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga (AGCL).

Acidogénesis: las bacterias acidificantes transforman la materia orgánica disuelta (azúcares y aminoácidos) en ácidos grasos volátiles (AGV) y una mezcla de CO_2 y H_2 .

Acetogénesis: etapa en la cual las moléculas pequeñas formadas en las tanto en la hidrólisis como en la acidogénesis, en especial los AGCL, son transformados en acetato y mezcla de CO_2 y H_2 .

Metanogénesis: la única etapa estrictamente anaeróbica en la cual las bacterias metanogénicas producen CH_4 partiendo del acetato o la mezcla de CO_2 y H_2 generados en la etapa anterior.

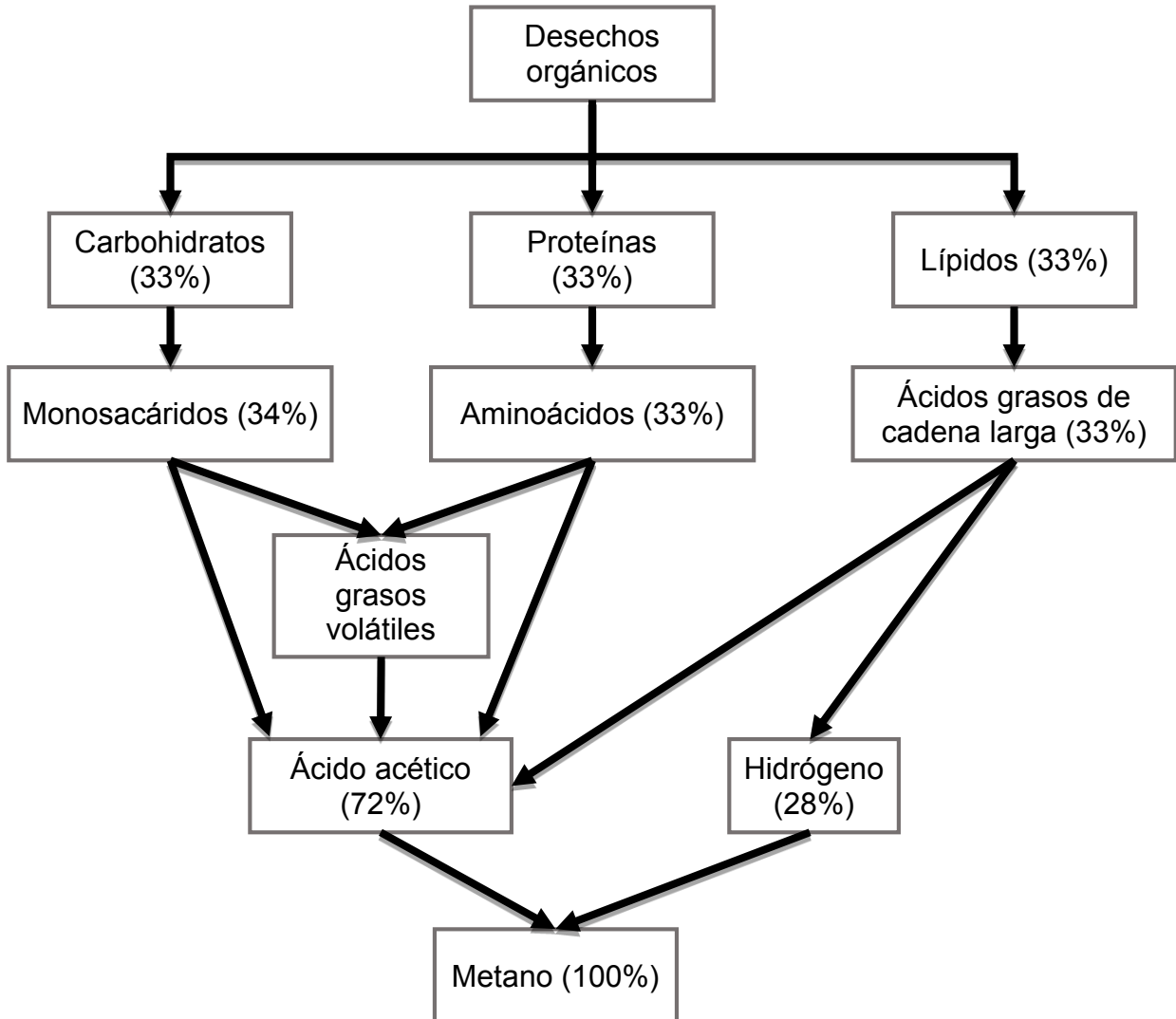


Ilustración 2 Diagrama de la anaerobiosis.

2.2.2 Parámetros de operación

En general a los sistemas anaerobios se le ha dado una “mala fama”, esto como consecuencia de la operación ineficiente de reactores, sin contar con las nociones básicas de conceptos y parámetros operativos determinantes para estos procesos. A continuación, se mencionan de forma breve las principales variables de diseño y operación, los cuales deben de tenerse en cuenta para tener una buena operación de los procesos anaerobios.

En general el rango óptimo para los procesos de digestión anaerobia está comprendido entre 6.8 y 7.5. (Li et al., 2017), aunque el proceso de digestión puede desarrollarse eficazmente en el intervalo 6.0-8.0, especialmente para reactores bien adaptados (Fernández-Polanco & Seghezzo, 2015). No existe una teoría concluyente para explicar la función del pH; éste se encuentra ligado a la concentración de AGV, potencial redox, presión parcial de hidrógeno y alcalinidad. Se considera un parámetro de control habitual por su facilidad de medición, aunque una variación en el valor de pH sólo sirve para certifica una situación no deseable.

Alcalinidad

La alcalinidad se define como la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos presentes en un agua y se expresa como la concentración de carbonato de calcio (mg CaCO₃/L). La alcalinidad se encuentra directamente relacionada con el pH y en conjunto con la concentración de AGV's es uno de los parámetros de control del reactor anaerobio (López Torres & Espinosa Llorens, 2008).

Para tener una capacidad buffer adecuada y asegurar una operación estable del reactor anaerobio se recomienda una concentración superior a los 1000 mg CaCO₃/L, con lo cual se asegura una excelente actividad buffer (Fernández-Polanco & Seghezzo, 2015).

Concentración de AGV's

Se le considera uno de los parámetros de control de reactores anaerobios, los ácidos que se consideran son fórmico, acético, propiónico, butírico y valérico. La acumulación de AGV's en el reactor es un indicador de desestabilización causada por un desacople en las cinéticas de las reacciones de producción y eliminación de AGV's. Los AGV actúan como inhibidores del proceso anaerobio. En un reactor maduro estable la concentración de AGV's es inferior a 500 mg AGV's/L, sin embargo, con un control adecuado de pH la inhibición puede retrasarse hasta los 5000 mg AGV's/L. niveles tan elevados no son recomendables pues la DQO del efluente es muy elevada, por lo cual es conveniente aumentar el tiempo de residencia y facilitar su degradación (Komemoto et al., 2009).

Temperatura

Se le considera un parámetro de operación vital, dado que se está implicado en los balances energéticos, el cual en última instancia puede posibilitar o impedir la implementación práctica de los procesos anaerobios. De acuerdo a la temperatura de operación los reactores se clasifican en:

- Psicrófilos $-5 < T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Mesófilos $8 < T < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Termófilos $40 < T < 70\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Hipertermófilos $65 < T < 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

La mayoría de las bacterias metanogénicas conocidas son mesófilas y tienen una temperatura óptima alrededor de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las termófilas tienen un óptimo de operación a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aunque la metanogénesis se produce a temperaturas próximas a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, no se han descrito bacterias metanogénicas psicrófilas (Latif, Ahmad, Ghufuran, & Wahid, 2012).

Toxicidad

Muchos de los compuestos tóxicos son estimulantes de la actividad biológica cuando se encuentran presentes en bajas concentraciones, el aumentar la concentración tiene como resultado la estimulación de la tasa biológica la cual alcanza un máximo al llegar a la concentración óptima, si este óptimo es superado el aumento en la concentración produce la inhibición de los procesos, por lo cual el tener un control de la concentración de dichas sustancias tóxicas o inhibitorias es de gran importancia; entre las sustancias de mayor importancia podemos encontrar a nutrientes como el nitrógeno, fósforo, y azufre; así como hierro, níquel, zinc, sodio, potasio y calcio entre otros (Fernández-Polanco & Seghezze, 2015).

De igual forma existe una serie de compuestos los cuales pueden ser inhibidores de los procesos anaerobios, entre dichas sustancias es importante el distinguir entre:

- Sustancias que se generan como productos intermediarios en las reacciones metabólicas (H_2 , AGV, H_2S).
- Sustancias que de forma accidental penetran en el reactor (O_2 , tóxicos varios)
- Sustancias que acompañan a la alimentación de forma regular.

Entre los principales compuestos tóxicos podemos encontrar a:

- AGV: la acumulación de AGV provoca una disminución del pH, trayendo consigo problemas de inhibición; así mismo la forma no disociada de los AGV se considera tóxica para los microorganismos. La forma disociada del ácido no puede permear a través de la membrana celular, mientras que la forma no disociada es capaz de permear la cual causa toxicidad al interior de los microorganismos. Por lo cual la acumulación de AGV presenta un efecto sinérgico con la disminución del pH y la toxicidad de los propios ácidos.
- H_2 : un elevado valor de hidrógeno, es capaz de provocar valores positivos en función de la energía libre de Gibbs ($G>0$), por lo cual se da un bloqueo en el proceso de reacción. De igual forma la disminución del pH supone un aumento en la concentración de protones lo cual favorece la formación de la forma no disociada de los AGV.
- Aceptores alternativos de electrones: la presencia de aceptores alternativos de electrones (nitratos, sulfatos) inhibe la metanogénesis en ecosistemas microbianos complejos, al desviar el flujo de electrones hacia microorganismos energéticamente más eficientes desde el punto de vista termodinámico.
- Oxígeno: La entrada de pequeñas cantidades de oxígeno acompañando a la alimentación en general no son considerados un problema, ya que los microorganismos que inician el proceso de degradación son facultativos, sin embargo, la entrada masiva de oxígeno conlleva a la pérdida de la condición de anaerobiosis, lo cual inhibe el proceso, es posible recuperar la condición anaerobia por *stripping* (burbujeo) o por la misma acción de los microorganismos.

- H_2S : es generado por las bacterias sulfato-reductoras a partir de sulfato contenido en la alimentación, tiene efectos inhibidores. El sulfato es reducido a sulfuro el cual se encuentra en la fase líquida como H_2S , HS^- o S^{2-} dependiendo del pH del sistema. De todas estas formas las cuales pueden presentarse en un reactor anaerobio, la forma H_2S en fase líquida es la que origina los problemas de toxicidad e inhibición para los microorganismos presentes en el medio.
- Amoníaco: el pH juega un papel clave en el equilibrio de disociación del amoníaco/amonio. La forma NH_3 causa severos problemas de toxicidad en los procesos anaerobios por lo cual es importante el desplazar la reacción hacia la derecha. Con bacterias bien aclimatadas es posible alcanzar niveles de 4 g NH_4^+ / L (pH=8).

2.3 Reactores anaerobio tipo UASB

El reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), se le considera la tecnología más ampliamente utilizada en tratamiento anaerobio de aguas residuales el sistema consiste de un solo tanque dentro del cual se lleva a cabo la retención de los sólidos; el concepto se basa en tres características principales (Fernández-Polanco & Seghezzo, 2015):

- Aprovechamiento de la capacidad de la biomasa para crecer agrupada, flóculos o incluso gránulo, con una buena velocidad de sedimentación, lo cual asegura su permanencia dentro del sistema, sin ser arrastrados con el efluente.
- La inclusión de un sistema de separación de las fases gaseosa-líquida-sólida; al interior del sistema el gas formado favorece la mezcla del líquido y los sólidos (biomasa), impidiendo la sedimentación de estos.
- La entrada del influente de manera uniforme en la base del reactor mediante un sistema de distribución que aplica flujos iguales por unidad de superficie de la base del reactor.

El éxito de los reactores UASB se basa en el establecimiento de un denso manto de lodos en la zona inferior del reactor, en el cual se llevan a cabo los procesos bacterianos que conllevan a la eliminación de la materia orgánica. Este manto es formado por la acumulación de sólidos suspendidos y bacterias. la mezcla requerida se consigue a partir del flujo del influente y el burbujeo ocasionado por la generación de biogás, con lo cual se logra asegurar un buen contacto entre el influente y la biomasa bacteriana (Palomares Rodríguez, 2013).

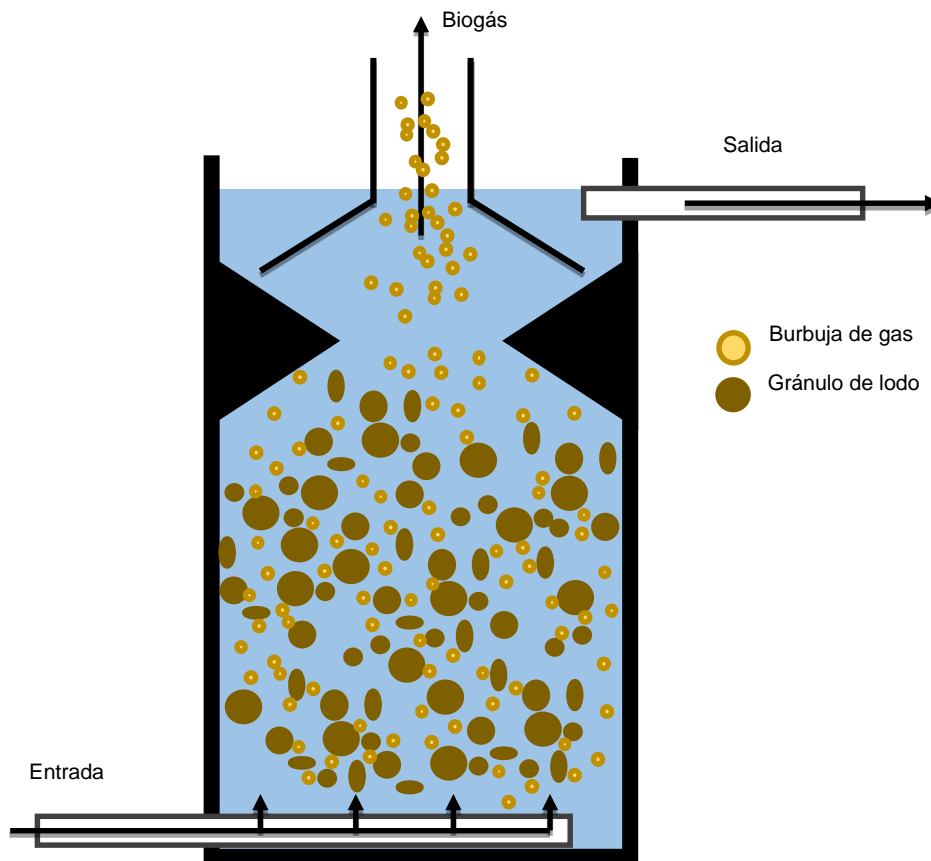


Ilustración 3 Diagrama general de un reactor UASB.

Capítulo II Marco Teórico

2.3.1 Ventajas y desventajas de reactores UASB

Tabla 1 Ventajas y desventajas de reactores UASB.

Ventajas	Desventajas
Remoción eficiente de materia orgánica	Baja remoción de patógenos y nutrientes
Simplicidad	
Bajos requerimientos de nutrientes	Largas puestas en marcha
Bajos requerimientos de espacio	Posibilidad de malos olores
Bajo consumo energético	Necesidad de post-tratamiento
Baja producción de lodos biológicos	

Entre las ventajas que ofrece los sistemas UASB podemos encontrar:

Es posible lograr buena remoción en influentes con cargas orgánicas elevadas como inclusive a bajas temperaturas; la simplicidad de los sistemas se basa en su construcción y operación, las cuales son relativamente simples; se le considera un sistema flexible dado la facilidad para aplicarlos en pequeña o gran escala; el área requerida para la instalación de un reactor anaerobio es baja, sobre todo al tomar en cuenta la posibilidad de tratar altas cargas orgánicas; es posible considerar un consumo energético despreciable, dado que se puede prescindir el calentamiento del influente para alcanzar temperaturas de operación y es posible el diseñar la operación del sistema por gravedad, mientras que por otra parte se cuenta con la producción de energía en forma de metano contenido en el biogás; en comparación con los sistemas aerobios, debido a la baja tasa de crecimiento que presentan los microorganismos anaerobios se tiene un baja producción de lodos; en procesos de tratamiento de aguas residuales comunes debido a las características que estas presentan es posible el prescindir la incorporación de nutrientes o el ajuste el pH

dado que por lo general el agua residual presenta los valores requeridos (Fernández-Polanco & Seghezzo, 2015).

Desventajas

La remoción de microorganismos patógenos es solamente parcial, con excepción de los huevos de helmintos, los cuales son capturados en el manto de lodos, de igual forma la remoción de nutrientes es parcial; como consecuencia de la baja tasa de crecimiento de los microorganismos anaerobios, la puesta en marcha de los reactores puede llevar un tiempo considerable, al compararlos con los sistemas aerobios; una característica de los procesos anaerobios es la formación de sulfuro de hidrógeno, gas corrosivo y mal oliente, sobre todo en influentes con una concentración elevada de sulfatos; la necesidad de procesos de post-tratamiento para lograr los estándares establecidos en general por las leyes ambientales (Fernández-Polanco & Seghezzo, 2015).

2.3.2 Producción de biogás

Como se mencionó con anterioridad una de las características principales de los sistemas anaerobios es la generación de una mezcla de gases conocida como biogás, los principales componentes de dicha mezcla son el CO_2 y el CH_4 , residuos provenientes del metabolismo bacteriano anaerobio, así mismo se cuenta con la presencia de gases traza como son el CO , H_2S entre otros, dentro de esta mezcla; de entre todos estos componentes el CH_4 es el componente que le brinda las cualidades combustibles al biogás (Curry & Pillay, 2012).

El metano es considerado el hidrocarburo más simple debido a su composición, la molécula de metano se encuentra conformada por un átomo de carbono unido a cuatro átomos de hidrógeno. Se le considera materia prima en la industria química para la elaboración de productos sintéticos, recientemente ha presentado resultados favorables como fuente de energía alterna a pequeña escala, a partir de biogás generado en la degradación de residuos orgánicos. Este biogás presenta una

composición aproximada del 55 a 70% de metano, 30 a 45% de dióxido de carbono y 1 a 3% de otros gases, y su poder calorífico oscila en las 5500 Kcal/m³.

2.4 Tratamiento del biogás

El biogás producido por la digestión anaerobia consiste principalmente de CH₄, dióxido de carbono CO₂. Tanto el sustrato utilizado los métodos de recolección y la tecnología utilizada para la digestión pueden afectar la composición del biogás, además de CH₄ y CO₂, el biogás producido puede contener pequeñas cantidades de NH₃, H₂S, H₂, O₂, N₂ y CO. Las propiedades típicas del biogás, así como del gas comercial se observan en la tabla 2 obtenida de (Sun, *et al.*, 2015).

Tabla 2 Composición típica del biogás y del gas natural, adaptado de (Yang, *et al.*, 2014).

Componente	unidad	Biogás DA	Biogás relleno sanitario	Gas natural
CH ₄	Vol %	53-70	30-65	81-89
CO ₂	Vol %	30-50	25-47	0.67-1
N ₂	Vol %	2-6	<1-17	0.28-1
O ₂	Vol %	0-5	<1-3	0
Hydrocarburos superiores	Vol %	NA	0-3	NA
H ₂	Vol %	NA	NA	3.5-9.4
H ₂ S	ppm	0-2000	30-500	0-2.9
NH ₃	ppm	<100	0-5	NA
Cloruros Totales	mg/N m3	<0.25	0.3-225	NA
Siloxano	Mg/g-seco	<0.08-0.5	<0.3-36	NA

Algunas de las impurezas como el H₂O y el CO₂ como ejemplo, las cuales son dañinas en los sistemas a utilizar para la obtención de energía, por lo cual para lograr un aumento en el valor calorífico y una reducción de los componentes no deseados es de gran importancia remover dichas impurezas del biogás y llevarlo a un mejor

estándar como combustible, dichas impurezas pueden provenir de diversas fuentes las cuales se resumen en la tabla 3 así como el impacto negativo que ocasionan. (Yang, et al., 2014)

El mejoramiento de biogás a biometano es una de las tecnologías que actualmente genera gran interés para la industria bioenergética. En Europa la capacidad total de biogás instalada para el año 2001 era menor a 10,000 Nm³/h aumentando para el año 2011 a 160,000 Nm³/h. adicionalmente (Yang, *et al.*, 2014) revisaron el progreso en la investigación y la aplicación industrial de la conversión del biogás en biometano.

Tabla 3 Fuente posible e impacto negativo de las impurezas, adaptado de (Yang, et al., 2014).

Impurezas	Fuente posible	Posible impacto
CO ₂	Hidrocarburos	Bajo valor calorífico
O ₂	aire	Explosivo con concentraciones elevadas de O ₂ en el biogás
H ₂ S	Proteínas y otros compuestos sulfurados como estiércol	Corrosivo para instrumentos y reactores de acero; toxico a concentraciones >50 ppm; formación de SO ₂ y H ₂ SO ₄
NH ₃	Proteínas, como residuos alimenticios	Tóxico para bacterias anaerobias; corrosivo en agua; formación de óxido nitroso cuando se combustiona
Siloxanos	Productos de higiene personal, cosméticos, detergentes, fármacos, y lubricantes	Formación de SiO ₂ y cuarzos microcristalinos; deposición en la superficie de motores
Halógenos	Hidrocarburos halogenados, como refrigerantes descartados, espumas plásticas, aerosoles y pintura	Tóxico y forma dioxinas y furanos polihalogenados; corrosivo para motores de combustión
Agua	Hidrocarburos y proteínas	Corrosión; taponamiento en tuberías; absorción/acumulación de otros contaminantes
Polvo	Metales, plásticos y aerosoles	Taponamiento

Cuando el biogás es utilizado para calentamiento y generación de electricidad únicamente se requiere la remoción del agua y del H_2S , por otra parte, para poder inyectar el biogás en tuberías y en transporte como combustible existen requerimientos estrictos en su composición, de acuerdo las especificaciones para tuberías de Estados Unidos, la inyección de biogás a tuberías de gas natural requiere que la composición del biogás contenga CO_2 , agua y H_2S menores a 3%, 112mg/m³ y 4ppm respectivamente. La conversión de bio-CNG requiere una purificación del biogás con un contenido mayor al 97% de CH_4 . Para la producción de biometano licuado, el biogás requiere ser purificado hasta contener menos de 25ppm, 4ppm y 1ppm de CO_2 , H_2S y agua, respectivamente, para la prevención de la formación de hielo seco y la corrosión. Por lo cual, de acuerdo a lo anterior el grado de purificación del biogás depende de la aplicación que se le vaya a dar a este (Yang, et al., 2014).

Para la purificación del biogás existen una variedad de métodos a utilizar, los cuales principalmente derivan de procesos convencionales de separación de gases los cuales han sido aplicados en la purificación de gas natural exitosamente.

Los principales métodos utilizados para la depuración del biogás se enlistan a continuación (Yang, Ge, Wan, Yu, & Li, 2014):

- Depuración con agua presurizada

Dicho método consiste en tomar como ventaja la alta solubilidad del CO_2 y H_2S en agua en comparación con el CH_4 . Con esta técnica es posible obtener una pureza >96% CH_4 posterior a secado; el efluente líquido obtenido presenta una concentración elevada de CO_2 y un bajo porcentaje de CH_4 . Como principales ventajas sobresalen el no requerimiento de químicos y la separación simultánea de CO_2 y H_2S , así como otras impurezas solubles en agua como el NH_3 , polvo, pero la principal desventaja son los elevados requerimientos de agua.

- Adsorción por cambio de presión (PSA)

Capítulo II Marco Teórico

Esta técnica utiliza las diferencias en la tasa de absorción para capturar los gases deseados (CO_2 , O_2 y N_2) a presiones elevadas. Comúnmente utiliza adsorbentes como la zeolita, gel sílice carbón activado entre otros.

Absorción por amina

El solvente amina cuenta con una alta selectividad para la absorción del CO₂; por lo cual normalmente es utilizado para la separación de CO₂ de fuentes corrientes de gas, adicionalmente a la adsorción del CO₂ la amina de igual forma ayuda a reducir los problemas de corrosión.

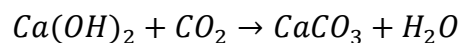
- Permeabilidad por membrana

El principio de diseño de membranas permeables consiste en que, bajo ciertas condiciones de presión, los gases con alta permeabilidad (aquellos con un tamaño molecular pequeño o baja afinidad) pueden ser transportados a través de la membrana mientras que gases con poca permeabilidad son retenidos.

Las principales ventajas y desventajas de las técnicas descritas anteriormente, así como otras se resumen en la tabla 4.

Adicional a los métodos descritos anteriormente también podemos encontrar el mejoramiento del biogás mediante solventes cáusticos, entre dichos solventes podemos encontrar al Hidróxido de sodio, hidróxido de potasio e hidróxido de calcio; dichos solventes los cuales pueden absorber al CO₂ ocupan el segundo lugar en abundancia después de las aminas.

De acuerdo a lo expuesto por (Abdeen *et al.*, 2016) una de las funciones principales de la solución de Ca(OH)₂ es la remoción del CO₂ el cual es mineralizado a CaCO₃ y H₂O.



Una de las desventajas que presenta la implementación de Ca(OH)₂ es la saturación de dicha solución, de acuerdo a lo expuesto por (Tippayawong & Thanompongchart, 2010), la solución de Ca(OH)₂ se satura a una velocidad mayor con respecto a hidróxido de sodio (NaOH).

Tabla 4 Ventajas y desventajas técnicas de los métodos de purificación de biogás (Yang, et al., 2014).

Método de purificación	Ventajas	Desventajas
Depuración con agua presurizada	Remoción de CO ₂ , NH ₃ y polvo; alta pureza de CH ₄ ; pocas pérdidas de CH ₄ ; no son necesarios químicos o equipos especiales	Demanda elevada de agua, baja eficiencia en la remoción de H ₂ S
Adsorción por cambio de presión	Remoción de CO ₂ , N ₂ y O ₂ ; baja demanda energética; bajos niveles de emisión	Se requiere una remoción previa de agua y H ₂ S previa a PSA; requiere regeneración periódica del adsorbente
Absorción por amina	Muy poca pérdida de CH ₄ ; producción de CO ₂ de alta calidad; remoción casi completa de H ₂ S	Alta demanda energética, costos elevados de las aminas; corrosión a temperaturas elevadas; produce desechos químicos
Membranas	Compacto y ligero en peso; operación y mantenimiento simples; bajos requerimientos de energía	Nivel de purificación del CH ₄ relativamente bajo y altas tasas de pérdida; posible costo elevado de las membranas
Absorción por cambio de temperatura	No requieren químicos especiales	Alta demanda energética; nivel de purificación bajo
Métodos criogénicos	Producción de CO ₂ como producto secundario	Elevada demanda energética; costos de capital elevados
Genosorb	Remoción eficiente de H ₂ S	No está diseñado para la remoción de CO ₂
Biofiltración	Remoción de NH ₃ , H ₂ S y partículas; bajo costo	No remueve CO ₂ ; puede generar N ₂ O

2.5 Antecedentes

La búsqueda de la generación de energía a partir de los desechos sólidos orgánicos ha tomado gran interés en las últimas décadas, en donde diferentes investigadores han aportado información sobresaliente sobre las diferentes etapas del proceso de generación de energía.

(Mor, Ravindra, De Visscher, Dahiya, & Chandra, 2006) realizaron un estudio de caracterización de residuos municipales de un relleno sanitario en la India, dichos residuos presentan una mayor composición de residuos orgánicos compostables, así mismo realizó una estimación de la capacidad de generación de metano en dicho relleno, los cálculos tomaban como base la cantidad de desechos vertidos en el relleno sanitario así como factores de humedad y el porcentaje de carbono en los residuos, con lo cual llegaron a la conclusión que por cada tonelada de residuos municipales vertida pueden obtenerse 90.5 m³ de biogás, si se asume que dicho gas contiene aproximadamente un 50% de metano en volumen. Recordando que para dicho cálculo se tomó como base la caracterización de un biogás generado en rellenos sanitarios.

(R. Zhang et al., 2007) llevaron a cabo un estudio de la caracterización de los residuos alimenticios con la finalidad de determinar su viabilidad para ser implementados como sustrato en procesos anaerobios para la generación de biogás, el estudio fue realizado en reactores anaerobios termófilos operados en régimen por lotes de 28 días, obteniendo una generación de 435 mL de metano por cada gramo de SV, con una composición promedio del biogás del 73% de metano.

(Lopez Torres & Espinosa Llorens, 2008) evaluaron el efecto de un pretratamiento alcalino a los residuos sólidos alimentados a un digestor anaerobio, con lo cual se mejora la DQO soluble en 11.5% de la DQO total, lo que a su vez permite una mayor disponibilidad de la materia orgánica y el consecuente incremento en un 172% en la tasa de generación de metano en comparación con los residuos que no recibieron pretratamiento.

(Kastner, Somitsch, & Schnitzhofer, 2012) obtuvieron que los reactores de lecho móvil presentaron una mejor estabilidad que los reactores de agitación continua para el proceso de degradación anaerobia de residuos de la industria alimentaria.

(Browne & Murphy, 2013) obtuvieron que la producción de biogás se ve beneficiada cuando se utilizan inóculos aclimatados al tipo de sustrato a tratar, ya que se puede obtener hasta un 70% más de producción de metano. En estas pruebas también se encontró que se puede producir hasta 529 litros de metano por kilogramo de SV.

(Qiao et al., 2011) evaluaron la capacidad potencial de producción de biogás partiendo de diferentes fuentes de biomasa las cuales fueron evaluadas con y sin pretratamiento térmico (170°C 1h), encontrando que los residuos alimenticios sometidos al pretratamiento térmico presentaron una reducción del 3.5% en la producción de biogás, así como una disminución del 2.9% en la concentración de metano en comparación con los residuos que no recibieron pretratamiento.

(Molino, Nanna, Ding, Bikson, & Braccio, 2013) llevo a cabo la evaluación de la producción del biometano obtenido en la digestión anaerobio de residuos orgánicos a escala piloto, la concentración promedio del metano en el biogás estuvo en el rango del 55-60%, el cual posteriormente fue purificado para la obtención de biometano utilizando membranas poliméricas; así mismo llevaron a cabo una evaluación de costos de producción del biometano obteniendo un costo entre los 20-22 centavos de Euro por metro cubico de comprimido.

(J. Zhang et al., 2017) elaboraron un digestor anaerobio de tres etapas con el cual logro un rendimiento superior en la producción de metano del 24-54% en comparación con sistemas tradicionales, el reactor consistía de un único contenedor el cual era dividido en tres cámaras, en las cuales se lleva a cabo cada una de las etapas de la anaerobiosis, la cámara superior hidrólisis, cámara intermedia acidogénesis y la cámara final la metanogénica, el digestato obtenido en la tercer cámara era recirculado a la primer cámara para brindar las bacterias necesarias para el proceso de hidrólisis.

(Papurello, Lanzini, Leone, Santarelli, & Silvestri, 2014) investigaron el proceso de producción de energía eléctrica utilizando un generador electroquímico el cual es alimentado con biogás producido mediante la digestión anaerobia de la FORSU. El proceso de digestión anaerobia seca fue llevado a cabo en un reactor a escala piloto con un volumen aproximado de 16 m³ por un periodo de 28 días. La FORSU fue mezclada con astillas de madera con la finalidad de obtener una porosidad adecuada para el proceso; previo al proceso anaerobio la mezcla de FORSU y astillas pasaron por una degradación aerobio con la finalidad de liberar CO₂ y compuestos volátiles orgánicos con lo cual permitió un arranque acelerado en la producción de metano. El reactor fue alimentado con 6.24 toneladas de una mezcla de FORSU con astillas de madera en una proporción de 2.3:1 respectivamente con lo cual obtuvieron un volumen de 349 m³ de los cuales 172 m³ fueron metano.

(Wang, Yin, Shen, & Li, 2014) evaluaron la producción de AGV's utilizando dos tipos de inóculo provenientes de lodos residuales uno aerobio y otro anaerobio alimentándolos con residuos alimenticios como sustrato bajo diferentes concentraciones de pH, obteniendo como resultado una mejor producción de AGVs por parte del inóculo anaerobio bajo cualquiera de las condiciones de pH estudiadas, siendo el lodo anaerobio a pH 6 el que presento mejor rendimiento en la producción de AGVs obteniendo 0.918 gramos por gramo de SSV removidos. Lo cual indica de forma indirecta la viabilidad de implementar a los residuos alimenticios como fuente para la generación de metano dado su alta tasa de producción de AGVs.

(Grimberg, Hilderbrandt, Kinnunen, & Rogers, 2015) realizaron una comparación entre dos sistemas de tratamiento de los residuos alimenticios, los sistemas comparados fueron un sistema de digestión anaerobia, obteniendo como resultado que ambos sistemas son eficientes para la generación de metano sin embargo el sistema de dos etapas presento un rendimiento superior del 33% en comparación con el sistema de una etapa.

(Xu, Shi, Hong, Zhang, & Chen, 2015) llevaron a cabo un análisis de ciclo de vida para obtener una estimación de los efectos ambientales de tres escenarios de tratamiento de residuos alimenticios en China, de los cuales el tratamiento anaerobio

de los residuos es el proceso el cual implica un menor daño ambiental, en contraparte el confinamiento de los residuos en vertederos es el peor escenario dado los procesos de liberación de gases, contaminación de cuerpos de agua y toxicidad humana.

(Yong, Dong, Zhang, & Tan, 2015) estudiaron el proceso de codigestión anaerobia de residuos alimenticios con paja, obteniendo como resultado un índice de producción de metano de 0.392 metros cúbicos por kilogramo de SV para una mezcla 5:1 de residuos alimenticios-paja, de igual forma determinaron el índice de producción de metano para los residuos alimenticios y la paja por separado, los cuales al ser comparados con la mezcla de residuos-paja estos se vieron superados por la mezcla en un 40% y 150% respectivamente, lo cual es atribuido a la relación C/N que presentó cada sustrato.

(Zhai et al., 2015) llevaron a cabo el análisis de los efectos del pH inicial en una codigestión anaerobia de residuos de cocina con estiércol bovino, el rango de pH estudiado se encuentra dentro de los valores de 6 a 8, obteniendo como resultado que el pH de 7.5 ideal para el tratamiento de los residuos.

(Rios & Kaltschmitt, 2016) presentan una metodología para realizar una estimación del potencial teórico, técnico y económico de generación de energía eléctrica implementando el biogás generado a partir de diferentes fuentes de residuos orgánicos. Entre los residuos considerados se encuentran los RSU presentes en vertederos controlados fueron considerados factores como la biodegradabilidad y el porcentaje de materia orgánica presente, con lo cual estimaron una generación de 30 terawatts hora por año, lo cual indica el gran potencial teórico de generación energética presente en los RSU.

2.6 Justificación

En la época actual el problema formado por la generación excesiva de residuos sólidos en conjunto con un mal manejo de estos, se ha convertido en uno de los retos más importantes a enfrentar, no solo por el hecho de la contaminación ambiental que estos generan, sino por la falta de aprovechamiento de los mismos.

la separación de la FORSU de la industria restaurantera puede ser aprovechada a través del proceso de digestión anaerobia y purificación del biogás para enriquecerse a una concentración de metano del 95%, traerá como consecuencia beneficios desde el punto de vista del desarrollo autosustentable, ya que desde el punto de vista ambiental se dejarán de producir gases tóxicos, corrosivos y de efecto invernadero, generación de lixiviados y proliferación de la fauna nociva; desde el enfoque económico se obtendrán beneficios por la posible disminución de consumo de gas L.P. por la producción y aprovechamiento del gas metano producido; y finalmente desde la perspectiva social se dará la generación de nuevas fuentes de empleo.

2.7 Pregunta de investigación

En baso a lo mencionado anteriormente se formuló la siguiente pregunta:

¿Es posible que el biogás generado en un reactor anaerobio alimentado con residuos alimenticios provenientes de una industria restaurantera genere el suficiente beneficio económico para auto sustentar su consumo energético?

2.8 Hipótesis

La cantidad de biogás en el tratamiento anaerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos generados dentro de un establecimiento de alimentos proporcionarán el suficiente beneficio económico para auto sustentar su consumo energético combustible.

2.9 Objetivo general

Desarrollar un sistema de tratamiento anaerobio para degradar la fracción orgánica de los residuos sólidos generados en la industria restaurantera para la generación de biogás y su tratamiento, evaluando su rendimiento económico.

2.10 Objetivos específicos

Los objetivos necesarios para poder llevar a cabo el desarrollo del sistema de tratamiento de los residuos orgánicos se enumeran a continuación:

1. Determinar el potencial del residuo orgánico generado a través de su caracterización en medio líquido.
2. Diseñar y fabricar los reactores necesarios para el sistema de degradación anaerobia y el mejoramiento de biogás.
3. Estabilización del reactor anaerobio UASB modificado.
4. Determinar el consumo y la generación energética en el proceso para la generación y tratamiento de biogás.
5. Evaluar la viabilidad técnico-económica del proceso propuesto.

Capítulo III

Metodología

3.1 Recolección y caracterización de residuos

Para la recolección de la FORSU, se determinó el realizar tres muestreos a lo largo del día con la finalidad de obtener una muestra representativa de los residuos generados en la industria restaurantera. La concentración de nutrientes se determinó en base a pruebas como la DQO, nitrógeno total, fósforo total; los parámetros ambientales como son el pH y la alcalinidad fueron determinados, así mismos la determinación de sólidos volátiles y totales al igual que grasas y aceites fueron analizados; previo a los análisis anteriormente mencionados los residuos orgánicos pasaron por un proceso de molienda húmeda en un triturador de alimentos marca InSinkerator modelo 55, con la cantidad de agua necesaria para obtener un volumen final de 8 L, con la finalidad de obtener una suspensión y realizar los análisis de acuerdo a la normativa mexicana para análisis de aguas y métodos HACH para análisis de aguas.

3. 2 Diseño y construcción de reactores

Para la construcción del reactor anaerobio se tomó como base el diseño tradicional de reactores UASB, tomando como base un contenedor cilíndrico de polietileno de alta densidad con un volumen de 60 L, las especificaciones de construcción se muestran en la ilustración 4.

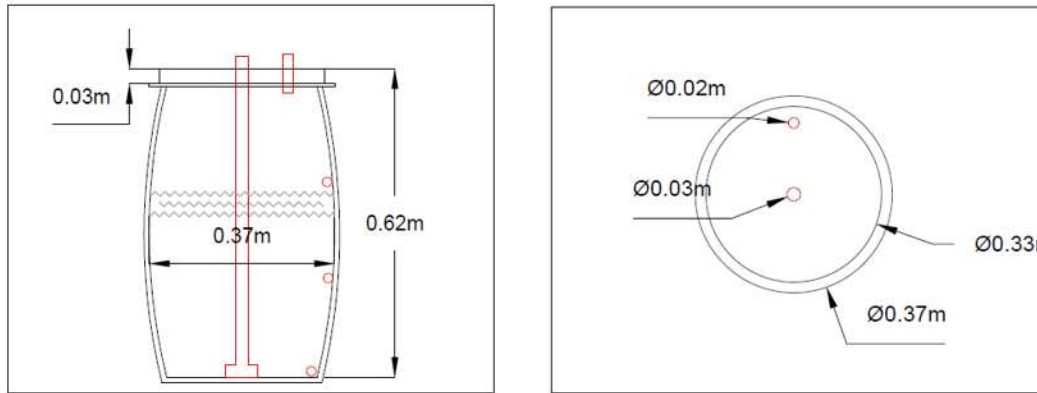


Ilustración 4 Diseño reactor UASB modificado.

Tomando como base el proceso expuesto por (Campuzano Calderón, 2017), fue necesario llevar a cabo la construcción de un reactor de burbujeo que imitara las especificaciones expuestas en dicho trabajo. Para la construcción del reactor se tomó como base un cilindro de acrílico con una longitud de 0.7 m, diámetro de 4 pulgadas y un espesor de 4 mm.

3.3 Puesta en marcha del reactor UASB

Considerada una etapa fundamental en la implementación de proceso biológicos para el tratamiento de contaminantes, con la finalidad de acortar el periodo de arranque se inóculo el 20% del volumen útil del reactor con inóculo anaerobio, con lo cual de igual forma se buscó el reducir los tiempos de estabilización del mismo.

3.3.1 Preparación del Inóculo

La metodología expuesta por (García Castillo, 2012) fue tomada como base para la elaboración del lodo anaerobio, para lo cual tomando como base estiércol de cerdo al cual se le determinó la concentración de sólidos totales (ST) presentes, posteriormente fue formulada una suspensión con una concentración de ST entre el 7% y el 9%. El volumen del inóculo es dependiente del volumen del reactor a alimentar y considerando un tiempo de preparación de 3 meses. El seguimiento de la

elaboración de los lodos se realizó mediante los parámetros de; pH, conductividad, alcalinidad, relación alfa y sólidos volátiles. Tomando el pH y la relación alfa como los análisis principales por su importancia para los procesos anaerobios, buscando mantener el pH entre 6-7.3; y una relación alfa superior a 0.5 (Palomares Rodríguez, 2013).

3.3.2 Alimentación de los residuos alimenticios al reactor UASB modificado

Como se mencionó anteriormente los residuos fueron triturados en un proceso de molienda húmeda con la finalidad de obtener una suspensión semilíquida, a partir de dicha suspensión se realizaron diluciones que rondaron entre los 15000- 30000 miligramos de DQO por litro, con un volumen de 15 L para su alimentación al reactor UASB modificado.

3.4 Operación del reactor UASB modificado

El reactor UASB modificado fue alimentado de forma intermitente (Bach) con los residuos orgánicos, dicha operación se mantuvo por 160 días, la alimentación ingresaba gracias al aprovechamiento de la gravedad, con un caudal promedio de 2 L/min.

3.4.1 Carga orgánica

La carga orgánica del reactor se mantuvo entre los 15000-30000 miligramos de DQO por litro debido a la dificultad de realizar una dilución exacta de la suspensión de desechos debido a el tamaño de partícula de la materia flotante presente en dicha suspensión.

3.4.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Una vez que el reactor alcanzó su volumen de operación se realizaron pruebas de remoción en las cuales el reactor fue alimentado y posteriormente determinar el porcentaje de remoción diariamente, en base a esto se determinó el tiempo en el cual la remoción dejaba de ser significativa.

3.4.3 Monitoreo de operación del reactor

Durante el periodo de operación del reactor se determinó realizar un seguimiento basado principalmente en los factores que interactúan con el pH del sistema los cuales son: pH, alcalinidad, conductividad, AGVs, relación alfa y temperatura.

3.4.4 Medición del volumen de biogás generado

La determinación del biogás generado se basó en el principio de desplazamiento de volumen, para lo cual fue necesario construir un recipiente de graduado de volumen conocido, el cual era llenado con agua, dicho contenedor contaba con una entrada de gas en la parte superior y una salida de líquido en la parte inferior del mismo.

3.4.5 Composición del biogás

La composición del biogás obtenido fue analizada con un medidor infrarrojo de gases marca COMB-IR el cual muestra el CH₄, CO₂ y O₂ como porcentaje de composición y el H₂S en ppm siendo las 200 unidades el límite máximo de detección.

3.5 Técnicas y equipos implementados

Los métodos y técnicas empleados se resumen en la tabla 5:

Tabla 5 Métodos y técnicas utilizadas .

Parámetro	Método/Norma
pH	NMX-AA-005-SCFI-2011
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000
Temperatura	NMX-AA007-SCFI-2013
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000
Sólidos y sales	NMX-AA034-SCFI-2015
Ácidos Grasos	Método 8196 HACH
DQO	Método 8000 HACH
Nitrógeno Total	Método 10242 HACH
Fósforo Total	Método 10127 HACH
Relación Alfa	Método potenciométrico

Los equipos implementados en la determinación de los parámetros mencionados anteriormente son mencionados a continuación, las pruebas espectrofotométricas requirieron del espectrofotómetro HACH DR2800, las digestiones de viales HACH fueron llevadas a cabo en los digestores HACH 45600-00 COD reactor y el reactor HACH DRB200; por otra parte, el seguimiento de los parámetros de pH, conductividad, temperatura y relación alfa fue implementado el multiparamétrico Orion star A327. El análisis del biogás generado fue llevado a cabo con el equipo medidor infrarrojo de gas marca COMB-IR.

Capítulo IV

Resultados y

discusión de

resultados

4.1 Caracterización de los residuos orgánicos

4.1.1 Recolección de muestra

La recolección de los residuos fue en base a muestras volumétricas a lo largo del día, las cuales fueron mezcladas en un contenedor de 8 litros, las muestras obtenidas al final del día presentaron un peso entre los 6 a 7 kilogramos dependiendo de la cantidad de líquido presente en las muestras, así como de los hueso, semillas grandes y conchas de moluscos presentes.



Ilustración 5 Recolección de residuos sólidos.

4.1.2 Trituración de los residuos orgánicos

El proceso de molienda o trituración húmeda de los residuos se llevó a cabo por un periodo de 10 minutos, en el cual los residuos recolectados fueron recirculados dentro del sistema de trituración con la finalidad de obtener una suspensión homogénea de los residuos, de igual forma el proceso de trituración requería de la adición de 1.5 L de agua con la finalidad de facilitar el proceso de trituración y el arrastre de residuos remanentes dentro del sistema de trituración. Como resultado del proceso de molienda se obtenía una suspensión homogénea con un volumen

entre los 7-9 L, el cual dependía de la cantidad de materiales duros removido previo al proceso de molienda.



Ilustración 6 Suspensión de residuos orgánicos.

4.1.3 Caracterización de los residuos orgánicos

La caracterización de la suspensión obtenida mostro las siguientes concentraciones:

Tabla 6 Caracterización de residuos orgánicos.

Parámetro	Resultado
pH	4.32
Alcalinidad	4.24 mg/L
DQO	132000 mg/L
Fósforo total	750 mg/L
Nitrógeno total Kjeldahl	12375 mg/L

Los valores obtenidos en la caracterización de los residuos de la industria restaurantera son similares con los residuos estudiados por (Grimberg et al., 2015; Jiang et al., 2013; Kastner et al., 2012), debido a que en todos los casos los pHs son de carácter ácido y se encuentran en el rango de 4, además de que la carga orgánica representada por la DQO se encuentra con valores superiores a los 100000 miligramos por litro. La relación carbono-nitrógeno-fósforo presente en la suspensión

Capítulo IV Resultados y discusión de resultados

fue de 176-3.2-1, la cual presenta un déficit de nitrógeno en comparación con las concentraciones recomendadas de 100-5-1.

En base a la concentración obtenida se realizó la adecuación para obtener una concentración controlada de 15000-30000 miligramos de DQO por litro para la alimentación del reactor UASB modificado.

4.2 Diseño y construcción de reactores

4.2.1 Construcción del reactor anaerobio UASB modificado

Para la construcción del reactor se tomó como base un contenedor cilíndrico plástico el cual cuenta con un volumen de 60 L, una altura de 0.6 m y un diámetro de 0.37 m. Los deflectores fueron elaborados con perfiles de aluminio de $\frac{3}{4}$ pulgada los cuales fueron adheridos a un soporte de aluminio el cual se encuentra al interior del reactor. El punto de alimentación fue elaborado con tubería de PVC de 1 pulgada la cual cuenta con una válvula de globo del diámetro correspondiente, por otra parte, el punto de muestreo de lodos y el punto de salida del reactor están elaborados con tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada con válvulas de globo del mismo diámetro; adicionalmente el reactor cuenta con un punto de muestreo intermedio el cual fue elaborado con tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada de CPVC. Para la recuperación del biogás generado fue colocada una manguera de polipropileno de $\frac{1}{4}$ pulgada la cual contaba con una válvula de globo de dicho diámetro. El diseño completo puede ser apreciado en la ilustración 7 en el cual se muestran los planos del dicho reactor.

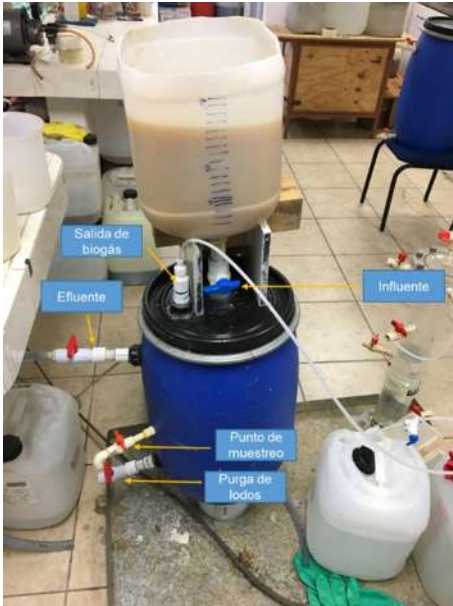


Ilustración 7 Reactor anaerobio modificado.

4.2.2 Construcción del reactor de burbujeo

Dicho reactor consta de un tubo cilíndrico de acrílico bridado por ambos extremos a lo largo del cual fueron colocados puntos de muestro para la suspensión elaborados con tubería de CPVC de $\frac{1}{2}$ de pulgada, al igual que los puntos de influente y efluente, la entra y salida de gas constan de tubería de $\frac{1}{4}$ de pulgada con sus respectivas válvulas. En la parte inferior del reactor se fue acoplado un difusor de membrana tubular, el cual genera burbujas con un diámetro promedio de 1.6 mm mientras que la parte superior fue adaptado un sistema para la recuperación del gas tratado hacia un sistema de medición por desplazamiento de volumen. La entra y salida de gas del sistema constan de tubería de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

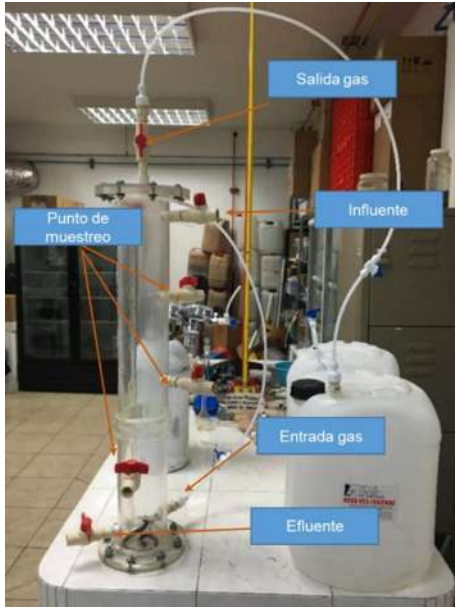
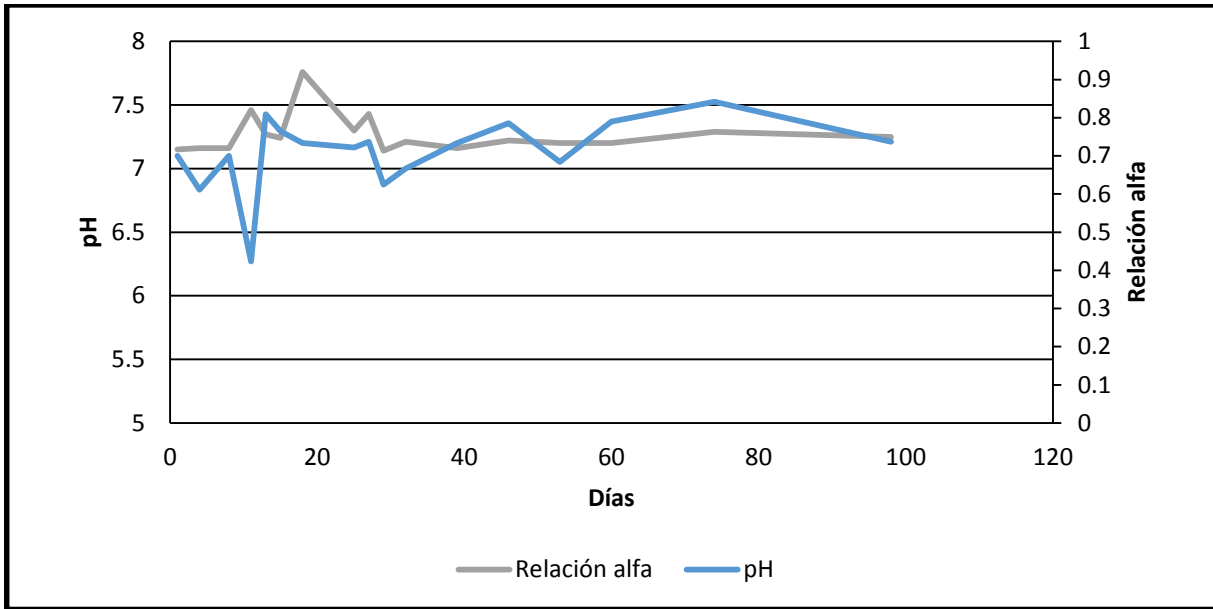


Ilustración 8 Reactor de burbujeo.

4.3 Puesta en marcha del reactor UASB modificado

4.3.1 Preparación del inóculo

El seguimiento del comportamiento de los parámetros de pH y relación alfa durante la preparación del inóculo puede apreciarse en la gráfica 1, en la cual muestran los valores de pH a pesar de presentar una tendencia inicial al decaimiento hasta 6.3, para posteriormente presentar una recuperación después de los 20 días hasta mantenerse en el rango de 6.5 y 7.5 en lo que respecta a la relación alfa esta se mantuvo en los rangos de 0.7 a 0.9 que es superior al 0.5 (Palomares Rodríguez, 2013). que es el mínimo para el proceso anaeróbico para posteriormente mantenerse dentro de los rangos deseados para los procesos de digestión anaerobia.



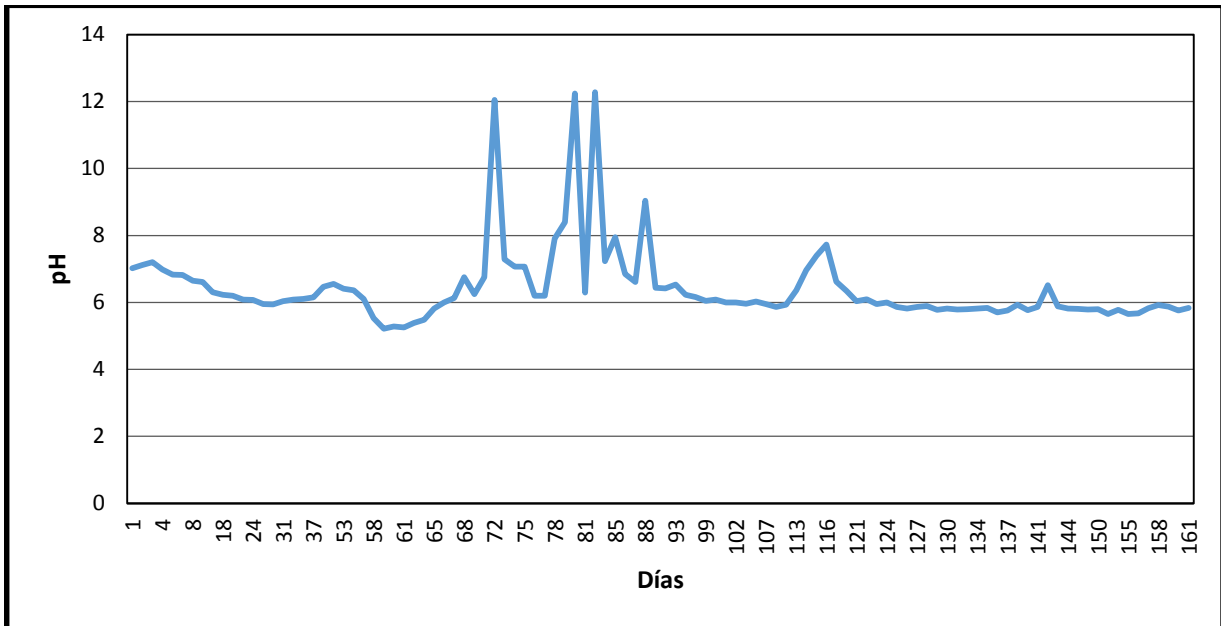
Gráfica 1 Comportamiento de la relación alfa y el pH durante la elaboración del lodo anaerobio.

4.3.2 Inoculación y operación del reactor

El volumen ideal de lodo anaerobio recomendado para la inoculación del reactor UASB modificado se encuentra dentro del rango del 10-20 por ciento de su volumen útil (García Castillo, 2012), para lo cual se determinó que el volumen a inocular fuera de 9 L. Una vez realizada la inoculación, el reactor fue llenado en etapas con un volumen de 4.5 L dos veces por semana, hasta alcanzar el volumen de operación de 45 L, para posteriormente realizar alimentación de 15 L cada 48 horas, hasta alcanzar un tiempo total de operación de 161 días. El periodo de la operación se inicia en la estación de invierno y finaliza en el verano;

Los resultados del pH durante el periodo de pruebas considerado desde la alimentación del inóculo se muestra en la gráfica 2.

4.3.3 pH



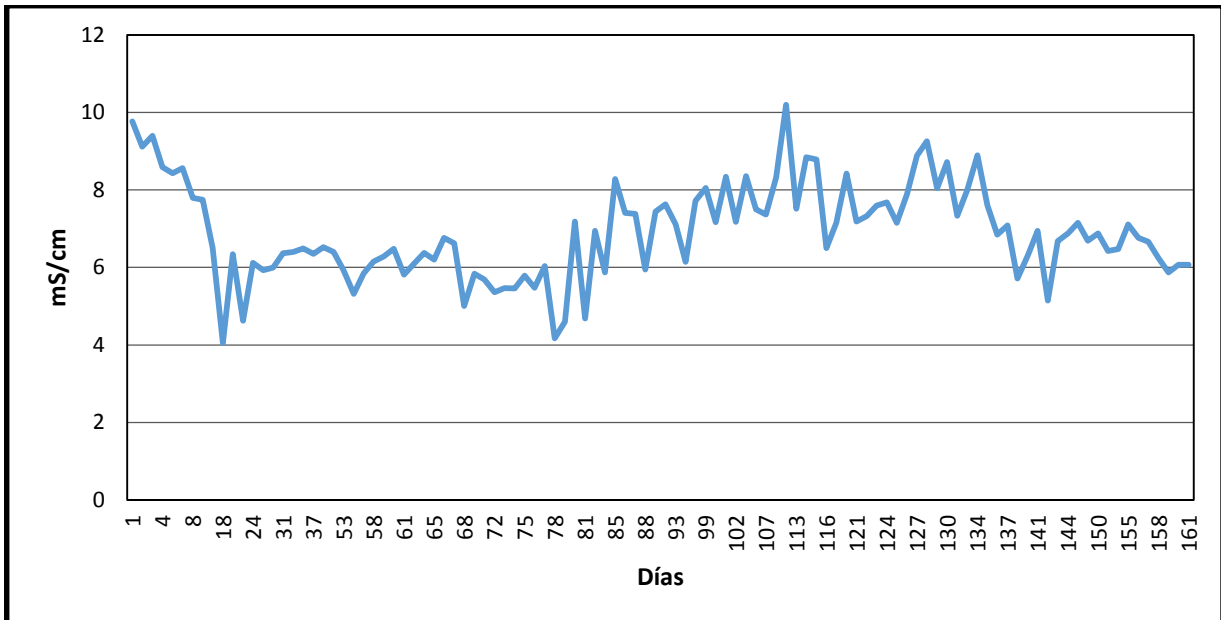
Gráfica 2 Comportamiento del pH durante la operación del reactor UASB modificado.

El pH con el que inició el reactor fue de 7.3 y conforme se fue alimentando el residuo alimenticio el pH dentro del reactor empezó a decaer hasta un valor de 5.5 en los primeros 61 días, lo cual puede ser atribuible a dos factores fundamentales, el pH ácido (4.5) de la FORSU y la generación de AGVs propios de una etapa de la anaerobiosis. como medida correctiva para lograr la estabilización del pH se decidió detener la alimentación del sistema (Babae, 2011) para posteriormente, adicionar 2 litros de suspensión de hidróxido de calcio con concentración de 2 gramos por litro, el resultado de esta adición se observa con un incremento hasta 6.8 en el día 68; sin embargo el continuar adicionando la suspensión de hidróxido de calcio diario provocó incrementos y disminuciones en el pH en un rango de 6 a 12, por lo que a partir del día 86 se dejó de adicionar la suspensión de cal obteniéndose una estabilización del pH, posteriormente se introdujo la alimentación a pH controlado en el rango de 7.5 a 8. (Lopez Torres & Espinosa Llorens, 2008). El efecto de disminución del pH dentro del reactor a pesar de la alimentación controlada es atribuible a la reacción que producen los AGVs (Razaviarani & Buchanan, 2014). Para el día 99, una vez que el pH comenzó a mostrar una estabilidad en valores cercanos a pH 6 el cual de

Capítulo IV Resultados y discusión de resultados

acuerdo a (Zhou et al., 2016) no es considerado un pH adecuado para los microorganismos metanogénicos, sin embargo, la generación de biogás se hizo presente manteniendo en un inicio una producción esporádica, para posteriormente mantener una producción diaria promedio de 16 L por día.

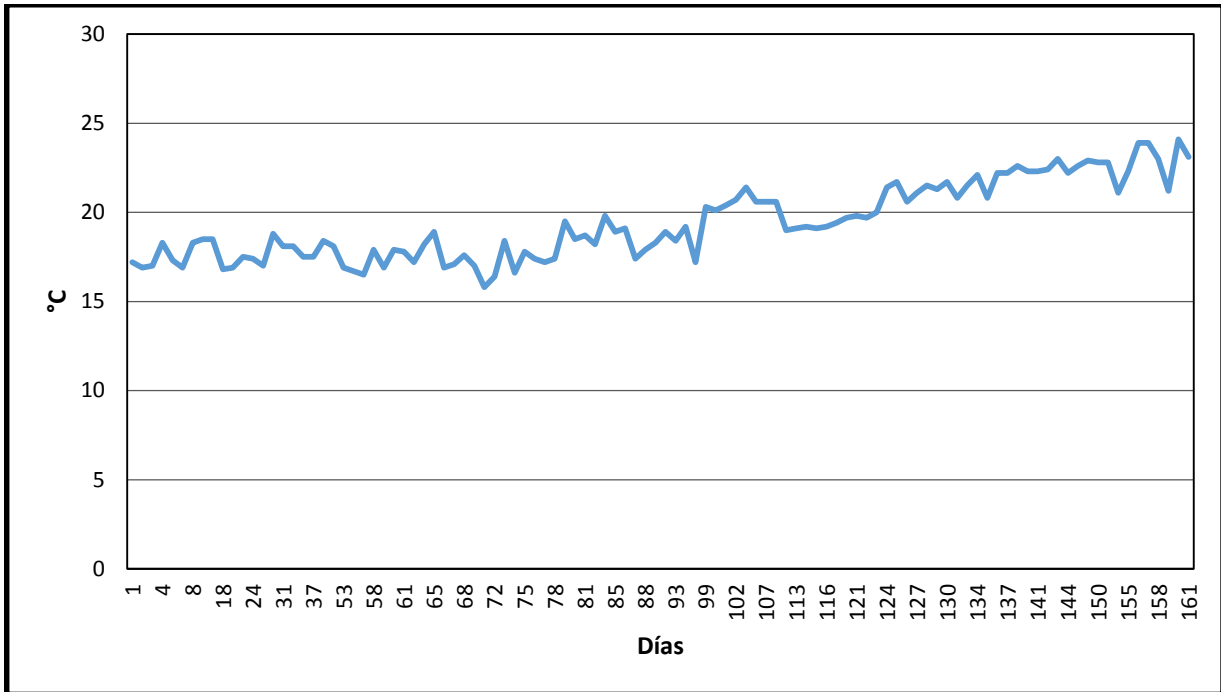
4.3.4 Conductividad



Gráfica 3 Comportamiento de la conductividad durante la operación del reactor UASB modificado.

En la gráfica 3 se presentan los valores de conductividad obtenidos durante la puesta en marcha y operación del reactor UASB modificado los cuales se mantuvieron dentro del rango de los 4 a 10 mS/cm, al comienzo de la operación se observan los valores de mayor concentración, lo cual puede ser un indicador de la cantidad de ácidos orgánicos disociados; estos son producto de la degradación de la materia orgánica en condiciones anóxicas, así mismo estos valores son indicativos de la concentración de salinidad y solidos disueltos totales.

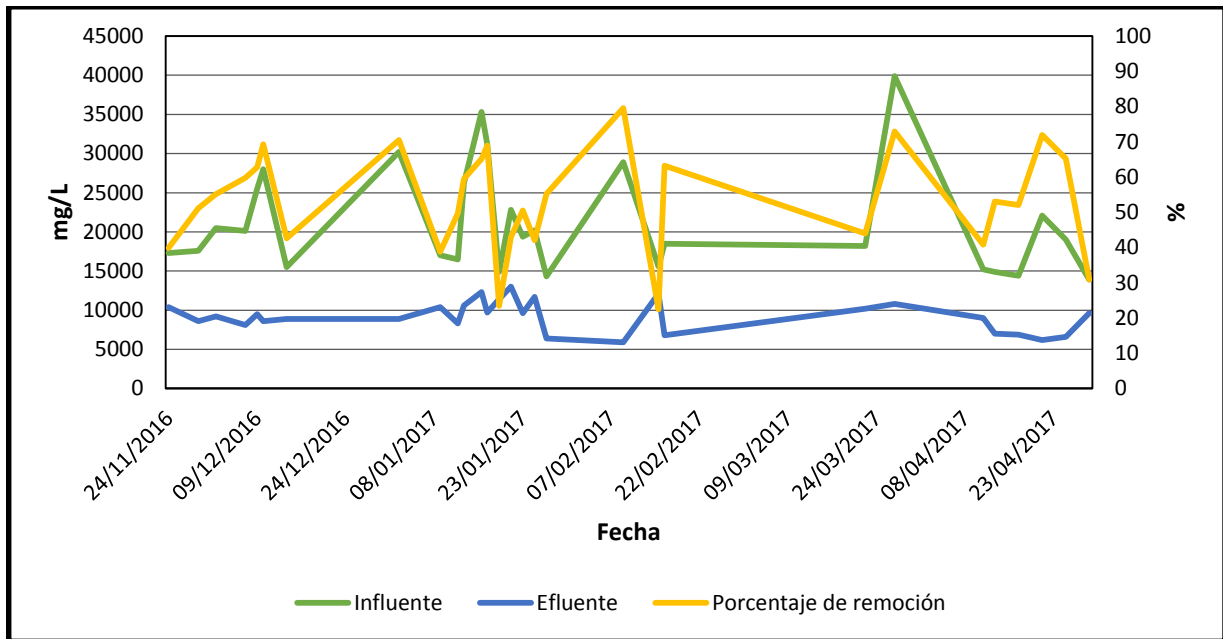
4.3.5 Temperatura



Gráfica 4 Comportamiento de la temperatura durante la operación del reactor UASB modificado.

En la gráfica 4 se presenta el comportamiento de la temperatura del reactor, el cual fue operado bajo condiciones no controladas de temperatura. En esta se observa que desde la puesta en marcha hasta el día 100, el reactor se encontró dentro del rango psicrófilo debido a que la temperatura se mantuvo debajo de los 20 °C; sin embargo, al terminar el periodo de invierno la temperatura del reactor se incrementó hasta un máximo de 24°C, rango en el cual se considera que el reactor está completamente estabilizado y se obtiene producción de biogás esto debido al tenerse las condiciones mínimas para que los microorganismos metanogénicos inicien su actividad (Li et al., 2017).

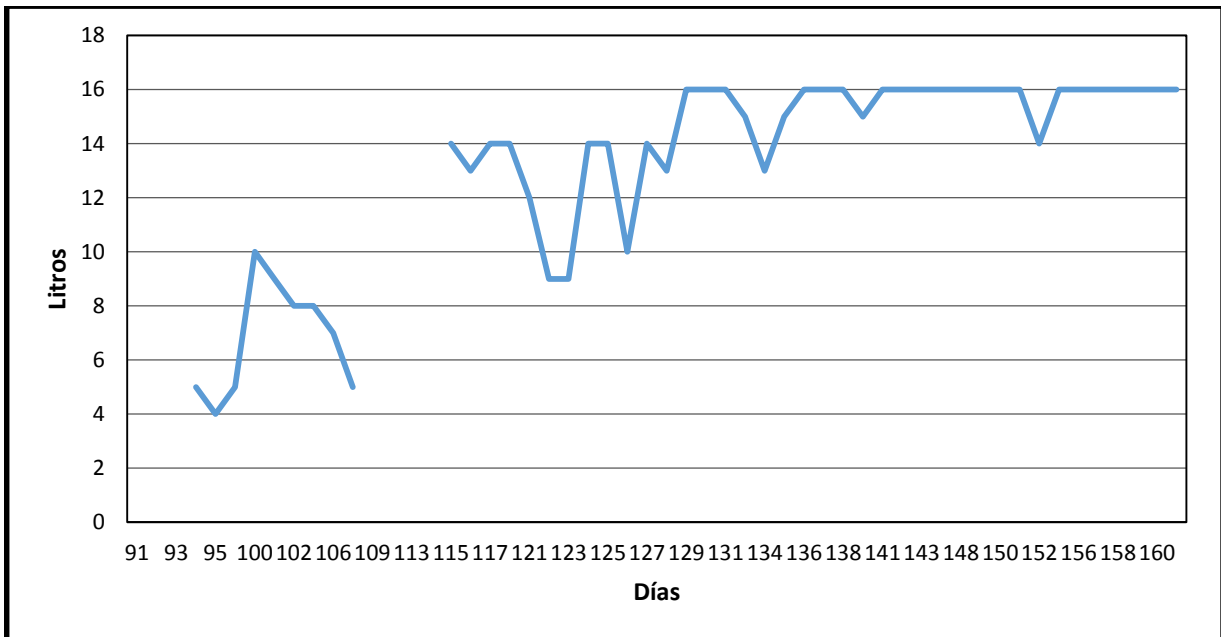
4.3.6 DQO



Gráfica 5 Seguimiento de la DQO en el influente y efluente, así como el porcentaje de remoción

La grafica 5 muestra el comportamiento de la DQO del influente, efluente y porcentaje de remoción del reactor UASB modificado, en donde se puede apreciar que independientemente de la concentración del influente, la concentración del efluente se mantiene en un rango entre 5000 mg/L y 12000 mg/L. Dada la variabilidad en la concentración del influente del reactor el rango que se obtuvo en la remoción fue del 30 al 80 por ciento.

4.3.7 Producción de biogás



Gráfica 6 Producción de biogás durante la operación del reactor UASB modificado.

La generación de biogás se hizo presente hasta el día 93 de operación del reactor, con una producción inicial del orden de 4.5 litros por día a condiciones normales de presión y temperatura, este inicio en la producción puede ser atribuido a la estabilización del reactor desde el punto de vista de pH (6 unidades) y temperatura de 20°C. a partir de ese día se tuvo un incremento en la producción hasta alcanzar la cantidad de 16 litros por día. En la gráfica también se puede observar que existió un periodo entre el día 109 y 117 en el cual no se evaluó la producción de biogás esto debido a que se presentaron fugas en las uniones de las tuberías de interconexión entre la descarga del reactor y el tanque de medición. Los resultados de la caracterización del biogás muestran que se obtuvo una concentración de 50% de CH₄, 49% CO₂ y el 1% de H₂S.

Los resultados del tratamiento del biogás en el reactor de burbujeo con solución alcalina muestran que se puede eliminar completamente el H₂S y un alto porcentaje de CO₂ hasta alcanzar una concentración del metano del orden del 98%.

4.3.8 Evaluación de costos de producción

En base a la producción de biogás obtenido a escala piloto, se realizó una estimación para determinar el potencial de generación de biogás al tratar la totalidad de los residuos generados semanalmente dentro del establecimiento alimenticio, proyectando una producción de 5.9 m³ de biogás semanales; así mismo al obtener los costos de producción de biogás se realizó una comparación con el volumen y costo de gas L.P. consumidos semanalmente, mostrando que se puede eliminar el consumo de gas L.P.

Tabla 7 Cálculos de la producción estimada al tratar la totalidad de los residuos generados semanalmente, así como una comparación de costos de la cantidad de gas L.P. utilizados en la actualidad.

Concepto	Piloto	Restaurant	Gas L.P.
Volumen residuos	8 L	315 L	-
Producción biogás	0.15 m ³	5.9 m ³	0.256 m ³
Porcentaje metano	50%		-
Volumen de metano	0.075 m ³	2.95 m ³	-
Precio por litro	\$23.5	\$ 3.91	\$8.79
Costo	-		\$2,250

Para la determinación de los costos de producción del biogás tratado se consideraron factores como: mano de obra, costo de pruebas analíticas de laboratorio, costo de energía eléctrica, mantenimiento preventivo y correctivo de los reactores, costos de transporte de la materia prima (RSU), el costo del tratamiento del gas (tabla 8).

Capítulo IV Resultados y discusión de resultados

Tabla 8 Costos considerados en el cálculo de precio del biogás tratado.

Concepto	Costo
Electricidad	\$ 5000
Transporte	\$ 950
Personal	\$ 2100
Análisis laboratorio	\$ 2000
Tratamiento del biogás	\$ 10
Mantenimiento	\$ 1500
Costo de operación	\$ 11560

El precio por litro de biogás tratado fue calculado en base a los costos de operación del sistema y la producción semanal de biogás tratado, obteniendo un costo de \$3.91 por litro de biogás obtenido.

Tabla 9 Cálculo de costos de producción de biogás en M.N.

Producción de biogás	Costo de operación	Precio por litro
2.95 m ³	\$ 11,560.00	\$ 3.91

Capítulo V

Conclusiones

5.1 Conclusiones

Después de haber realizado el estudio técnico-económico del procesamiento de los residuos sólidos de la industria restaurantera a través del proceso anaerobio, la cantidad de gas producido es suficiente para sustentar los requerimientos energéticos del establecimiento a un costo de \$3.91 M.N. por litro de metano (\$0.22 USD).

El sistema de tratamiento propuesto a través de un reactor UASB modificado es ideal para este tipo de residuos sólidos, dado que el conjunto de reactor modificado y sistema de purificación del biogás generan un gas metano de concentración mayor al 98%.

Los residuos orgánicos generados dentro de la industria restaurantera son una fuente viable y de fácil obtención para la generación de biogás, dada la naturaleza de su composición los cuales son considerados en general compuestos biodegradables.

Recomendaciones

Recomendaciones

- Llevar a cabo pruebas con cargas orgánicas superiores para determinar el punto de inestabilidad del sistema UASB modificado para el tratamiento de RSU.
- Evaluar con mayor detalle el sistema de tratamiento de gases con concentraciones mayores de Ca(OH)_2 , con la finalidad de disminuir la tasa de recambio del sistema de tratamiento del biogás.
- Determinar los puntos de saturación del sistema tratamiento de gases para la determinación de la tasa de recambio de la solución Ca(OH)_2 operando el sistema de forma continua.
- Implementar un nuevo sistema de molienda para los residuos alimenticios, dada la dificultad de molienda de vegetales que presento el equipo utilizado.

Bibliografía

- Babae, A.; Shayegan, J. (2011). *Effect of the organic loading rates (ORL) on production of methane from anaerobic digestion of vegetables waste*. Linköping, Sweden: World renewable energy congress.
- Browne, James D., & Murphy, Jerry D. (2013). Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Applied Energy*, 104, 170-177.
- Campuzano Calderón, O. (2017). *Estudio de la remoción de sulfuro de hidrógeno y de dióxido de carbono presente en el biogás, por medio de un reactor de columna de burbujeo operado a baja presión*. (Maestría), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- Castells, X.E. (2012). *tratamiento y valorización energética de residuos*: Editorial Díaz de Santos, S.A.
- Curry, Nathan, & Pillay, Pragasen. (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy*, 41, 200-209.
- dos Santos Reis, A., Gavazza, S., & Santos, S. M. (2016). Anaerobic treatment of food waste in pilot scale. *Water Practice and Technology*, 11(4), 774-783.
- El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresour Technol*, 101(11), 4021-4028.
- Fernández-Polanco, F., & Seghezzi, L. (2015). *Diseño de reactores upflow anaerobic sludge blanket (UASB)*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- García Castillo, C. (2012). *Evaluación de la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de los rastros en un reactor UASB*. (MAestría), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.
- Grimberg, S. J., Hilderbrandt, D., Kinnunen, M., & Rogers, S. (2015). Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester--assessment of variable loadings on system performance. *Bioresour Technol*, 178, 226-229.
- Jiang, J., Zhang, Y., Li, K., Wang, Q., Gong, C., & Li, M. (2013). Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. *Bioresour Technol*, 143, 525-530.

- Kastner, Verena, Somitsch, Walter, & Schnitzhofer, Wolfgang. (2012). The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems. *Journal of Cleaner Production*, 34, 82-90.
- Komemoto, K., Lim, Y. G., Nagao, N., Onoue, Y., Niwa, C., & Toda, T. (2009). Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. *Waste Manag*, 29(12), 2950-2955.
- Latif, M. A., Ahmad, A., Ghufuran, R., & Wahid, Z. A. (2012). Effect of temperature and organic loading rate on upflow anaerobic sludge blanket reactor and CH₄ production by treating liquidized food waste. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(1), 114-121.
- Li, X., Peng, Y., He, Y., Wang, S., Guo, S., & Li, L. (2017). Anaerobic stabilization of waste activated sludge at different temperatures and solid retention times: Evaluation by sludge reduction, soluble chemical oxygen demand release and dehydration capability. *Bioresour Technol*, 227, 398-403.
- Lopez Torres, M., & Espinosa Llorens, M del, C. (2008). Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes. *Waste Manag*, 28(11), 2229-2234.
- Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., & Braccio, G. (2013). Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, 103, 1003-1009.
- Mor, S., Ravindra, K., De Visscher, A., Dahiya, R. P., & Chandra, A. (2006). Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation: a case study. *Sci Total Environ*, 371(1-3), 1-10.
- Palomares Rodríguez, C. (2013). *Evaluación de la producción de biogás bajo condiciones controladas de temperatura en un reactor UASB con alimentación intermitente de agua residual de rastro*. (Maestría), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.
- Papurello, D., Lanzini, A., Leone, P., Santarelli, M., & Silvestri, S. (2014). Biogas from the organic fraction of municipal solid waste: dealing with contaminants for a solid oxide fuel cell energy generator. *Waste Manag*, 34(11), 2047-2056.
- Qiao, Wei, Yan, Xiuyi, Ye, Junhui, Sun, Yifei, Wang, Wei, & Zhang, Zhongzhi. (2011). Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. *Renewable Energy*, 36(12), 3313-3318.

- Razaviarani, V., & Buchanan, I. D. (2014). Reactor performance and microbial community dynamics during anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease waste at steady state and overloading stages. *Bioresour Technol*, *172*, 232-240.
- Rios, Mario, & Kaltschmitt, Martin. (2016). Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*, 384-395.
- Tippayawong, N., & Thanompongchart, P. (2010). Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, 4531-4535.
- Wang, K., Yin, J., Shen, D., & Li, N. (2014). Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: effect of pH. *Bioresour Technol*, *161*, 395-401.
- Xu, Changqing, Shi, Wenxiao, Hong, Jinglan, Zhang, Fangfang, & Chen, Wei. (2015). Life cycle assessment of food waste-based biogas generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 169-177.
- Yang, Liangcheng, Ge, Xumeng, Wan, Caixia, Yu, Fei, & Li, Yebo. (2014). Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *40*, 1133-1152.
- Yong, Zihan, Dong, Yulin, Zhang, Xu, & Tan, Tianwei. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy*, *78*, 527-530.
- Zhai, N., Zhang, T., Yin, D., Yang, G., Wang, X., Ren, G., & Feng, Y. (2015). Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure. *Waste Manag*, *38*, 126-131.
- Zhang, Jingxin, Loh, Kai-Chee, Li, Wangliang, Lim, Jun Wei, Dai, Yanjun, & Tong, Yen Wah. (2017). Three-stage anaerobic digester for food waste. *Applied Energy*, *194*, 287-295.
- Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresour Technol*, *98*(4), 929-935.

Zhou, J., Zhang, R., Liu, F., Yong, X., Wu, X., Zheng, T., . . . Jia, H. (2016). Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure. *Bioresour Technol*, 217, 44-49.

Anexo

Anexo I Manual de operación del reactor anaerobio UASB modificado alimentado con residuos orgánicos

Preparación del sustrato

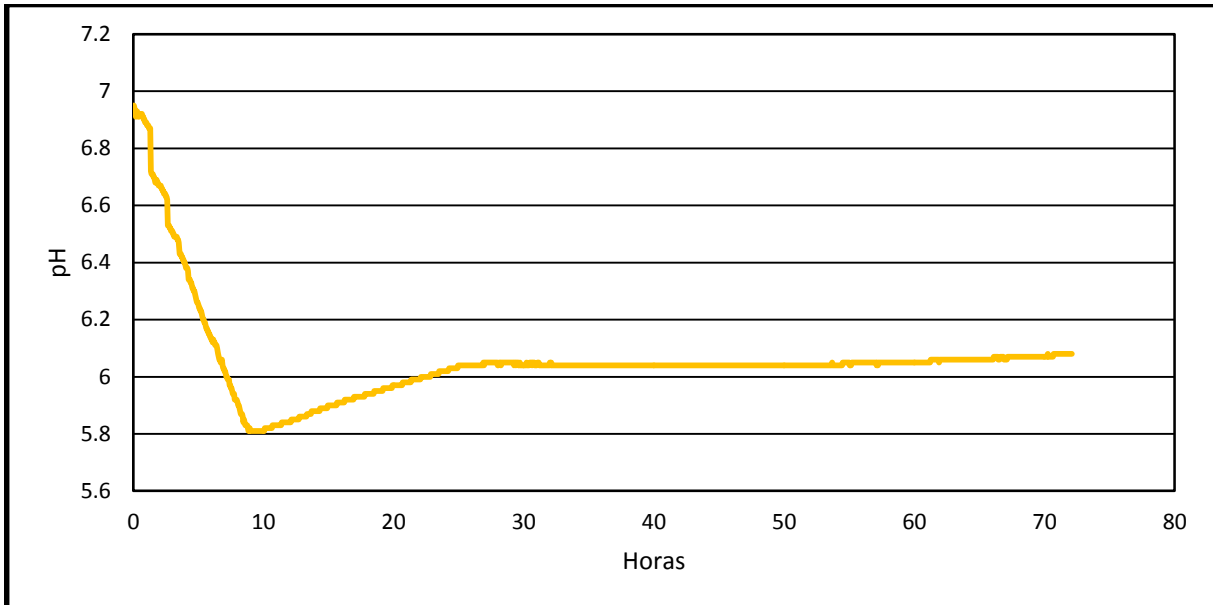
Para poder alimentar el reactor UASB modificado es necesario transformar los residuos alimenticios de un estado sólido a líquido, para lo cual es llevado a cabo un proceso de molienda húmeda con la finalidad de hacer este cambio de fase de acuerdo al siguiente método:

1. Tras ser recolectados los residuos orgánicos es necesario que estos pasen por un proceso de limpieza, en el cual materiales duros como huesos, palillos, servilletas, conchas y empaques de plásticos o metalizados son retirados, esto debido a la lenta o nula biodegradabilidad que presentan dichos materiales.
2. Una vez terminado el proceso de limpieza comienza la etapa de molienda de los residuos, para lo cual se utiliza un equipo insinkerator 55, los residuos comienzan a ser alimentados lentamente agregando agua poco a poco con la finalidad de prevenir el atascamiento de los residuos dentro del sistema de molienda. (de ser necesario recircular los residuos molidos de nuevo al sistema de molienda con la finalidad de obtener un tamaño de partícula adecuado para el proceso anaerobio)
3. Una vez terminada la molienda de los residuos es necesario agregar de 2 a 3 litros extra de agua para asegurar el arrastre completo de los residuos fuera del equipo.
4. El resultado de la molienda es un concentrado de materia orgánica en suspensión, la cual es posible diluir hasta la concentración deseada para la alimentación del reactor anaerobio.
5. Una vez determinada la concentración de alimentación del reactor se realiza una dilución la cual debe tener un volumen final entre los 15 a 20L, adicionalmente una vez obtenida la dilución es necesario llevar a cabo un

proceso de neutralización del pH de dicha solución; para lo cual es necesario añadir hidróxido de calcio (normalmente 15 g son suficientes).

6. Posterior a la neutralización del sustrato se procede al proceso de alimentación del reactor, el cual es llevado a cabo por gravedad, en la parte superior del sistema es colocado el sistema de alimentación dentro del cual se vierte el sustrato, antes de comenzar con la alimentación es necesario un proceso de purga el cual se realiza al abrir la válvula de salida del sistema, tras lo cual comienza la alimentación del sistema.
7. Una vez finalizada la alimentación y la usencia de efluente las válvulas de entra y salida son cerradas con lo cual se aseguran las condiciones anóxicas dentro del sistema.
8. El proceso de medición de biogás generado se basa en el principio de desplazamiento de volumen; del reactor anaerobio sale una manguera la cual transporta el biogás generado hasta un tanque graduado, el cual mediante desplazamiento de agua registra el volumen de biogás generado (los tanques de medición necesitan ser purgados del biogás y ser rellenados con agua con forme se requiera).

Anexo II Evaluación del comportamiento del pH posterior a la alimentación del reactor UASB modificado



Gráfica 7 Seguimiento de 72 horas del pH del reactor UASB modificado posterior a su alimentación.

Con la finalidad de tener un mayor entendimiento del comportamiento del pH dentro del reactor UASB modificado posterior a la alimentación del sustrato se realizó un seguimiento de 72 horas, tiempo implementado entre cada alimentación.

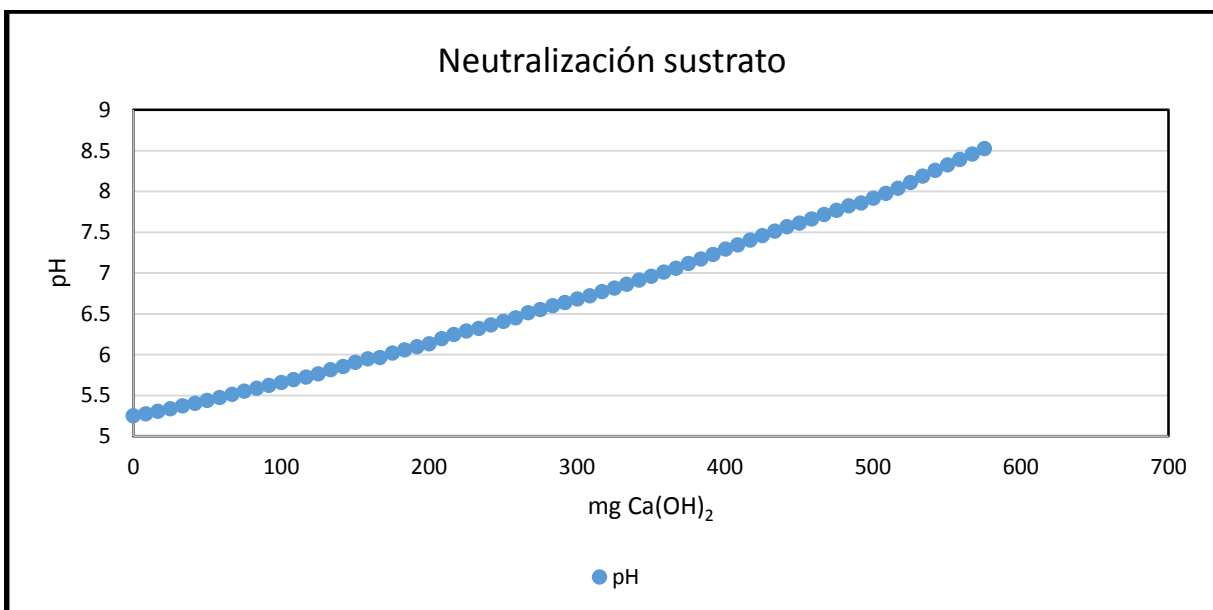
La gráfica nos indica que esencialmente los procesos de hidrolisis y generación de ácidos se genera durante las 10 primeras horas, es en base al descenso abrupto que presenta la gráfica, posteriormente el consumo de los AGVs generados en el sistema por parte de las bacterias metanogénicas conlleva al aumento gradual del pH el cual se estabiliza cerca de las 6 unidades de potencial hidrógeno.

En base a estos resultados es posible decir que la mayor parte del proceso de degradación y transformación de la materia orgánica se da durante las primeras 24 h, posteriormente la estabilización de las reacciones de generación y consumo de AGVs es lo que conlleva a la estabilización del sistema en cuanto a pH.

Anexo III Determinación de la cantidad de hidróxido de calcio para la neutralización del pH del sustrato

Para la determinación de la cantidad necesaria de hidróxido de calcio para llevar a cabo la neutralización del sustrato se preparó 1 litro de sustrato con una carga orgánica de 15 g/L el cual mediante una valoración con una solución saturada de hidróxido de calcio (1.6 g/L) al ir añadiendo la solución de hidróxido de calcio se determinaba al mismo tiempo el pH de la solución, este seguimiento se realizó por triplicado hasta superar el pH de 8.5 para asegurar la neutralización del sustrato.

En general se determinó que para poder neutralizar 1 L de sustrato con una carga orgánica de 15000 mg DQO/L es necesario añadir una cantidad de 400 mg de hidróxido de calcio.



Gráfica 8 Neutralización del pH del sustrato mediante una solución de Ca(OH)₂ saturada.