

Simulación de la Hidrodinámica en un Biodigestor Tipo Salchicha de Bajo Costo

Resumen—

La biodigestión anaeróbica para la producción de biogás es un proceso sostenible de gran impacto en el área energética; sin embargo, es poco aprovechada en el país. A raíz de ello, en este trabajo se realiza un estudio de un biodigestor estándar comercial con mejoras en su estructura, con el propósito de aumentar la eficiencia en la producción de biogás. Primero se evalúa la hidrodinámica del biodigestor estándar, para así proponer configuraciones que mejoren el grado de agitación y también eliminen la mayor cantidad de puntos muertos (zonas sin agitación), esto mediante el uso de un software de simulación para mecánica de fluidos “Simulation CFD” y un software especial para la creación de las geometrías 3D “Fusion 360”, ambos forman parte de la compañía Autodesk. Las configuraciones propuestas son: biodigestor relleno con anillos fijos, biodigestor con la instalación de nozzles cerca de la tubería de entrada y la tubería de salida del biodigestor, biodigestor con tuberías cortas de entrada y salida, biodigestor con paletas cilíndricas colocadas sobre un eje que rota a una velocidad de 7 rpm y un biodigestor con paletas planas con las mismas características que las paletas cilíndricas.

Previo a la simulación se realizaron en el laboratorio pruebas BMP (ASTM 2170-2001) a diferentes sustratos con el propósito de encontrar una alimentación adecuada, y posteriormente medir viscosidad y densidad de la mezcla sustrato e inóculo, aplicándole posteriormente el valor de estos parámetros al fluido en la simulación. También se validó parte de los resultados construyendo un biodigestor estándar y un biodigestor con anillos internos a escala laboratorio y luego comparando con los resultados de la simulación.

La simulación 3D mostró que el biodigestor con paletas cilíndricas mejora en mayor medida el grado de agitación y en segundo lugar el biodigestor con tuberías cortas. En cambio, el biodigestor con anillos internos no mejora el grado de agitación.

C. A. Monterrosa, P. R. Gómez, G. J. Carranza, E. H. Ramos.

Índice de términos— Agitación, Bajo costo, Biodigestor Tipo Salchicha, Configuraciones, Eficiencia, Lodos Activados, Producción de Biogás, Puntos muertos, Simulación 3D, Velocidad del fluido.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de biometano ha tomado mayor relevancia en las últimas décadas por ser una fuente de bioenergía sostenible. El biometano (o biogás) se genera por la degradación de biomasa a través de microorganismos que actúan en ausencia de oxígeno. Para la producción de biogás se han ideado distintos tipos de biodigestores con el fin de llevar a cabo una biodigestión anaerobia de manera eficiente. Sin embargo, el elevado costo de los biodigestores de estructura fija resulta un limitante para pequeños agricultores de zonas rurales, lo cual hace este tipo de energía menos accesible [1]. Es de esta manera que surgen los biodigestores elaborados con materiales flexibles y de menor costos, como el biodigestor tipo salchicha, el cual consiste en una bolsa de polietileno sujeta por los extremos y cuyo dimensionamiento, construcción y principio de operación es bastante sencillo [2].

El biodigestor tipo salchicha funciona por medio equilibrio hidráulico entre su entrada y salida; no obstante, no se ha indagado profundamente sobre el tipo y magnitud de agitación dentro del mismo, a pesar que la agitación es un factor de operación que influye directamente en la producción de biometano [3]. Si la agitación es deficiente, el sustrato y calor no es transferido de manera adecuada a los microorganismos y además, se corre el riesgo de formación de incrustaciones; así como, deposición de sólidos al no haber uniformidad del sustrato dentro del biodigestor [3]. Como consecuencia de todo lo expuesto, los objetivos de este trabajo son: a) simular por medio de un software CFD, la hidrodinámica de un biodigestor comercial tipo salchicha estándar, b) identificar las zonas con mínima y máxima agitación, c) probar diferentes

configuraciones (mecanismos de bajo costo) para mejorar la agitación del biodigestor y eficiencia en la producción de biogás, d) validar parte de los resultados de la simulación por comparación con ensayos a escala de laboratorio.

La selección de los métodos de agitación y sus respectivas configuraciones, se describen en el apartado de materiales y métodos; así como, los software y parámetros utilizados para las simulaciones realizadas. Además, en este apartado se muestra el procedimiento seguido para la validación de resultados de la simulación por medio de la comparación con modelos a escala laboratorio. En el siguiente apartado se exponen los resultados obtenidos de las simulaciones, tanto para el biodigestor estándar como para las configuraciones evaluadas y los resultados de producción de biogás del modelo a escala laboratorio. Finalmente, se señalan los principales logros de la investigación y las posibles mejoras para futuros estudios en esta área.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Selección de Configuraciones del Biodigestor

Para la selección del método de agitación y su respectiva configuración del biodigestor tipo salchicha se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: 1. Bajo costo de operación, 2. Aumento de turbulencia dentro del biodigestor, 3. Disminución de zonas muertas dentro del biodigestor, 4. Aumento en la eficiencia de producción de biogás. La primera configuración propuesta consta de anillos fijos dentro del biodigestor, cuyo objetivo es redireccionar el flujo, generando distintos perfiles de velocidad y zonas de turbulencia, además de crear una biopelícula. Esta configuración se muestra en la Fig. 1, a lo largo

del biodigestor se colocaron 130 anillos plásticos fijos de 10 cm de diámetro y 10 cm de largo, estos parámetros se calcularon en base al estudio realizado por Herrero (2014) [4].

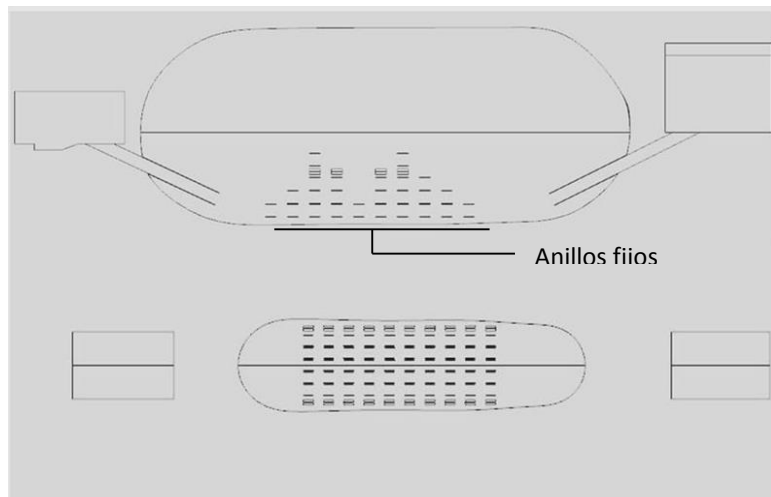


Fig. 1 Vista lateral y superior de biodigestor tubular con anillos de plástico fijos. [Elaboración propia].

En la segunda configuración se propuso colocar dos nozzles (que introducen sustrato) cerca de la tubería de entrada del biodigestor y dos nozzles, o boquillas, (que extraen sustrato del biodigestor) en la zona de salida del mismo; como se muestra en la Fig. 2. La velocidad de flujo en cada nozzle se fijó en 1.8 m/s. Los parámetros de geometría y velocidad se calcularon en base a un estudio realizado por AWWA Research Foundation [5]. Por medio de los nozzles se genera un chorro inducido dentro del biodigestor mejorando la mezcla en zonas específicas en las cuales no haya actividad biológica de gran magnitud.

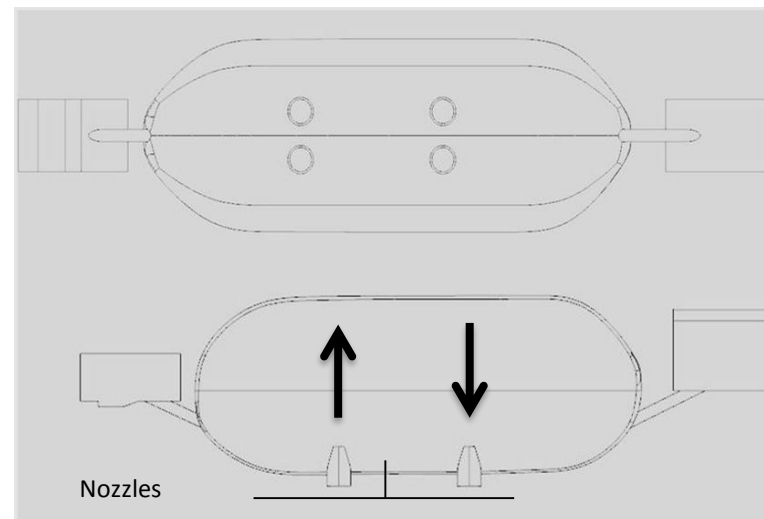


Fig. 2 Vistas inferior y lateral respectivamente del biodigestor tubular con nozzles. [Elaboración propia].

La forma en la que el fluido ingresa o sale del biodigestor, puede repercutir en el perfil de velocidades y la mezcla de volúmenes de sustrato. De esta manera, tanto la longitud de la tubería como el ángulo al que se encuentre ubicada son factores que determinan el comportamiento del fluido dentro del biodigestor al momento de carga o descarga del mismo [6]. Por lo tanto, en la tercera propuesta de configuración se determinó que las tuberías de entrada y de salida debían tener una longitud corta como se observa en la Fig. 3, con el extremo de salida de líquido cercano a la bolsa del biodigestor para que de esta manera se genere turbulencia en el área cercana a la entrada y salida del biodigestor; ya que si las tuberías son muy largas, podrían generarse zonas muertas en el interior del biodigestor por debajo de las mismas.

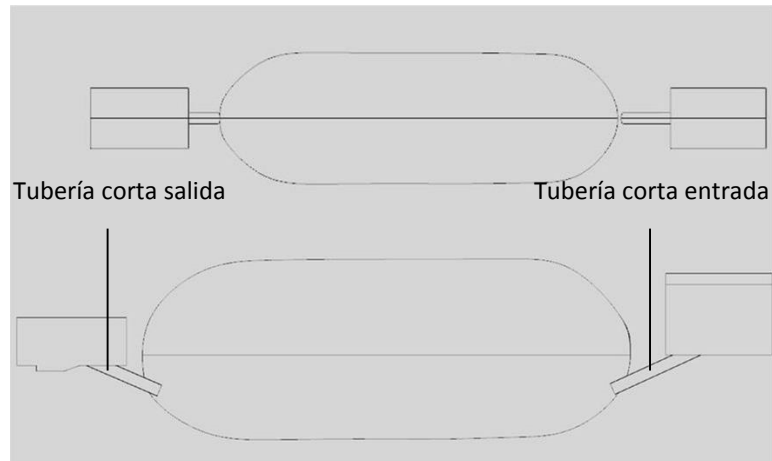


Fig. 3 Vista superior y lateral de biodigestor tubular con tuberías cortas de entrada y salida. [Elaboración propia].

La cuarta configuración propuesta se basa en la agitación completa del sustrato dentro del biodigestor, ya que de esta manera se mantiene una mezcla apropiada entre el flujo de entrada de sustrato y las bacterias que se encuentran dentro del biodigestor [7]. Se colocó un agitador mecánico a lo largo de todo el biodigestor, el cual se compone de un eje principal con paletas cilíndricas ubicadas a ambos extremos del eje a 180° , tal como se observa en la Fig. 4, y una rotación de 7 rpm. De esta manera se obtiene agitación por secciones a lo largo del biodigestor tubular, tal como se especifica en la investigación de biodigestores anaerobios de flujo pistón [8].

En la quinta y última propuesta de configuración se siguieron los mismos parámetros que la anterior con la única diferencia que las paletas giratorias tienen una geometría plana como se muestra en la Fig. 5, para determinar su influencia en el comportamiento del fluido al hacer contacto con el mismo.

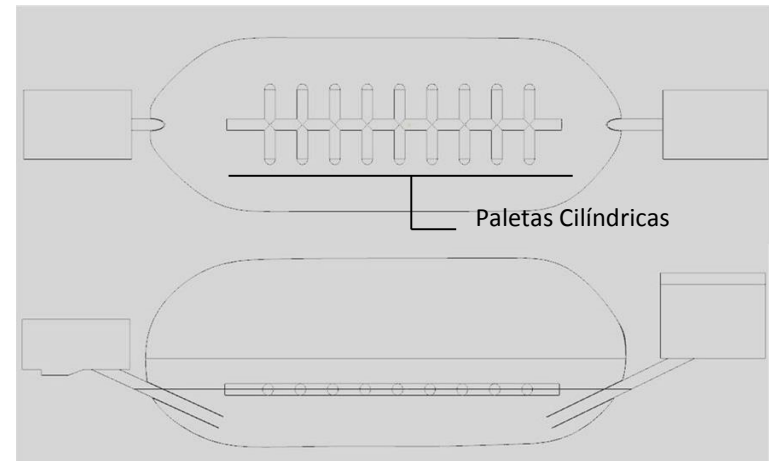


Fig. 4 Vista superior y lateral respectivamente de biodigestor tubular con paletas giratorias cilíndricas. [Elaboración propia].

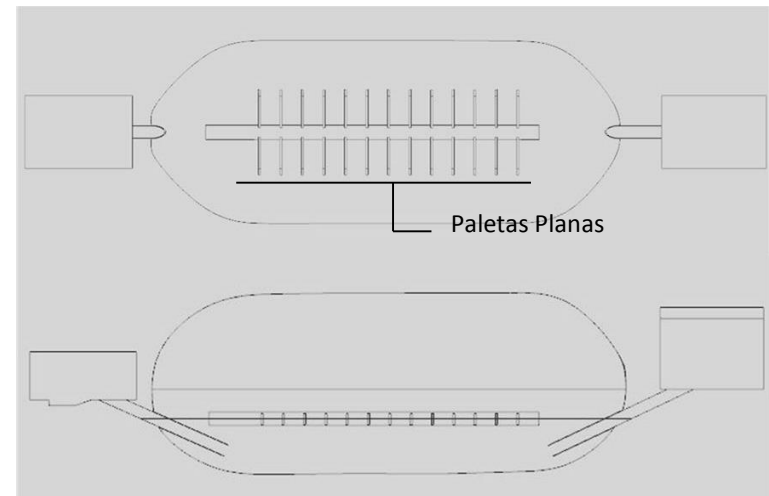


Fig. 5 Esquema de biodigestor tubular con paletas giratorias planas. [Elaboración propia].

La geometría de las configuraciones anteriormente descritas se elaboró con el software Autodesk Fusion 360, al igual que la geometría del biodigestor estándar. Éste se encuentra conformado por un recipiente de entrada, tubería de alimentación, una bolsa tubular de polietileno, tubería de descarga y un recipiente de salida. Algunas de sus dimensiones se muestran en la Fig. 6. La geometría del biodigestor tubular estándar se definió siguiendo los parámetros especificados en el esquema comercial elaborado por una empresa especializada en el diseño de biodigestores.

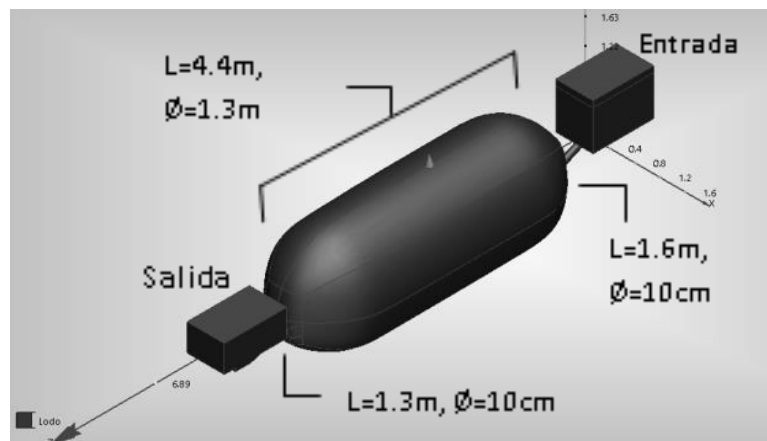


Fig. 6 Modelo estándar completo de biodigestor tubular. [Elaboración propia].

B. Parámetros para la Simulación de la Hidrodinámica

Las simulaciones del biodigestor estándar y sus configuraciones se llevaron a cabo en el software de Autodesk Simulation CFD (Computational Fluid Dynamics), en éste se

fijaron ciertos parámetros y condiciones del fluido, características ambientales, geométricas y otras propias del programa.

Se utilizó el editor de materiales del software para crear un nuevo material al cual se le definieron la densidad y viscosidad medidas de los lodos anaerobios utilizados para la validación de resultados. La densidad a 30°C se estableció en 985.984 Kg/m³ midiéndose con un pignómetro de 27 mL y pesando ese volumen de lodos anaerobios. En cuanto a la viscosidad, se estableció un valor de 0.1776 Pa-s medida en el laboratorio con un viscosímetro de bolas.

En la opción “Condiciones de Frontera” del software, se estableció la presión manométrica de la superficie de salida como cero, ya que la descarga del biodigestor es a la atmósfera. Para las condiciones iniciales de la simulación se estableció que el volumen del biodigestor debe contener un volumen inicial del fluido de trabajo. Además, el depósito de entrada también debe estar lleno con un volumen inicial de fluido. Las zonas correspondientes a estos volúmenes se muestran en la Fig. 7.



Fig. 7 Altura inicial de fluido. [Elaboración propia].

Debido a que el fluido de trabajo (sustrato) se desplaza hacia dentro del biodigestor únicamente por efecto de la gravedad, es necesario establecer el vector de gravedad. Para definir este vector se utilizó la opción "Solve" y dentro de ésta el apartado "Physics", en la opción "Free surface" se determinó un vector de gravedad constante y negativo en la dirección del eje Y (eje vertical).

Para las configuraciones que involucran nozzles y paletas giratorias fue necesario determinar la velocidad a la cual entra o sale el fluido; así como, la velocidad a la cual gira el eje de rotación de las paletas. Para las configuraciones de paletas la velocidad de rotación se determinó a partir de un estudio realizado por Klauke, L. [8]. La velocidad de los nozzles se fijó en 1.8m/s a partir de pruebas realizadas en la simulación. Además, para todas las configuraciones se hizo uso de la malla automática con un tamaño de nodo predeterminado por el programa, con ésta el software realizó los cálculos necesarios para la simulación según el método de elementos finitos.

C. Validación de Resultados a Escala Laboratorio

1. Construcción del Modelo a Escala de Laboratorio

A partir del modelo a escala real comercializado por una empresa especializada en biodigestores, el biodigestor tipo salchicha fue escalado a un menor tamaño para realizar pruebas de laboratorio. Las dimensiones del biodigestor se redujeron en un factor de 10 el cual fue encontrado por el principio de semejanza geométrica. Con las nuevas dimensiones se construyó el biodigestor tipo salchicha estándar. Para ello se selló el plástico tubular de polietileno de acuerdo a las medidas provenientes del dimensionamiento. Luego, se perforó una pequeña ranura en la parte superior del plástico tubular y se le

colocó el conector de manguera, sellándolo bien para evitar cualquier fuga. Las cajas de entrada y salida del biodigestor se elaboraron perforando recipientes plásticos de 500 mL para encajarlos a las tuberías de vidrio y unirlos utilizando Poxilina. El extremo libre de cada una de las tuberías de vidrio se unió al plástico tubular, luego se le colocaron hules para sujetar a ambos y finalmente cinta tapa gotera para sellar cualquier fuga. Este procedimiento se realizó con la tubería de entrada y salida. En la Fig. 8 se muestra el biodigestor construido a escala laboratorio. Además, se elaboró un biodigestor tubular relleno con anillos. Para éste se utilizaron 130 anillos de 1cm de diámetro y de longitud. La configuración utilizada se muestra en la Fig. 8.

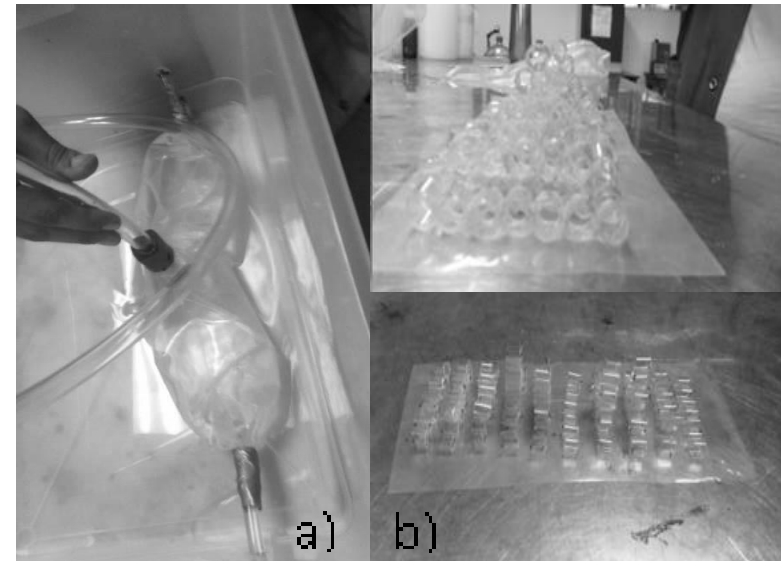


Fig. 8 a) biodigestor tubular construido a escala laboratorio y b) anillos preparados para colocarse en el biodigestor tubular.

Se construyeron dos gasómetros y un sistema de recolección de gas. Se ensambló un sistema de válvulas que permitió controlar el biogás producido en el biodigestor y almacenarlo en el gasómetro. En la Fig. se muestran los gasómetros construidos.



Fig. 9 Gasómetros construidos.

2. Preparación de la Alimentación

La selección de la alimentación para el biodigestor se realizó por medio de pruebas BMP. Las pruebas se realizaron con el objetivo de encontrar una concentración de alimentación adecuada, además de conocer un potencial de generación de biogás del sustrato a distintas concentraciones y el tiempo de retención.

Para las pruebas BMP se optó por la metodología propuesta en ASTM E 2170-2001, al ser comparada en las investigaciones de Angelidaki et al. [9] y Esposito et al. [10], y ser adaptable para el sustrato de leche y el inóculo de lodos anaerobios activados.

Los lodos activados termofílicos se almacenaron en recipientes plásticos de polietileno (1 gal), llenándolos hasta 1 cm antes de la parte superior. Se purgaron con mezcla de gas de N₂ e inmediatamente se sellaron. Todos los recipientes fueron introducidos en una incubadora para poder mantenerlos a una temperatura de 35 °C. Posteriormente estos lodos se utilizaron para preparar las muestras del análisis BMP y alimentación de los biodigestores a escala de laboratorio.

Se prepararon soluciones de NaOH (Reactivo para purificación de biogás) a la concentración necesaria para hacer reaccionar el H₂S y CO₂ presentes en el biogás.

Una vez preparados el lodo y la solución de NaOH, se procedió a preparar 6 muestras con un volumen total a 100 mL. Las mezclas de las muestras se detallan a continuación: 2 muestras con 90 mL de lodos activados, 10 mL de sustituto de leche materna; 2 muestras con 95.5 mL de lodos activados, 4.5 mL de sustituto de leche materna; 1 muestra de blanco con 100 mL de lodos activados; 1 muestra con 90 mL de lodos activados y 10 mL de aguas provenientes de la planta de tratamiento de una empresa de bebidas. Luego, se purgaron cada una de las muestras con gas N₂ por 30 segundos teniendo cuidado de no dejar exceso de presión en cada muestra, este procedimiento se ilustra en la Fig. 10.



Fig. 10 Procedimiento para purgar los gases en cada bote de prueba BMP.

3. Metodología para el Monitoreo de la Producción de Biogás

Para las pruebas BMP, el biogás extraído se introdujo en un bote de vidrio sellado con solución de NaOH y fenolftaleína. Se agitó por algunos minutos con el objetivo de hacer reaccionar el H₂S y CO₂ con el NaOH y de esta forma eliminarlos del biogás. Al finalizar se extrajo el gas remanente en el bote con una jeringa de 60 mL y se tomó nota del volumen, así se pudo calcular el volumen de gas generado por la muestra. Este procedimiento se realizó para cada una de las muestras.

La medición de la calidad de biogás para los biodigestores a escala laboratorio se realizó aplicando el mismo principio de medición empleado para las pruebas BMP. Para la extracción de las muestras se utilizó una sección de tubería conectada al gasómetro y sellada en un extremo con un tapón de hule, una

válvula de bola controla el paso del biogás, como se muestra en la Fig. 11.



Fig. 11 Ajuste hecho al sistema para la extracción de muestras con el objetivo de medir la calidad del biogás.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación del biodigestor estándar se realizó durante 40 segundos (tiempo que tarda en ingresar la alimentación al biodigestor), en este tiempo se produce mezcla en el interior del biodigestor provocada por el ingreso de la alimentación al lado derecho en la Fig. 12, al mismo tiempo un volumen equivalente al de la alimentación sale por el lado izquierdo. Durante el periodo de mezcla, se observó como cambiaba el perfil de velocidades al interior del biodigestor, con el propósito de encontrar el tiempo en donde se observa mayor mezcla en el biodigestor, es decir, el que presente menor cantidad de puntos muertos (regiones con velocidad cercanas a cero). El tiempo encontrado de mayor mezclado fue de 9 segundos el cual se puede observar en la Fig. 12.

En la Fig. 12 también se indica, con un círculo, el área en donde se genera menor mezclado para el tiempo de 9 segundos; y por esta razón dicha área es motivo de análisis para compararla con cada una de las configuraciones propuestas en los modelos y evaluar su capacidad de mejorar la hidrodinámica del biodigestor.

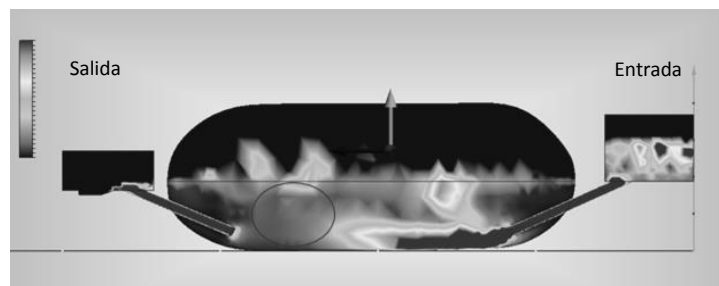


Fig. 12 Plano Transversal Central del biodigestor estándar a 9 s donde se produce el mayor mezclado.

Además, esta área se utilizó como zona de comparación del biodigestor estándar con todas las configuraciones propuestas para el tiempo final de 40 segundos (Fig. 13).

La selección del tiempo final se realizó en un punto donde el mezclado dentro del biodigestor está a punto de desaparecer, luego de haber introducido la alimentación y de extraer el exceso de volumen, así que este tiempo fue un punto de comparación entre todas las configuraciones de biodigestores propuestas utilizando el área que muestra el círculo en la Fig. 13.

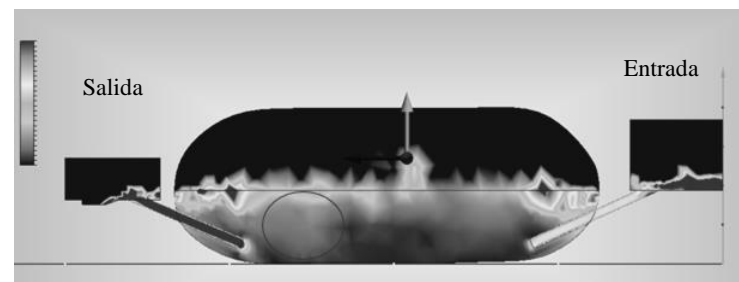


Fig. 13 Plano Transversal Central del biodigestor estándar a 40 s donde se puede analizar el área de menor mezclado señalada por la circunferencia.

Especificados los tiempos y el área a comparar entre el biodigestor estándar y las configuraciones propuestas, este análisis se realizó utilizando los planos que se muestran en la Fig. 14.

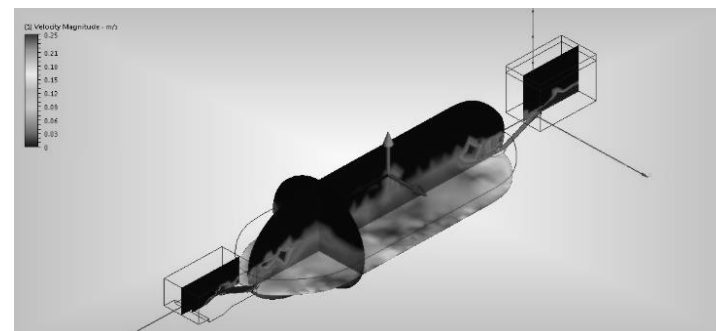


Fig. 14 Planos Transversal Vertical, Transversal Horizontal y Transversal Central que se utilizarán para comparar todas las configuraciones de biodigestores propuestas.

A. Simulación para Modelos Modificados del Biodigestor

Se realizó el análisis de los resultados obtenidos de la simulación del biodigestor estándar, de las configuraciones y la producción y calidad de biogás en los modelos a escala. Se observó que las configuraciones que mejoran en mayor medida la agitación en los 3 planos (X, Y y Z) son, la configuración de paletas cilíndricas, seguida por las configuraciones de nozzles y entradas cortas. Además, se observó que la configuración de anillos impide considerablemente la agitación dentro del biodigestor, en comparación con el biodigestor estándar.

En la simulación del biodigestor estándar se determinó que, a los 9 s, se tiene la mayor área del fluido con alta velocidad, lo cual es un buen parámetro para identificar los puntos donde no se realiza agitación adecuada. Se optó por analizar este tiempo específico para todas las configuraciones en conjunto para evaluar la variación de velocidad entre las mismas. Además, el plano transversal central es el más representativo para el biodigestor estándar, ya que en él se observa una mayor diferencia entre las velocidades de distintas regiones.

Como se observa en la Fig. 15, las gráficas de velocidades presentan un comportamiento decreciente; es decir, a la entrada del biodigestor se tienen mayores velocidades que en la zona de salida. Las configuraciones de nozzles y paletas cilíndricas alcanzan mayores velocidades (en comparación con las del biodigestor estándar) y son las más fluctuantes, lo que sugiere mayor agitación en el fluido. La configuración con entradas cortas alcanza valores de velocidad parecidos a los del estándar; sin embargo, éstos se mantienen en un rango mayor o igual que la configuración de paletas planas. La configuración con valores de velocidad por debajo a los valores del estándar

es la configuración de anillos, por lo cual se puede afirmar que es la que menos favorece a la turbulencia y agitación del fluido.

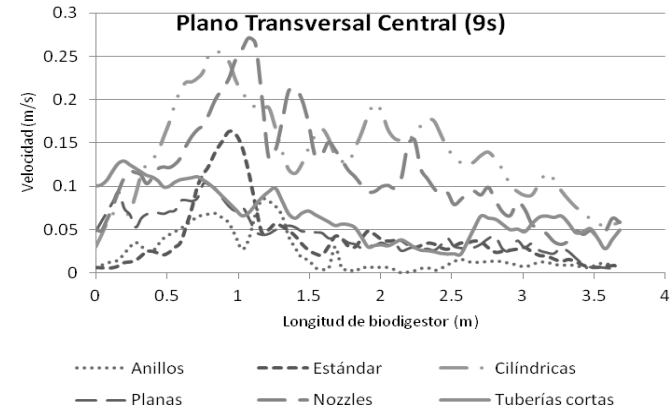


Fig. 15 Gráfica de plano transversal central para biodigestor estándar y cinco distintas configuraciones para tiempo 9s. [Elaboración propia].

La Fig. 16 muestra el comportamiento de cada una de las configuraciones y el biodigestor estándar en un plano transversal vertical (Fig. 14), en ésta se observa que la configuración de anillos es la que muestra menor grado de agitación a lo alto del biodigestor, esto a pesar que posee un máximo entre 0.4 m y 0.52 m donde supera a las demás, pero es incapaz de mantenerse. La configuración de nozzles es la que presenta una agitación más uniforme lo cual se debe a que la ubicación del plano se encuentra cercano a un nozzle que favorece la agitación. La configuración de paletas planas y cilíndricas mantiene una agitación adecuada en los extremos, pero decrece en la parte central debido a que el plano de análisis toca el eje en donde la velocidad es cero. La

configuración de entradas cortas muestra un interés particular al mantener una agitación mayor a la configuración estándar.

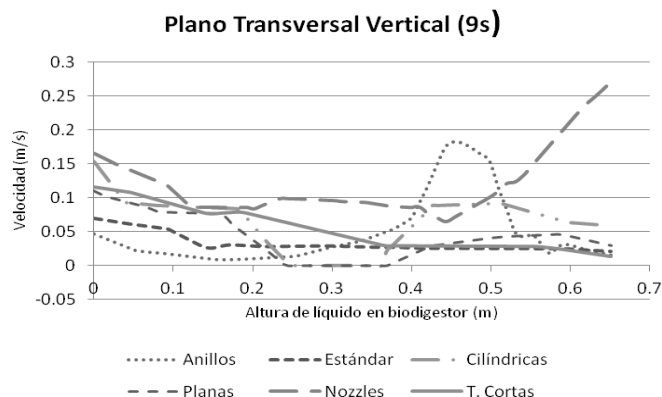


Fig. 16 Gráfica de plano transversal vertical para biodigestor estándar y cinco distintas configuraciones para tiempo 9s. [Elaboración propia].

En la gráfica de la Fig. 17 se muestran valores de velocidad del fluido, presentes a lo ancho del biodigestor tubular, ubicados en el plano transversal horizontal (Fig. 14). Se observa que los valores de velocidad de la configuración de anillos se mantienen muy cercanos a cero y por debajo de los valores correspondientes a la configuración estándar. Le sigue la configuración de paletas planas cuyos valores son bastante próximos a los del estándar. La configuración de tuberías cortas mantiene valores mayores a los de la configuración estándar llegando a alcanzar velocidades cercanas a 0.1 m/s. Las dos configuraciones que muestran mayores velocidades a lo ancho del biodigestor son los nozzles y paletas cilíndricas. La configuración de nozzles llega a valores próximos a 0.14 m/s y la configuración con paletas cilíndricas logra velocidades de

hasta 0.24 m/s; sin embargo, en esta última configuración se observa una caída en la tendencia al llegar cerca de 1m de ancho, esto es debido a que en el tiempo 9s estos puntos, donde se miden los valores de velocidad, se ubican en el área cercana a una de las paletas cilíndricas donde la velocidad del fluido es cero, ya que se trata de un material sólido.

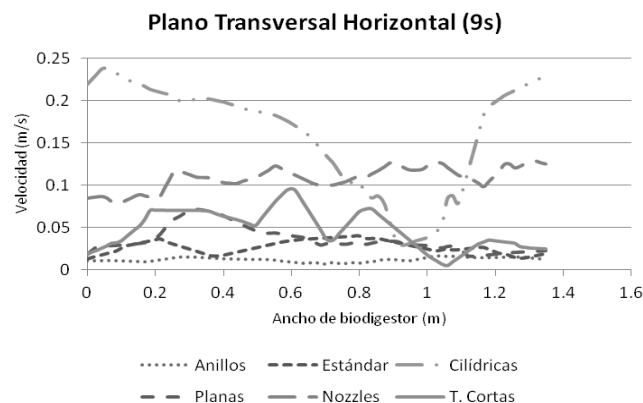


Fig. 17 Gráfica de plano transversal horizontal para biodigestor estándar y cinco distintas configuraciones para tiempo 9s. [Elaboración propia].

El análisis de zonas muertas (con velocidades menores a 0.02 m/s) mostró que la configuración con mayor cantidad de zonas muertas, respecto al biodigestor estándar, fue la de anillos. En cambio, la configuración que presenta menor cantidad de zonas muertas (y por lo tanto mejor agitación) fue la de paletas cilíndricas. Además, se encontró que la configuración que no añade costo económico alguno es la de entradas y salidas recortadas, sin embargo, provoca una mayor agitación que el modelo estándar. Este cambio introduce una mejora en la

agitación, en comparación con el modelo estándar de biodigestor que actualmente es comercializado. La Fig. 18 y Fig. 19 muestran, las zonas muertas a 9 y 40 segundos para: (A) Biodigestor estándar, (B) Biodigestor con anillos, (C) Nozzles, (D) Entradas cortas, (E) Paletas tubulares y (F) Paletas palanas, respectivamente.

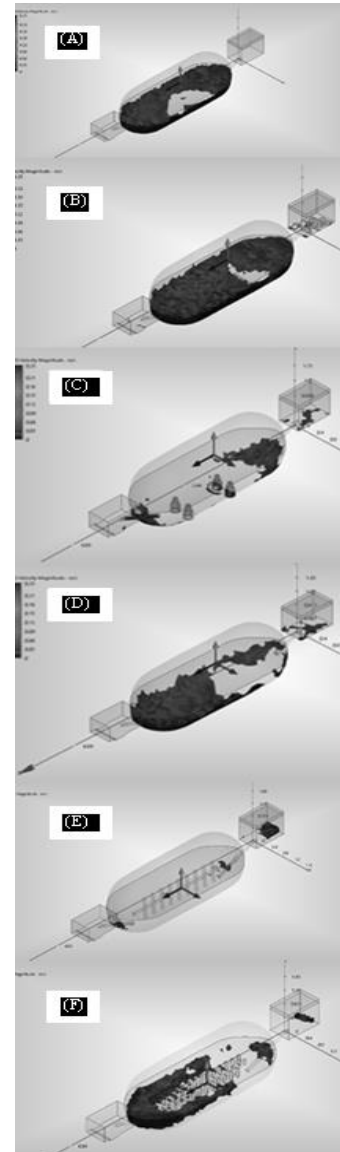
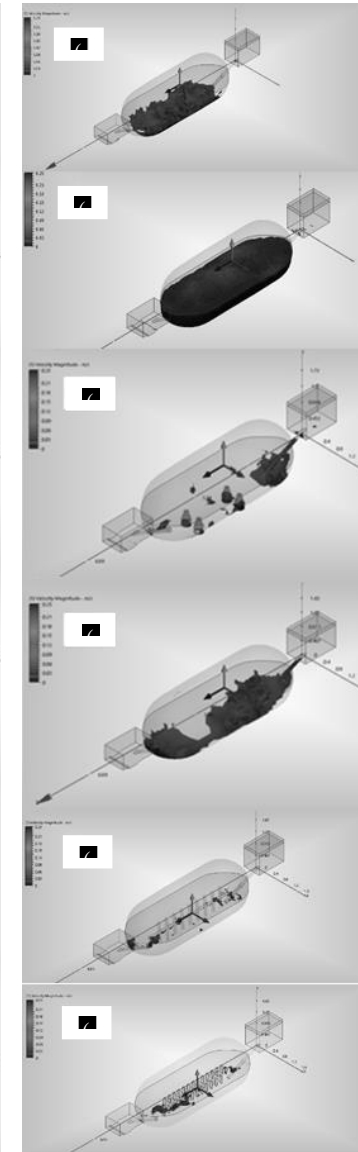


Fig. 18 Zonas Muertas a 9s



.Fig. 19 Zonas Muertas a 40s.

B. Producción de Biogás en Modelos de Laboratorio.

La producción de biogás para los modelos a escala de laboratorio fue diferente, en el biodigestor con la configuración de anillos, 266 ml, fue menor a la del biodigestor sin modificación, 665.2 ml. Esto concuerda con lo obtenido en la simulación ya que para la configuración de anillos la agitación predicha por la simulación es menor y por lo tanto la producción de biogás debería ser menor, pero otros factores, como la caída del pH pudieron contribuir a una baja producción de biogás.

Los aportes hechos por este trabajo al área académica están relacionados con el uso del software CFD con potencial para mejorar el aprendizaje y sentar bases para nuevas investigaciones orientadas a la solución de problemas en la industria y en simulación 3D.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación de la hidrodinámica de un biodigestor tipo salchicha estándar indican que el momento de mayor grado de mezclado y agitación es a los 9 segundos de iniciada la carga. Considerando este tiempo como punto de referencia, se identificó que la región de menor agitación (con velocidades menores a 0.02 m/s) dentro del volumen del biodigestor es la parte superior de la tubería de entrada y de salida. Por otro lado, en la región central-inferior del biodigestor se genera el grado más elevado de agitación, con una velocidad máxima de 1.1 m/s.

Los resultados muestran que los biodigestores domésticos tipo salchicha (como el modelo estándar estudiado en este trabajo) no permiten un grado de agitación adecuado, provocando una eficiencia relativamente baja en la producción de biogás. Sin embargo, el análisis del biodigestor tipo salchicha estándar resultó una base para comparar el grado de agitación en las configuraciones propuestas, de las cuales la que presentó un mayor grado de agitación (con menos puntos muertos) fue el biodigestor con aspas cilíndricas la cual hace uso de un sencillo mecanismo de movimiento. En esta configuración también se resalta el hecho de que la mayoría de sus puntos presentaron un mayor grado de agitación uniforme con respecto al biodigestor estándar.

Otro resultado relevante es la mejora en el grado de agitación del sustrato dentro del biodigestor debido a la configuración de tuberías cortas (recorte de los tubos de alimentación y descarga), aumentando la eficiencia en la producción de biogás (sin incrementar los costos de fabricación) y resultando en un mejor aprovechamiento de la biomasa. Se comprobó, a nivel de laboratorio, que el biodigestor con anillos fijos disminuyó la producción de biogás respecto al estándar, lo cual corresponde con los resultados de la simulación, en los cuales se pudo apreciar que el grado de agitación fue menor que el del biodigestor estándar, mostrando de esta forma que un menor grado de agitación contribuye en una reducción de eficiencia en la producción de biogás. Sin embargo, un posible cambio en la configuración espacial y cantidad de anillos pueda mejorar la agitación y la eficiencia en la producción de biogás, por lo que es necesario más pruebas en este sentido.

V. REFERENCIAS

- [1] A. Bautista Buhigas, Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos, Estelí, Nicaragua: Leganés, 2010.
- [2] J. Martí Herrero, BIODIGESTORES FAMILIARES, GUÍA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACIÓN, La Paz, Bolivia: Cooperación Técnica Alemana GTZ- Energía, 2008.
- [3] H. D. & S. J. P. Monteith, "Mixing Efficiencies in Full-Scale Anaerobic Digesters by Tracer Methods", Water Pollution Control Federation , 1981.
- [4] J. A. R. R. M. A. L. C. R. & C. J. Martí-Herrero, "Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions", ELSEVIER, Viacha, Bolivia, 2014.
- [5] P. J. T. X. L. S. S. F. & D. M. Roberts, "Mixing in Water Storage Tanks", AWWA Research Foundation, 2005.
- [6] A. B. P. A. & d. M. I. V. Mujal i Colilles, "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE MEZCLA EN DEPÓSITOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA", Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2011.
- [7] A. M. Sibaja, "Observabilidad y observadores. Estudio orientado a hacia el diagnóstico de fallas en reactores biológicos", Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Departamento de Electrónica, Cuernavaca, Morelos, México, 2011.
- [8] L. K. K. L. M. G. T. & W. M. Klauke, "CFD investigation of the flow characteristics of a plug flow anaerobic digester for lignocellulosic biomass methanisation", World Congress on Anaerobic Digestion: Recovering (Bio) Resources for the World, Santiago de Compostela, España, 2013.
- [9] I. A. M. B. D. C. J. G. A. K. S. V. L. J. Angelidaki, "Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic waste and energy crops: a proposed protocol for batch assay", IWA, 2009.
- [10] G. F. L. L. F. P. A. & P. F. Esposito, "Bio-Methane Potential test to measure the biogas production form the digestion and Co-digestion of complex organic substrates", The open enviromental engineering journal, pp. 1-8, 2012.