



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**Estudio del comportamiento hidrodinámico y biológico de un RAFA para la
remoción de materia orgánica empleando energía renovable**

MAESTRÍA EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

Tesis que presenta

Ing. Itzel Alejandra Hernández Rodríguez.

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias (Energía y Medio Ambiente).

Director: Dr. Ricardo Beristain Cardoso

Co-Director: Dr. Alejandro Mendoza Reséndiz

Asesor: M. en C. Jorge López Ortega.

Marzo de 2018.

Agradecimientos

Infinitas gracias a mis padres Eva y Abel por acompañarme, apoyarme, impulsarme y brindarme su cariño en cada proyecto que he emprendido.

A Jorge, Lau y Abel por su amor y apoyo incondicional.

Al Dr. Ricardo Beristain, Dr. Alejandro Mendoza y M. en C. Jorge López por su guía, orientación y disposición a compartir sus conocimientos.

Contenido

Resumen	3
Abstract	4
1. Introducción.....	5
2. Marco Conceptual	5
2.1 Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	5
2.2 Digestión Anaerobia.....	6
2.2.1 Comunidades microbianas	7
2.2.2 Factores que afectan la digestión anaerobia.....	8
2.3. Hidrodinámica.....	9
2.3.1 Hidrodinámica en los reactores biológicos	10
2.4. Sistemas de Control	12
2.4.1 Sistemas de Control	12
2.4.2 Sistemas de control en Lazo Cerrado.....	12
2.4.3 Sistemas de control en lazo abierto.....	13
2.4.3 Acción de Control de dos posiciones On/Off	13
2.4.4 Sistema electrónico de control	13
2.4.5 Sensores	13
3.7 Actuadores	13
3. Antecedentes.....	14
3.1 Evaluación del efecto de la temperatura en reactores RAFA.....	14
3.2 Evaluación del comportamiento hidrodinámico en reactores RAFA	17
3.3 Control y automatización en reactores RAFA.....	20
4. Justificación.....	22
5. Pregunta de Investigación	22
6. Objetivos.....	22
7. Hipótesis	23
8. Metodología	23
8.1 Estudio de la Hidrodinámica del RAFA.....	23
8.2 Sistema de Control y Automatización del RAFA	24
8.2.1 Sistema electrónico control de temperatura.....	25
8.2.2 Sistema electrónico de lectura de gas metano.....	30
8.2.3 Sistema de Monitoreo por computadora	31
8.3 Estudio Biológico en el RAFA	34
8.3.1 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	34
8.3.2 Inóculo, medio de cultivo y operación del reactor RAFA	34

9. Resultados y discusión	34
9.1 Simulación Hidrodinámica	34
9.1.1 Modelación del comportamiento hidrodinámico a 20°C	35
9.1.2 Modelación hidrodinámica a 30°C.....	41
9.1.3 Discusión del comportamiento hidrodinámico	46
9.1.2 Comparación del TRH real y el teórico de 4h en la modelación hidrodinámica a 20°C.....	48
9.2 Control y Automatización	52
9.3 Operación y Evaluación de la temperatura en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	55
10. Conclusiones.....	58
11. Bibliografía.....	60
12. Anexos	63
12.1 Programa comentado	63
12.2 Programa comentado MATLAB	64

Resumen

Los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA) presentan diversas ventajas para la depuración de aguas residuales como alta eficiencia en la remoción de contaminantes, bajos costos de construcción, operación y mantenimiento, sin embargo, la depuración mediante este proceso está condicionada al control de factores como la temperatura, ya que para obtener altas eficiencias se requiere una temperatura de operación entre 30 y 35°C, lo que limita el uso de estos reactores a zonas de clima cálido. Otro factor importante a considerar es el comportamiento hidrodinámico que se desarrolla en el reactor, puesto que este determina el contacto entre el agua residual y la biomasa, lo cual impacta en la eficiencia de remoción.

Para evaluar el efecto de la temperatura en los reactores RAFA y para implementar este tipo de reactores en regiones con temperatura promedio de 12 ± 2 °C, se empleó un calentador solar como fuente de energía renovable y un sistema de control de temperatura automatizado para obtener las condiciones ambientales adecuadas para la digestión anaerobia dentro del reactor RAFA. En el presente trabajo el sistema de control de temperatura fue automatizado usando un control on-off el cual permitió exitosamente la regulación de la temperatura dentro del reactor.

El reactor fue evaluado en cuatro etapas; monitoreando la DQO, la producción de metano, el pH y la temperatura. En las etapas I y II el reactor fue operado con agua sintética a un TRH de 24 h, y dos temperaturas (19 y 30 °C), alcanzándose eficiencias de remoción de DQO de $85 \pm 3\%$ y $95 \pm 3\%$, respectivamente. El incremento de la temperatura mejoró las eficiencias de remoción de DQO, aproximadamente en un 15%. La temperatura también impactó positivamente la producción de metano, ya que esta incrementó de 27 a 39 ml CH₄/h, respectivamente. En las etapas III y IV el reactor fue alimentado con agua residual industrial a un TRH de 24 h y dos temperaturas (22 y 30 °C). En la primera temperatura evaluada, se alcanzó una eficiencia de remoción de DQO de $20 \pm 2\%$ con una producción de metano de 7 ± 3 ml CH₄/h. Finalmente, en la última etapa, a una temperatura de 30 °C, aumentó la eficiencia de remoción de DQO, siendo de $48 \pm 13\%$ con una producción de metano de 20 ± 3 ml CH₄/h. En este caso el incremento de la temperatura también favoreció la depuración de un agua residual industrial de composición química altamente compleja.

El estudio hidrodinámico en el RAFA se evaluó por medio del método CFD (Computational Fluid Dynamics) a través de simulaciones en las que se varió el TRH, temperatura e interacción del biogás. En las simulaciones que se consideró una temperatura de 20°C, TRH de 4 y 24 h, y ausencia de biogás, se observó un comportamiento hidrodinámico similar al tipo pistón. En la simulación con un TRH de 24 h y una temperatura de 30 °C y ausencia de biogás, se observó el mismo comportamiento hidrodinámico. Sin embargo, en el escenario en el que el TRH fue de 4 h y una temperatura de 30 °C, en ausencia de biogás, se observaron recirculaciones y canalizaciones internas. Por otro lado, las simulaciones también se llevaron a cabo considerando la producción de biogás en los TRH de 4 y 24 h, con temperaturas de 20 y 30 °C. Los resultados de las simulaciones indicaron que la presencia de biogás cambió significativamente el comportamiento hidrodinámico, siendo ahora el comportamiento de tipo mezclado.

Abstract

The Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors have several advantages for the wastewater treatment owing to the high efficiency in the pollutants removal, low construction costs, operation and maintenance, however, the wastewater purification by this biological process is conditioned to the temperature, since it requires temperatures between 30 and 35 °C for achieving high removal efficiencies. The implementation of a high temperature control in wastewater treatment plants increases operating costs, thus limiting the use of this type of reactors in warm zones. Another important factor to consider is the hydrodynamic behavior inside the reactor, which determines the contact between residual water and biomass; this contact is relevant for getting high removal efficiencies.

In order to evaluate the effect of temperature on the UASB reactor and to implement this type of reactors in regions with average temperature of 12 ± 2 °C, a solar heater as renewable energy source and automated temperature control system were used in order to obtain ideal environmental conditions for the anaerobic digestion within the UASB reactor. In the present work the temperature system control was automated using the on-off control allowing successfully the regulation of temperature around 30 °C inside the reactor.

The reactor was performed in four stages monitoring COD, methane production, pH and temperature. In stages I and II, reactor was operated with synthetic water at HRT of 24 h and two temperatures (19 and 30 °C), achieving COD removal efficiencies of $85 \pm 3\%$ and $95 \pm 3\%$, respectively. The increment of temperature improved the COD removal efficiencies approximately 15%. The temperature also impacted positively the methane production, since it passed from 27 to 39 ml CH₄/h, respectively. In stages III and IV, the reactor was feed with industrial wastewater at HRT of 24 h and two temperatures (22 and 30 °C). At the first temperature evaluated, the COD removal efficiency was of $20 \pm 2\%$ with methane production of 7 ± 3 ml CH₄/h. After that the temperature was increased up to 30 °C, achieving a COD removal efficiency of $48 \pm 13\%$ with methane production of 20 ± 3 ml CH₄/h. In this case the increment of temperature also favored the depuration of the industrial wastewater of complex chemical composition.

The hydrodynamic study was evaluated through the Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The variables like HRT, temperature and biogas were evaluated in the program. The simulation results at 20 °C, HRT of 4 and 24 h and without biogas showed that the hydrodynamic behavior was resembling of piston-type. Similar results were observed at HRT of 24 h and 30 °C. Nonetheless, at HRT of 4h and 30 °C, channeling and internal recirculation was observed. The simulations also were carried out considering the biogas production at HRT of 4 and 2 h, and 20 and 30 °C. The simulation results pointed out that the presence of biogas changed significantly the hydrodynamic behavior, being now of mixing-type.

1. Introducción

El agua es reconocida como un recurso finito indispensable para la salud pública, los ecosistemas, la biodiversidad, la producción de alimentos, la industria, la energía y el desarrollo económico, dada la importancia, es considerada como un recurso estratégico para el desarrollo de los países. Sin embargo, en la fabricación de bienes y servicios se generan aguas residuales, debido a que después de pasar por algún proceso o un cierto uso adquieren sustancias que les confieren propiedades perjudiciales para la salud y que necesitan ser removidas antes de ser descargadas en un cuerpo receptor.

Las aguas residuales son generadas en grandes volúmenes como resultado de las actividades domésticas, municipales e industriales y contienen una carga contaminante diversa. En México existe una descarga de 443.7 metros cúbicos por segundo de aguas residuales municipales e industriales, de los cuales 229.1 m³/s son municipales y 214.6 m³/s industriales (CNA y SEMARNAT, 2015).

El tratamiento de aguas residuales implica la remoción de los contaminantes y resulta indispensable debido a que la falta de tratamiento puede derivar en la transmisión hídrica de agentes patógenos causando enfermedades tales como hepatitis viral, fiebre tifoidea, cólera y disentería, también existen riesgos asociados a afecciones resultantes de la exposición a componentes químicos como flúor, arsénico o nitratos contenidos en las aguas residuales, por tanto el tratamiento de aguas residuales busca prevenir problemas de salud pública.

En México en el año 2015 se registraron 2,477 plantas de tratamiento municipales, que tratan un caudal de 120.9 m³/s, lo que representa el 53.0% del total de las aguas residuales municipales que se generan a nivel nacional. Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales son los lodos activados y las lagunas de estabilización (CNA y SEMARNAT, 2016).

En cuanto a las aguas residuales industriales, en 2015 se trataron 70.5 m³/s de aguas residuales en 2,832 plantas industriales de un total de 214.6 m³/s, lo que representa un volumen tratado del 32.85%. Los tratamientos de aguas residuales industriales, más usuales son el tratamiento primario, que tiene el objetivo de ajustar el pH y remover materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión y el tratamiento secundario que tiene el objetivo de remover materiales orgánicos coloidales y disueltos (CNA y SEMARNAT, 2016).

2. Marco Conceptual

2.1 Tipos de tratamiento de aguas residuales

Existen diversos métodos de tratamiento de aguas residuales, la elección del sistema de tratamiento depende de factores tales como las características del agua a tratar, el tipo de

contaminantes, los costos de operación y el mantenimiento del sistema. Los diferentes tipos de tratamiento implican procesos físicos, fisicoquímicos y biológicos.

En general los niveles de tratamiento se clasifican en:

- ✓ Tratamiento preliminar, que tiene como objetivo la eliminación de residuos sólidos, arenas y grasas fácilmente separables.
- ✓ Tratamiento primario, comprende procesos de sedimentación y tamizado.
- ✓ Tratamiento secundario, a través de procesos biológicos se realiza una remoción de la materia orgánica.
- ✓ Tratamiento terciario, se remueven los sólidos suspendidos residuales del proceso secundario a través de medios de filtración. En este nivel también se realiza la desinfección (Metcalf & Eddy, 2003).

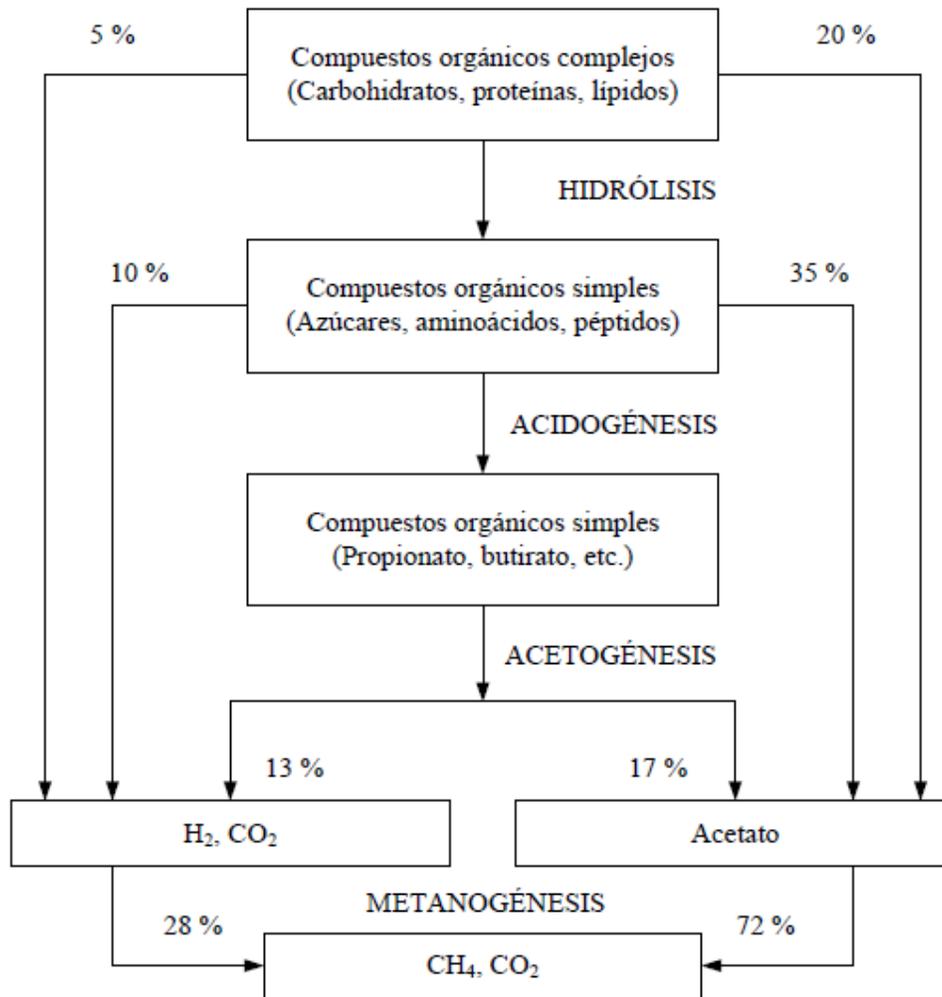
2.2 Digestión Anaerobia

Los tratamientos secundarios utilizan las reacciones biológicas realizadas por microorganismos para disminuir el contenido de materia orgánica y nutrientes del agua residual. La digestión anaerobia implica una serie de procesos bioquímicos realizados por microorganismos en ausencia de oxígeno. Durante el proceso de degradación anaerobia un gran número de microorganismos trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas llamadas hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Esquema 1). En cada una de estas etapas intervienen un número significativo de grupos de especies particulares. Por ejemplo, en la fase de hidrólisis los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas y se hace una conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.

En la etapa de acidogénesis, los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico.

En la acetogénesis, los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO_2 y finalmente, en la última fase de la metanogénesis, el CH_4 es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H_2 y CO_2 , pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol. El rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible.

Las bacterias metanogénicas son el grupo biológico más sensible en el proceso dada su baja velocidad de crecimiento y sus requerimientos de bajo potencial redox y de pH, así como su inhibición por presencia de oxígeno molecular (Grady *et al.*, 2011).



Esquema 1. Digestión anaerobia (Speece, 1996).

2.2.1 Comunidades microbianas

En la digestión anaerobia se espera la presencia de las siguientes bacterias:

- Fase no metanogénica: *Lactobacillus*, *Spirillum*, *Klebsiella*, *Actinomyces*, *Vibrio*, *Corynebacterium*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sarcina*, *Aerobacter*, *Bacteroides*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Sphaerophorus*, *Fusobacterium*, *Veillonella*, *Peptococcus*, *Deulfovibrio* (Lorenzo et al., 2005).
- Fase Metanogénica: *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter*, *Methanomicrobium* (Lorenzo et al., 2005).

Las comunidades microbianas son principalmente procariontes con miembros de Bacteria y Arqueas, aunque se han observado protistas y hongos en algunas circunstancias. La interacción entre Bacteria y Arqueas es fundamental para el éxito del funcionamiento de las comunidades metanogénicas (Grady *et al.*, 2011).

Antes de que la materia orgánica pueda ser consumida por los microorganismos presentes en el reactor, ésta necesita ser solubilizada, las moléculas orgánicas solubles necesitan ser reducidas para facilitar su transporte a través de la membrana celular. Las reacciones responsables de la solubilización y reducción de tamaño, son usualmente hidrolíticas y son catalizadas por enzimas extracelulares como la amilasa, celulasa y proteasa producidas por las bacterias. Las enzimas son producidas por bacterias fermentativas que son importantes en el segundo paso del proceso, la acidogénesis.

La acidogénesis es realizada por miembros del dominio Bacteria. Los aminoácidos y azúcares son degradados por reacciones fermentativas en las que los compuestos orgánicos sirven como donadores y aceptores de electrones. Los primeros productos de la reacción de fermentación son productos degradativos intermedios como el ácido propiónico y butírico y los precursores directos de metano, ácido acético y H₂. La producción de H₂ por las reacciones fermentativas es baja y se origina de la deshidrogenación del piruvato.

La mayoría del H₂ producido proviene de la oxidación de volátiles y de ácidos grasos de cadena larga a ácido acético y surge de la transferencia de electrones de los transportadores reducidos directamente a iones de hidrógeno en el proceso llamado oxidación anaerobia. La producción de H₂ por la oxidación anaerobia es indispensable para el funcionamiento del proceso anaerobio. El H₂ es uno de los donadores primarios de los electrones con los que el metano es formado.

Los productos de las reacciones acidogénicas, ácido acético y H₂ son usadas por metanógenos que son miembros del dominio arqueas para producir gas metano. Dos grupos están involucrados: los metanógenos acetoclásticos, que transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono, y los metanógenos H₂-oxidantes (Grady *et al.*, 2011).

Las bacterias hidrolíticas y fermentativas comprenden un grupo diverso de bacterias anaeróbicas facultativas y obligadas. Sin embargo muchas reacciones importantes hidrolíticas y fermentativas son realizadas por anaerobias estrictas como Bacteroides, Clostridia, Bifidobacteria y miembros de la familia Porphyromonadaceae. Las especies presentes dependerán de la naturaleza del donador de electrones (Grady *et al.*, 2011).

Los metanógenos H₂-oxidantes son clasificados en tres grupos del dominio Arquea: Methanobacteriales, Methanococcales y Methanomicrobiales (Grady *et al.*, 2011).

2.2.2 Factores que afectan la digestión anaerobia

Los factores ambientales influyen en gran medida en el desarrollo del proceso biológico. Por

ejemplo, el tiempo de retención hidráulica (TRH) debe ser compatible con el residuo a degradar, la acidez determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás. El control del pH resulta indispensable ya que este tiene impacto en la actividad enzimática de los microorganismos como es el cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminas) y la alteración química de los compuestos no enzimáticos del sistema: ionización del sustrato y la desnaturalización de la estructura proteica de la enzima. El pH conveniente para el proceso de digestión anaerobia oscila entre 6.5 y 7.5 (Azeem *et al.*, 2011).

El proceso de digestión anaerobia es sensible a concentraciones elevadas de iones de amonio (NH_4^+) y amoníaco libre (NH_3) resultantes de la degradación anaerobia de componentes proteicos ricos en nitrógeno. Se ha documentado el cambio en el pH intracelular y la inhibición de reacciones específicas enzimáticas en los microorganismos a causa del amoníaco. La población metanógena y acidogénica se ve afectada en su crecimiento a partir de concentraciones de amoníaco de 4051-5734 mg N- NH_3 /L (Chen *et al.*, 2008). Se ha registrado que a partir de una concentración de 150 mg/L de nitrógeno amoniacal libre se genera la inhibición completa de la digestión anaerobia (Orhan *et al.*, 2013).

La temperatura tiene un efecto importante en la comunidad microbiana, en los procesos cinéticos y en la producción de metano. Las bajas temperaturas limitan el crecimiento de los microorganismos, la velocidad de consumo de sustrato y la producción de biogás (Azeem *et al.*, 2011). La temperatura óptima para la digestión anaerobia con bacterias mesófilas oscila entre 30 y 38 °C (Britannica Academic, 2017).

2.3. Hidrodinámica

La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento y la interacción de estos con los sólidos o con otros fluidos. La hidrodinámica o dinámica de fluidos es una rama de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar el movimiento de los fluidos que pueden considerarse incompresibles en términos prácticos (Cengel *et al.*, 2014).

De acuerdo con Jiankai *et al.* (2014) la comprensión del comportamiento hidrodinámico es esencial para mejorar el rendimiento y la producción de biogás en los reactores RAFA, ya que la dinámica que sigue el fluido dentro del reactor determina el mezclado, la velocidad del fluido, el tiempo de residencia del fluido y la transferencia de masa entre los granulos y el agua residual. Según Unigarro *et al.* (2014) en un sistema dinámico en el que coexisten las fases sólido, líquido y gas, como es el que se desarrolla en los RAFA, se requiere analizar el comportamiento de las burbujas y el cambio de propiedades como densidad, velocidad y viscosidad, debido a que dichas interacciones pueden afectar el tiempo de residencia y por tanto el desempeño del reactor.

El comportamiento hidrodinámico dentro de un reactor biológico puede evaluarse a través de los siguientes métodos:

- 1) Estímulo-respuesta: esta evaluación consiste en generar una perturbación a la entrada del sistema y documentar la respuesta a la salida. La respuesta obtenida permite recabar información sobre el comportamiento del fluido dentro del reactor. El estímulo que genera la perturbación puede ser la inyección de un trazador en el fluido, la respuesta es una representación del trazador en diferentes puntos respecto al tiempo (Unigarro *et al.*, 2014)
- 2) Dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés): utiliza métodos numéricos para resolver problemas relacionados al movimiento de los fluidos; mediante esta técnica se realiza una discretización espacial y temporal del fluido en pequeñas celdas que en su conjunto forman una malla. En cada celda se aplican algoritmos para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía a través de ecuaciones algebraicas (Sharma *et al.*, 2011).

La CFD presenta algunas ventajas con respecto a las técnicas experimentales de estímulo-respuesta; permite reducir tiempos y costos ya que no es necesaria la fase de experimentación, no se evalúan los trazadores, ni existe una interacción de los trazadores con el fluido a evaluar. En las fases de diseño de los reactores, la CFD proporciona una gran cantidad de información sobre las variables de flujo en todas las regiones del reactor, lo que permite rediseñar las veces necesarias, hasta lograr el comportamiento hidráulico deseado, antes de construir los reactores. También permite analizar condiciones difíciles de reproducir experimentalmente. Sin embargo, la CFD también presenta ciertas desventajas como la necesidad de una computadora con gran capacidad de cómputo y un programa especializado en CFD.

2.3.1 Hidrodinámica en los reactores biológicos

El diseño de los sistemas de tratamiento se ha centrado en el proceso biológico dejando en segundo plano los aspectos hidrodinámicos como las características de flujo, régimen de mezcla y tiempo de residencia, los cuales influyen en los procesos que se llevan durante el tratamiento. El conocimiento del aspecto hidrodinámico del sistema de reacción permite mejorar la eficiencia global del tratamiento.

En el presente proyecto de investigación se utilizó la CFD para comprender el comportamiento de los fluidos dentro de un reactor RAFA. Esta herramienta permite identificar comportamientos anómalos dentro del sistema, tales como: canalizaciones, recirculaciones internas y zonas muertas (Figura 1).

Las zonas muertas son aquellas donde el fluido se mueve con mucha lentitud comparado con el resto. Las canalizaciones son fracciones de la corriente de entrada que permanecen un tiempo corto dentro del reactor comparado con el tiempo de residencia del resto del fluido debido a velocidades altas.

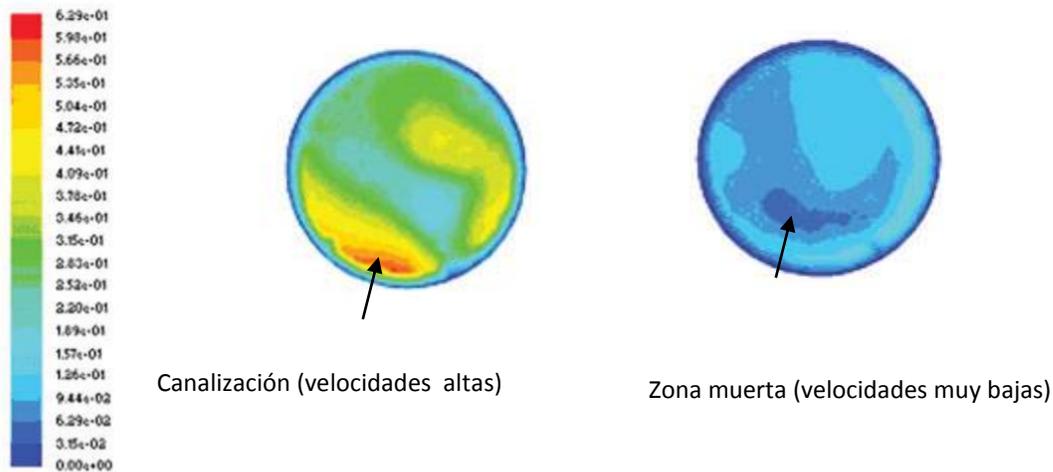


Figura 1. *Canalización y Zona muerta. Tomada de Ren et al., 2009.*

2.3.1.1 Ecuaciones de gobierno y métodos de solución

La CFD según Fernández (2012) reemplaza un problema definido sobre un dominio espacio-temporal continuo donde las variables del flujo: presión, velocidad y temperatura están definidas en todos los puntos del espacio y tiempo considerado, por un dominio discreto definido por una malla consistente en una discretización espacial y temporal del espacio donde se mueve un fluido; cada variable está definida únicamente en las celdas que configuran la malla.

Existen diversas metodologías para resolver las variables de flujo en un dominio discreto, las más usadas son el método de diferencias finitas (FDM, por sus siglas en inglés), el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) y el método de volúmenes finitos (MVF, por sus siglas en inglés). Estos métodos requieren una discretización espacial para obtener la solución de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido (Fernández, 2012).

- Método de diferencias finitas: Discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma de ecuaciones en diferencias; aproxima las derivadas en las ecuaciones diferenciales de gobierno en series de Taylor.
- Método de elementos finitos: Las variables se resuelven como combinación lineal de varias funciones continuas.

- Método de volúmenes finitos: El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se emplea las ecuaciones de conservación en su forma integral, calculando los flujos que entran y salen de los volúmenes.

La malla, dependiendo de la conectividad entre los diferentes puntos, se clasifica en estructurada y no estructurada. En las mallas estructuradas la retícula de celdas se construye a partir de una red de familias de líneas coordenadas. En la malla no estructurada la red no sigue ningún tipo de dirección preferente, es flexible y se adapta de forma arbitraria al dominio.

El sistema de ecuaciones fundamentales que gobiernan el movimiento de un fluido incompresible como el agua, en el que su densidad no cambia con la presión, es el siguiente (Cengel, 2014):

- 1) Ecuación de conservación de masa para flujo incompresible

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación de conservación de momentum

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V}$$

Las ecuaciones de conservación de masa y de momentum en los tres ejes cartesianos se conocen como ecuaciones de Navier-Stokes.

2.4. Sistemas de Control

2.4.1 Sistemas de Control

Un sistema es un conjunto de elementos relacionados que puede recibir acciones externas o variables de entrada; las respuestas a estas acciones externas son las variables de salida. Un sistema de control es un conjunto de componentes conectados que pueden dirigir o comandar a otro sistema. Mediante la manipulación de la variable de entrada en un sistema de control se logra que el sistema cumpla un objetivo determinado, en la salida se analizan los efectos producidos por la variable de entrada (Roca, 2002).

Se distinguen dos tipos de estrategias de control: sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado.

2.4.2 Sistemas de control en Lazo Cerrado

En este tipo de control la medida de la variable controlada o señal de salida se devuelve al controlador para que efectúe la comparación con un punto de referencia, la diferencia denominada señal de error de actuación se alimenta al controlador, en función de la cual se genera una señal de salida con el propósito de reducir el error y obtener en la salida un

valor deseado, dando lugar a un proceso cíclico que busca reducir el error de actuación (Ogata, 2010).

2.4.3 Sistemas de control en lazo abierto

En este tipo de control no se considera una realimentación; la señal de salida no incide sobre la acción de control, puesto que no es medida y no se compara con la señal de la entrada (Ogata, 2010).

2.4.3 Acción de Control de dos posiciones On/Off

En el sistema de control On/Off, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que puede ser encendido o apagado.

Si se considera que la señal de salida de un controlador es $u(t)$ y que la señal de error es $e(t)$.

En el control on/off, la señal $u(t)$ tiene un solo valor que puede ser máximo U_1 o mínimo U_2 ; dependiendo si la señal de error es positiva o negativa, así:

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2, \text{ para } e(t) < 0$$

U_1 y U_2 son constantes (Ogata, 2010).

2.4.4 Sistema electrónico de control

Un sistema electrónico se puede dividir en 3 bloques fundamentales:

- ✓ Bloque de entrada, mediante el cual el sistema recibe la información que va a procesar o las variables que determinan su funcionamiento.
- ✓ Bloque de proceso, en este se realizan las operaciones necesarias para gobernar los actuadores.
- ✓ Bloque de salida, se encarga de realizar la acción final correspondiente al objetivo deseado.

2.4.5 Sensores

Los sensores o elementos de medición son dispositivos que convierten una magnitud física como temperatura, velocidad, presión, distancia, etc., en una señal eléctrica como tensión, la cual es análoga a la magnitud bajo medición.

3.7 Actuadores

Son dispositivos de acción que convierten una señal eléctrica en un movimiento mecánico como el de motores o sistemas lineales y en magnitudes físicas como calor, presión, etc. Efectúan la acción calculada por el controlador.

3. Antecedentes

3.1 Evaluación del efecto de la temperatura en reactores RAFA

Para el tratamiento de aguas residuales se busca el desarrollo de procesos con altas eficiencias de remoción de contaminantes y con bajos costos de instalación y operación.

El tratamiento de aguas residuales empleando Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA), presenta diversas ventajas como los bajos costos de construcción y de mantenimiento, bajo consumo eléctrico, producción de biogás, baja producción de lodos, cargas orgánicas altas entre 1 y 2 kg DQO/m³.día y alta eficiencia en la remoción de contaminantes que supera el 85% (Lorenzo & Obaya, 2006). Sin embargo, la depuración mediante este proceso está condicionada al control de factores ambientales como la temperatura, por lo que este tipo de reactores es usualmente empleado en lugares de clima tropical.

De acuerdo con Lorenzo *et al.* (2005) la temperatura óptima para el funcionamiento eficiente de un reactor RAFA es de 35°C, puesto que la temperatura afecta la velocidad de hidrólisis de la materia orgánica y la formación de lodo granulado lo que reduce la eficiencia del tratamiento (Lorenzo *et al.*, 2006).

Por su parte Hina Rizvi *et al.* (2015) documentaron que a bajas temperaturas declina el crecimiento y la actividad metanogénica, por lo que se requiere un incremento de la biomasa en el reactor, mayor tiempo de retención de lodos y de retención hidráulico y señalan que la influencia de la temperatura es muy importante, ya que afecta de manera significativa el proceso de hidrólisis, la tasa de utilización de sustrato, la sedimentación de los sólidos y la tasa de transferencia de gas (Tabla 1). Tarek *et al.* (2002) coinciden en que a bajas temperaturas en los reactores RAFA se necesita mayor TRH debido a la menor tasa de hidrólisis y la mayor cantidad de acumulación de sólidos en suspensión y recomiendan que a bajas temperaturas se implemente una pre remoción de sólidos suspendidos.

Lew, *et al.* (2011) señalan que a bajas temperaturas, los sistemas anaerobios se encuentran limitados por la hidrólisis de los sólidos suspendidos, por lo que decrece la degradación de materia orgánica y esta se acumula en la cama de lodos; refieren que el aumento en la temperatura aumenta la sedimentación por lo que hay mejor contacto entre los lodos y los sólidos.

Debido a las repercusiones negativas que tiene la temperatura en el proceso de digestión anaerobia, los reactores RAFA están limitados a utilizarse en regiones de clima cálido o en condiciones donde la temperatura del reactor sea controlada. Por lo tanto, en el presente proyecto de investigación se evaluó la digestión anaerobia en un reactor RAFA empleando un calentador solar, como energía renovable, para el control de temperatura.

Tabla 1. Tabla comparativa de estudios donde se evalúa la temperatura en la digestión anaerobia.

Referencia	Tipo de reactor	Condiciones de operación	Composición química del agua	Resultados	Observaciones
Hina, et al. , 2015	Reactor RAFA de perspex de 4.6 L.	T°C= 17, 25 y 30°C. pH= 7.39	Aguas residuales domésticas 474.39 mg DQO/L 245.9 mgDBO ₅ /L	A temperaturas por debajo de 17°C y con lodos jóvenes de 60 días, la remoción de DQO y de DBO fue en un rango de 57-62% y 61-66% respectivamente. A la temperatura de 30°C y con lodos de 150 días las eficiencias de remoción de DQO y DBO fueron de 79-81% y de 77-83%, respectivamente. Los resultados óptimos fueron obtenidos a una temperatura de 25 a 30°C y una edad de lodos de 120 a 150 días.	A bajas temperaturas declina el crecimiento y la actividad metanogénica. Por lo que se requiere un incremento de la biomasa en el reactor, mayor tiempo de retención de lodos y de TRH. La temperatura afecta de manera significativa el proceso de hidrólisis, la tasa de consumo de sustrato, la sedimentación de los sólidos y las tasa de transferencia de gas.
Tarek et al., 2002	Filtro anaerobio y reactor hibrido fabricados en plexiglás	Operación a 13°C. TRHs de 4+8, 2+4 y 3+6h	Aguas residuales domésticas. 461-533 mgDQO _T /L	El sistema removió parte del Nitrógeno Kjeldahl y sólidos suspendidos, pero se liberó amonio como resultado de la hidrólisis de proteínas. El Filtro anaerobio alcanzó una remoción de DQO de sólidos suspendidos de 81, 57 y 58% a un TRH de 4, 3 y 2h. respectivamente. El sistema Filtro Anaerobio+ Reactor Híbrido con un TRH de 4+8 y a 13°C logró una remoción de DQO total del 71% similar a un RAFA en países tropicales. Del 60-74% de la DQO total removida es convertida a metano.	A bajas temperaturas se necesita mayor TRH debido a la menor tasa de hidrólisis y la mayor cantidad de acumulación de sólidos en suspensión. A bajas temperaturas se necesita una pre remoción de sólidos suspendidos.
Yaya-Beas et al.,2016	Reactor RAFA de acrílico de 29L.	Temperatura ambiental promedio de 8°C.	Aguas residuales domésticas 621mg DQO _{TOT} /L 226mg DQO _{SOL} /L	Remoción de HE entre 89 y 95% a diferentes velocidades de flujo: 0.12, 0.14, 0.16, 0.20, 0.27 y 0.41 m/h. Remoción de DQO _{TOT} varió entre 37 y 62% a 11 y 12°C.	A menos de 15°C se necesitan TRH largos y tiempos de retención de lodos largos.

			243 mgDBO /L	La máxima remoción de huevos de helminto y de DQO fue a una velocidad de flujo de 0.12 m/h.	
Lew et al., 2011	RAFA de Plexiglas con volumen de 5.3L	RAFA Operado a 28, 15 y 10°C. TRH de 6 h.	Aguas residuales domésticas 1576 mg DQO _{TOT} /L 1255 mg DQO _{ss} /L 180 mg DQO _{COL} /L 179 mg DQO _{SOL} /L 1090 mg DBO /L	La mayor remoción observada fue a las temperaturas de 28 y 15°C, siendo de 78% y 66% respectivamente. A 10°C fue de 42%.	A bajas temperaturas, los sistemas anaerobios se encuentran limitados por la hidrólisis de sólidos suspendidos, decrece la degradación de materia orgánica y esta se acumula en la cama de lodos. Un TR de Lodos corto puede limitar el crecimiento de microorganismos metanogénicos. Cuando la temperatura decrece, decrece la actividad biológica. El aumento en la temperatura aumenta la sedimentación y hay un mejor contacto entre los lodos y los sólidos. Para superar los efectos de las bajas temperaturas en la degradación de las partículas de materia y el hecho de que estas se acumulan en la parte superior del lecho de lodos del RAFA, se separó la fracción superior del lecho de lodos y se trató en un digestor de lodos.
Lew et al., 2003	RAFA de plexiglás de 5.3 L	Operado a 28°C por 6 meses y 2 meses en cada cambio de temperatura. TRH de 24h	Aguas residuales domésticas Variación de concentración de DQO (200-1300 mg/L.	El fenómeno de acumulación de sólidos suspendidos en el reactor no fue aparente a 28°C. En contraste a bajas temperaturas, sólidos de apariencia diferente a los gránulos normales de lodo se acumularon en el reactor y disminuyó la producción de metano. Remoción: 28°C 82% 14°C 68% 10°C 44%	Las relativamente altas concentraciones de materia particulada necesitan un paso inicial de hidrólisis que es sensible a la temperatura.

3.2 Evaluación del comportamiento hidrodinámico en reactores RAFA

De acuerdo con Ren *et al.* (2009), el desempeño de un reactor RAFA evaluado por su remoción de DQO y rendimiento energético depende del proceso microbiológico y del comportamiento hidrodinámico, por lo que resulta relevante conocer la hidrodinámica de dichos reactores.

Debido a que los estudios sobre los reactores tipo RAFA se han centrado en el comportamiento biológico, existen pocos trabajos relacionados al comportamiento hidrodinámico, algunos de ellos describen el comportamiento hidrodinámico a través de información obtenida mediante la técnica estímulo-respuesta. Por ejemplo, Singh *et al.* (2006) reportaron que el mezclado por la presencia del biogás es crucial para la eliminación de zonas muertas dentro de los reactores RAFA (Tabla 2). También observaron que las zonas muertas no pueden ser evitadas en reactores que tratan aguas residuales con baja carga orgánica, especialmente a bajas temperaturas. A través de las curvas de distribución del trazador sugieren que el flujo a temperaturas altas (20-32°C) sigue un patrón de flujo completamente mezclado.

De acuerdo al estudio realizado por Sevilla *et al.* (2010) en los reactores RAFA con baja carga orgánica, a pequeña escala y con baja producción de biogás no hay un buen mezclado. Unigarro *et al.* (2014) a partir de un estudio estímulo-respuesta concluyeron que la hidráulica de un reactor RAFA tiene un comportamiento de flujo completamente mezclado, además de presentar cortocircuitos y zonas muertas.

Ren *et al.* (2009) realizaron un estudio hidrodinámico en un RAFA a través de la herramienta CFD y concluyeron que debido a la baja velocidad superficial del líquido, la producción de biogás tiene un mayor efecto en el patrón de flujo y de acuerdo a su simulación concluyeron que se presenta discontinuidad en el comportamiento de mezclado en este tipo de reactores.

Tabla 2. Tabla comparativa de estudios hidrodinámicos en reactores tipo RAFA

Referencia	Tipo de Reactor	Método hidrodinámico y condiciones	Resultados
Ren, <i>et al.</i> , 2009	RAFA de Plexiglás de 7.5L	<p>Técnica CFD</p> <p>Visualización de un reactor RAFA como una serie de reactores de tanque agitado continuo (CSTRs)</p> <p>Modelo de CSTRs de tamaño incrementado (ISC) para describir las características de dispersión de un RAFA.</p> <p>Simulación CFD con un enfoque Eueriano-Euleriano de fluido trifásico para visualizar la retención de fase y los patrones de flujo en los reactores RAFA.</p> <p>Utilización de un modelo 3-D transitorio para simular gas-líquido-sólido.</p> <p>Se consideró un volumen de control multifásico, compuesto por un continuo (aguas residuales) y dos fases dispersas (burbujas de gas y gránulos microbianos). Cada fase se consideró incompresible.</p> <p>Para la revisión con trazadores se inyectó un trazador de Li^+ y se midió la concentración en la salida a través de espectroscopía.</p> <p>Se consideró que el lodo ocupa un volumen en la región de cama de lodo del 50% y gránulos sólidos esféricos con una densidad de 1070 kg m^{-3}, diámetro de 2 mm, viscosidad dinámica de 5 mPa s.</p> <p>Las burbujas de gas tienen una densidad de 1.139 kg m^{-3} y una viscosidad dinámica de 0.019 mPa s.</p> <p>La fracción de volumen de la fase de gas está relacionada con la producción de gas, las burbujas de gas tienen un diámetro de 0.1mm.</p> <p>Se utilizó una malla con 120,000 celdas.</p> <p>Tiempo de duración de 22 s.</p>	<p>Los resultados de la simulación acerca de los campos de flujo, confirmaron la discontinuidad en el comportamiento de mezclado en un reactor RAFA.</p> <p>Los resultados de la simulación CFD son comparables con el modelo ISC en términos de la similitud en los patrones de flujo y las fracciones de zonas muertas. Lo que sugiere que estos métodos pueden ser usados para explorar la hidrodinámica de los reactores RAFA.</p> <p>Se demostró que el método CFD es un Herramienta para comprender los comportamientos de flujo y puede reemplazar experimentos que resultan costosos.</p> <p>El mezclado en un reactor continuamente mezclado como el RAFA con tres fases (gas, líquido y sólido) depende de la velocidad superficial del líquido, velocidad superficial del gas, propiedades físicas de las fases, retención de fases y la geometría del reactor.</p> <p>Debido a que la velocidad superficial del líquido es baja, la tasa de producción de gas tiene un mayor efecto en los patrones de flujo de un reactor RAFA.</p> <p>La velocidad superficial del gas depende de la producción de gas y el tamaño del reactor.</p> <p>La magnitud de la velocidad aumentó con el aumento en la velocidad de flujo de entrada.</p> <p>Sin embargo, las tendencias generales del flujo no se modifican.</p> <p>La magnitud de velocidad aumenta a lo largo del reactor RAFA cuando el patrón de flujo está completamente desarrollado.</p>
Singh <i>et al.</i> , 2006	2 RAFA de poliacrílico de 8L.	<p>Técnica de estímulo respuesta</p> <p>Se realizó una simulación matemática de la altura del manto de lodos, incorporando los efectos de bajas temperatura basada en el perfil de distribución de sólidos y patrones de flujo a varias temperaturas.</p> <p>Se midió la producción de biogás.</p> <p>Se instaló en la parte inferior del reactor un dispositivo de mezcla suave de 2-3 rpm.</p> <p>Alimentación del reactor con aguas residuales municipales.</p> <p>1 reactor operado a 20°C y después a 32°C.</p>	<p>Las curvas del trazador sugieren que el flujo a temperaturas altas 20 y 32°C sigue un patrón de flujo completamente mezclado. Se observó, a partir de las curvas de distribución del tiempo de residencia, que con el decremento de temperatura de 20 a 6°C el régimen de flujo del reactor cambió a flujo pistón. La razón del cambio puede ser por la falta de producción de biogás a bajas temperaturas, resultando en la formación de zonas muertas y de bypass.</p> <p>Un decremento en la producción de biogás con un decremento de la temperatura resulta en</p>

		<p>Otro reactor operado a 20, 15, 11 y 6 °C. Se midió la altura de los lodos a 32, 20, 15, 11 y 6°C y un TRH de 48 a 3 h. El régimen hidráulico se estudió por medio de la técnica estímulo respuesta a un TRH de 10 h, con trazadores de Bromocresol tinte verde. La concentración del tinte se midió mediante su absorbancia a 610nm.</p>	<p>bajo mezclado por gas comparado con el mezclado por gas a altas temperaturas. Hay un incremento de zonas muertas cuando la temperatura decrece de 32 a 20°C. La fracción de flujo de bypass es mayor a 32°C que a 20°C. Sin embargo en un reactor completamente mezclado se supone que se produce un licor de composición uniforme, por lo que se puede despreciar el flujo de bypass. Se observó que las bajas temperaturas no afectan significativamente la altura de los lodos, sin embargo la producción de biogás fue baja. Los resultados muestran que cuando hay una disminución de la temperatura las zonas muertas aumentan.</p>
Unigarro <i>et al.</i> , 2014	Reactor RAFA de 20L.	<p>Estudio hidrodinámico de un RAFA por la técnica de estímulo respuesta. Se utilizó un trazador Rodamina WT 20% 10ml., 180000 ppb..Medición durante 51 h. Se aplicó a la entrada y se midió su concentración a la salida del reactor y en los puntos de muestreo.</p>	<p>Transcurrido el tiempo de residencia teórico de 24 h, no salió la totalidad del trazador por el efluente. El tiempo de residencia real es más grande que el teórico. El reactor tiene un tiempo de estabilización de aproximadamente 4 h. Se presentan picos posteriores al periodo de estabilización, que implican posibles cortocircuitos en el sistema. El comportamiento del RAFA es de flujo completamente mezclado, presenta cortocircuitos y zonas muertas. La dinámica del reactor muestra dos periodos característicos: el periodo de estabilización que se presenta en las primeras 4 h y un periodo de estado pseudo-estacionario después de 4 horas, donde en los cuatro puntos de muestreo se obtuvieron concentraciones similares.</p>
Sevilla, <i>et al.</i> , 2009	Reactor RAFA de acrílico.	<p>Técnica de estímulo respuesta Caracterización del flujo Hidrodinámico en un RAFA Se adicionó un pulso de un trazador inerte de 5g de NaCl en 50ml de agua. Se midió la concentración de NaCl a la salida a través de un medidor de conductividad. TRH de 24 h 0.9g DQO/L.d 28°C</p>	<p>Las curvas de distribución de tiempo de residencia (RTD) mostraron un TRH de 31h mayor que el teórico de 24h. El mezclado fue pobre debido a la baja carga orgánica y la baja producción de biogás La recuperación del trazador fue del 90%</p>

3.3 Control y automatización en reactores RAFA

Debido a las diversas ventajas que ofrecen los reactores tipo RAFA en el tratamiento de aguas residuales, se han desarrollado sistemas de control que se ocupan de mantener las condiciones adecuadas para lograr altas eficiencias de remoción de contaminantes. También se han automatizado procesos que permiten saber en tiempo real las condiciones en que se encuentran variables de interés.

Fang *et al.* (2011) reportaron el monitoreo en tiempo real del pH, la producción de metano y la medición de flujo de gas, en dicho estudio; el control de la temperatura, la medición constante del pH y el incremento en la concentración de DQO permitió relacionar dichas variables con la producción de H₂ en un RAFA de proceso termófilo.

Mendes *et al.* (2015) proponen un método para la construcción y prueba de modelos basados en redes neuronales artificiales para predecir la concentración de DQO en el efluente de un reactor RAFA bajo diferentes condiciones reduciendo la necesidad de información experimental, tiempo y costos. De acuerdo a este sistema de control, al conocer las variables de entrada: sólidos suspendidos totales, DQO, alcalinidad, pH, AGV y temperatura se puede predecir la concentración de DQO del efluente.

Lema *et al.* (2001) desarrollaron un sistema de control en el que la fracción de DQO que no es degradada a metano es el parámetro que permite al controlador la modificación de la frecuencia de alimentación. Realizaron un monitoreo en tiempo real del flujo de biogás y la producción de biogás. La temperatura fue controlada en 37°C a través de dos lámparas infrarrojas de 250W.

Tabla 3. Tabla comparativa de estudios de control y automatización en reactores tipo RAFA

Referencia	Materiales y Métodos	Control	Aportaciones
Dong <i>et al.</i> , 2011	El monitoreo en la fase de gas, consistió en un sensor de gas (AGM10 & AGM32, Onwards Co., China) para medir la concentración de metano y un dispositivo de medición de flujo de gas (sistema basado en el método de drenaje de gas) para la detección de velocidad del flujo de gas. En la fase líquida se monitoreó el pH y los Ácidos Grasos Volátiles. El pH se monitoreo en línea a 25°C, a través de un recolector de muestras automático y una valoración en línea. Todos los datos fueron recolectados por una unidad de	El sistema de monitoreo en línea permitió el monitoreo rápido y el control oportuno del proceso. El control de la temperatura, la medición constante del pH y el incremento en la concentración de DQO permitió relacionar dichas variables con la producción de H ₂ en un proceso termófilo.	Se estudió la producción de H ₂ en un RAFA de proceso termófilo con un sistema de monitoreo en tiempo real. La temperatura de operación se incrementó de 37°C a 55°C. El pH se disminuyó de 7 a 4.4. Se operó el reactor a diferentes TRHs (24, 16 y 12 hrs). El sistema de monitoreo en tiempo real realizó el seguimiento de la fase de gas y los productos en fase líquida, lo que garantizó un mejor control del proceso y a largo plazo, estabilidad en el funcionamiento del reactor.

	<p>adquisición de datos (PCI-1602, ICP DAS, China) conectado al ordenador.</p> <p>El software de monitoreo fue diseñado en LabVIEW en el que se incorporó adquisición de datos, análisis, registro y visualización.</p>		<p>La temperatura se controló a través de una chaqueta de agua externa.</p>
Mendes et al., 2015	<p>Se realizó un sistema de red neuronal artificial con diversos vértices e interacciones con un valor asignado.</p> <p>Sobre la base de estas entradas y el conjunto de valores sinápticos, se evalúan los vértices, a través de una función de activación aplicada a una suma ponderada de las entradas, utilizando los pesos sinápticos como factores de ponderación. Se hace una aproximación a la función con la que trabajan los reactores.</p>	<p>Redes neuronales artificiales.</p>	<p>Uso de redes neuronales artificiales para determinar los requerimientos de carga en los reactores.</p> <p>Se propuso un método para la construcción y prueba de modelos basados en redes neuronales artificiales, para predecir la concentración de DQO en el efluente de un reactor RAFA.</p>
Lema et al., 2001	<p>La temperatura en el reactor fue mantenida en 37° usando dos lámparas infrarrojas de 250W. Las lámparas se activan mediante un termostato conectado a un sensor de temperatura colocado en el interior del reactor.</p> <p>La velocidad de flujo fue controlada por medio de una computadora, cuya señal de salida (0-5 V) se transforma en una señal de 4-20 mA por medio de un convertidor (C-Mac MV11). Una tarjeta de adquisición (National Instruments AT-MIO-16L-25 Modelo 776245-03) transfirió las señales de entrada y salida desde y hacia el ordenador, utilizando el software LabVIEW.</p>	<p>La operación del sistema fue controlada por el software C++, que:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Mide el flujo de gas (número de pulsos de producidos por el gas). -Calcula el balance de DQO (Utilizando el porcentaje de metano en el biogás y COD de entrada) para calcular la fracción de carga orgánica residual. -Activa la bomba de alimentación durante un período fijo, una vez que la fracción de carga residual alcanza el valor establecido. 	<p>Desarrollo de un sistema de control capaz de manejar la instalación de reactores anaerobios, mediante el uso de un reducido número de variables de proceso. Variables usadas: flujo de biogás y producción de biogás.</p>
Mu et al., 2007	<p>El modelo fue validado usando datos experimentales de un reactor RAFA equipado con sensores para la medición en línea de DQO y de AGV.</p>	<p>El proceso de simulación de control se realizó a través del modelo de parámetros distribuidos ADM1d, que utiliza ecuaciones cinéticas y modelos de dispersión axial para hacer predicciones de la distribución de componentes en el reactor.</p>	<p>Uso de la recirculación externa como una variable manipulable, para mejorar el proceso de un reactor RAFA</p>

4. Justificación

Los reactores RAFA tienen diversas ventajas en la depuración de agua residual entre las que destacan los bajos costos de operación y mantenimiento, además de que ofrecen una eficiencia de remoción de materia orgánica de más del 85% y la producción de biogás, sin embargo, una limitación para que este reactor sea utilizado en regiones de clima templado es la temperatura, ya que se ha documentado que la digestión anaerobia tiene un funcionamiento óptimo alrededor de 35°C y para poder operar este tipo de reactores en zonas templadas implicaría un costo adicional para elevar la temperatura.

En este proyecto de investigación se plantea operar un reactor RAFA en una región de clima templado, típico de Lerma de Villada, Estado de México, en donde la temperatura media normal de acuerdo al Sistema Meteorológico Nacional es de 12.9°C (SMN, 2018); por lo que para regular la temperatura, se empleará un calentador solar y se aprovechará la radiación solar con el objetivo de mantener una temperatura adecuada para la actividad microbiana en el reactor RAFA. Esta configuración del sistema podría ser una alternativa factible para la instalación de digestores anaerobios en climas templados sin elevar los costos de operación.

También se realizará una evaluación de la hidrodinámica en el interior del reactor a través de una simulación computacional que permitirá valorar el desempeño del reactor y el contacto entre la zona de actividad microbiana y el agua residual a tratar, lo que permitirá en su caso detectar comportamientos anómalos dentro del reactor que afecten el TRH y realizar un rediseño del mismo.

El reactor biológico también se automatizará, con instrumentación y control del mismo; se instalarán sensores de pH, temperatura, así como de un sistema de colección y cuantificación de metano en continuo. Cabe mencionar que en la revisión de la literatura, no se han encontrado trabajos que presenten este aspecto multidisciplinario.

5. Pregunta de Investigación

- ¿Es posible obtener una alta eficiencia de remoción de DQO con un reactor RAFA en zonas de clima templado?

6. Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el efecto de la temperatura en un reactor RAFA, al emplear un calentador solar, sobre la eficiencia global del sistema.

Objetivos Específicos

- Detectar condiciones en el flujo que alteren el TRH, como canalizaciones, recirculaciones internas y zonas muertas a través de la estimación hidrodinámica con el programa computacional “Flow-3D®” y en su caso, proponer modificaciones a la geometría del RAFA.
- Instrumentar el reactor biológico, empleando sensores de pH, temperatura y metano.
- Implementar un control de temperatura mediante una tarjeta electrónica de desarrollo, componentes electrónicos de potencia, comunicación, y sensores, así como la aplicación de una teoría de control.
- Instalar, operar y estabilizar un reactor RAFA bajo condiciones de digestión anaerobia, alimentado con agua sintética, a temperatura ambiente.
- Evaluar el efecto de la temperatura sobre la eficiencia de remoción de DQO producción de metano, empleando agua sintética y residual.

7. Hipótesis

- Al emplear un sistema de control electrónico para la operación de un reactor RAFA con un calentador solar acoplado, se contribuye a mantener la temperatura óptima para la actividad microbiana dentro del reactor, y así alcanzar altas eficiencias de remoción de materia orgánica y producción de metano.

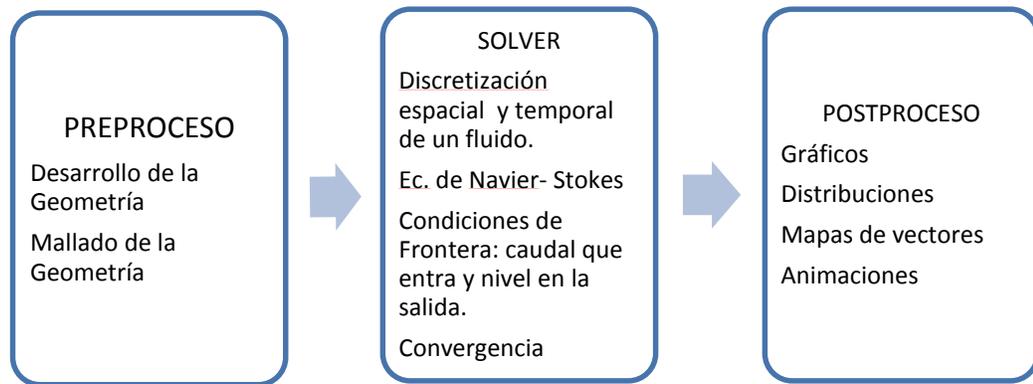
8. Metodología

8.1 Estudio de la Hidrodinámica del RAFA

Se hizo uso de la Dinámica de Fluidos Computacional para resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo dentro del reactor RAFA, el proceso constó de tres fases (Esquema 2):

- Preproceso: Esta fase comprende la definición de la geometría a modelar, la generación del mallado, la identificación de los fenómenos físicos y químicos, la definición de las propiedades del fluido, la especificación de las condiciones iniciales y de frontera.
- Solución: El programa computacional resuelve de forma iterativa las ecuaciones de gobierno de flujo.
- Postproceso: Se emplearon herramientas gráficas para generar figuras que permiten analizar los resultados, a través de líneas de corriente y mapas de vectores.

Se realizó el estudio hidrodinámico dentro del reactor RAFA, contemplando la zona de lodos. El estudio hidrodinámico se realizó a través de un programa computacional de fluidos, Flow 3D® versión 11.1.1. Con este estudio se buscó identificar comportamientos anómalos dentro del sistema, como son: 1) recirculaciones internas, 2) canalizaciones y 3) zonas muertas. En el caso de identificar comportamientos anómalos dentro del reactor, se realizarán modificaciones al reactor con el propósito de mejorar el aspecto hidrodinámico.



Esquema 2. Fases del estudio hidrodinámico dentro del RAFA

8.2 Sistema de Control y Automatización del RAFA

Conforme a las características del reactor tubular RAFA, se diseñó y construyó un sistema de control de temperatura en lazo cerrado, que recopila la magnitud de temperatura proveniente de la zona de reacción mediante un sensor de temperatura aislado (Figura 2).

La información es decodificada y transmitida a un computador que compara los datos con la temperatura óptima para su ajuste. Dicho sistema de monitoreo utiliza una ley de control on/off, que reduce el error por diferencia de temperatura con una etapa de actuadores (electroválvulas), que regulan el flujo de agua caliente y fría, y el tiempo de suministro de agua proveniente de un calentador solar. El flujo de agua regulada circula por un sistema de recubrimiento en la pared exterior del reactor RAFA (enchaquetamiento), que permite la transferencia de calor a la biomasa contenida en el reactor.

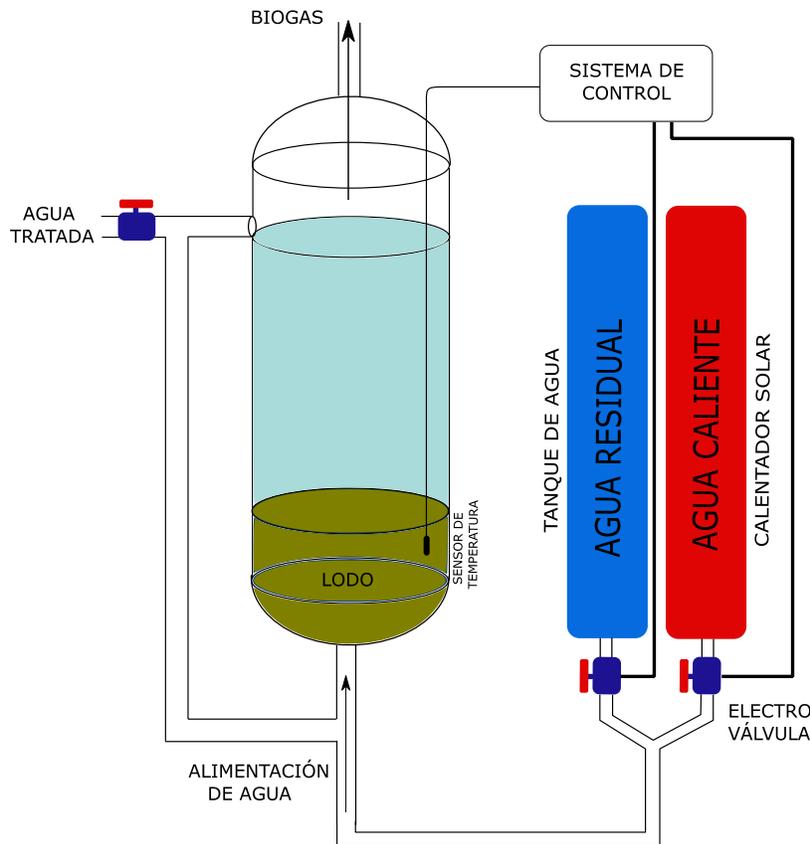


Figura 2. Sistema de control

8.2.1 Sistema electrónico control de temperatura.

El sistema electrónico está formado por un microcontrolador Arduino® como sistema de control automático, una válvula electrónica como llave de acceso al paso de agua caliente, un relevador de estado sólido como switch digital para el encendido y apagado de la válvula, un sensor de temperatura como medidor de la temperatura dentro del reactor RAFA y una fuente de alimentación como fuente de energía del sistema.

Características del sensor de temperatura DS18B20:

- Rango de temperatura de -55 a 125°C.
- Resolución de $\pm 0.5^\circ\text{C}$
- Comunicación digital por un hilo.
- Sensor encapsulado sumergible en líquidos.

En la Figura 3 se muestra el sensor DS18B20 encapsulado con sus cables de alimentación, tierra y transmisión de datos.



Figura 3. Sensor de temperatura DS18B20

Características de la válvula electrónica PD02022:

- Voltaje de alimentación de 24 V DC, 20 Watts.
- Diámetro de 1/4 de pulgada.
- Solenoide de acción directa normalmente cerrada.
- Presión de trabajo de 10-100 psi
- Temperatura de trabajo de -20 a 90°C.
- Fluidos agua, aceite y aire comprimido.
- Material de bronce.

En la Figura 4 se muestra la válvula electrónica.



Figura 4. Válvula electrónica PD02022

Características del relevador de estado sólido:

- Voltaje de entrada de 3-32 V DC
- Voltaje de salida de 3-50 V DC
- Corriente de salida máxima 25 amperes



Figura 5. Relevador de estado sólido

Características del microcontrolador Arduino®:

- Voltaje de entrada de 7-12 V DC.
- 14 pines digitales de entrada-salida.
- 6 pines de entrada analógica.
- Velocidad de reloj de 16 MHz.
- Voltaje de operación de salida 5 V DC.
- Comunicación serial USB.

En la Figura 6 se muestra el microcontrolador Arduino®.



Figura 6. Microcontrolador Arduino®

Características de la fuente de corriente directa Keithley

- 3 canales de alimentación
- Corriente máxima de 3 amperes
- Voltaje máximo de 30 volts
- Resolución de 0.01 volt



Figura 7. Fuente de corriente directa.

Este sistema electrónico en conjunto forma el control de temperatura automático de un reactor RAFA en lazo cerrado, permitiendo leer la temperatura del reactor en tiempo real y poder ajustarla a una temperatura deseada de manera continua.

El programa del microcontrolador consiste en leer la temperatura del reactor mediante el sensor de temperatura DS18B20 y compararla con una temperatura de referencia (29°C) generando una diferencia de temperatura entre el valor deseado y el valor medido en un instante de tiempo, conocido como error. El error es evaluado por su signo, ya que al ser positivo se activa una señal para la apertura de la válvula, caso contrario la señal de salida está en estado bajo para cerrar la válvula. La Figura 8 muestra todo el sistema electrónico de control.

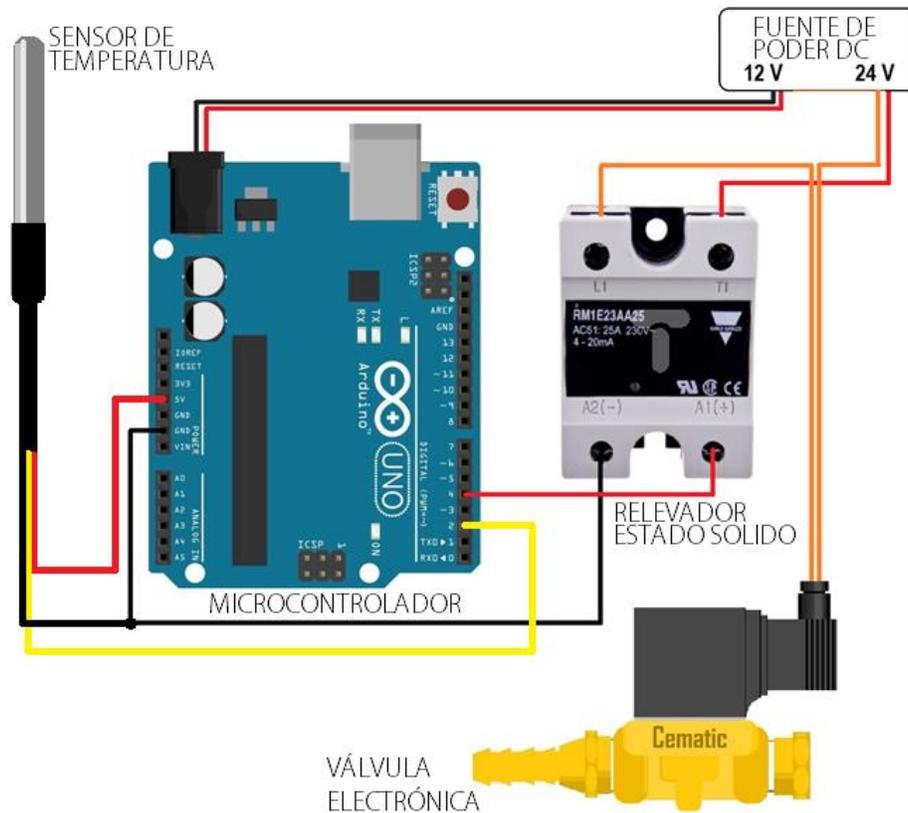


Figura 8. Sistema de electrónico de control

El programa que controla este sistema de control de temperatura se encuentra en el Anexo 12.1, contiene un subcódigo encargado de transmitir vía USB los datos de temperatura dentro del reactor, a una computadora para su visualización. Asimismo, el programa principal contiene una rutina de reposo del calentador solar, que permite seguir monitoreando la temperatura y dar un tiempo de reposo para que el calentador solar almacene nuevamente agua caliente, cuando después de un tiempo no se logra llegar a la temperatura deseada, debido a los cambios climáticos en la Ciudad de Lerma durante todo el año. El diagrama de bloques de la Figura 9 muestra el flujo de código dentro del microcontrolador.

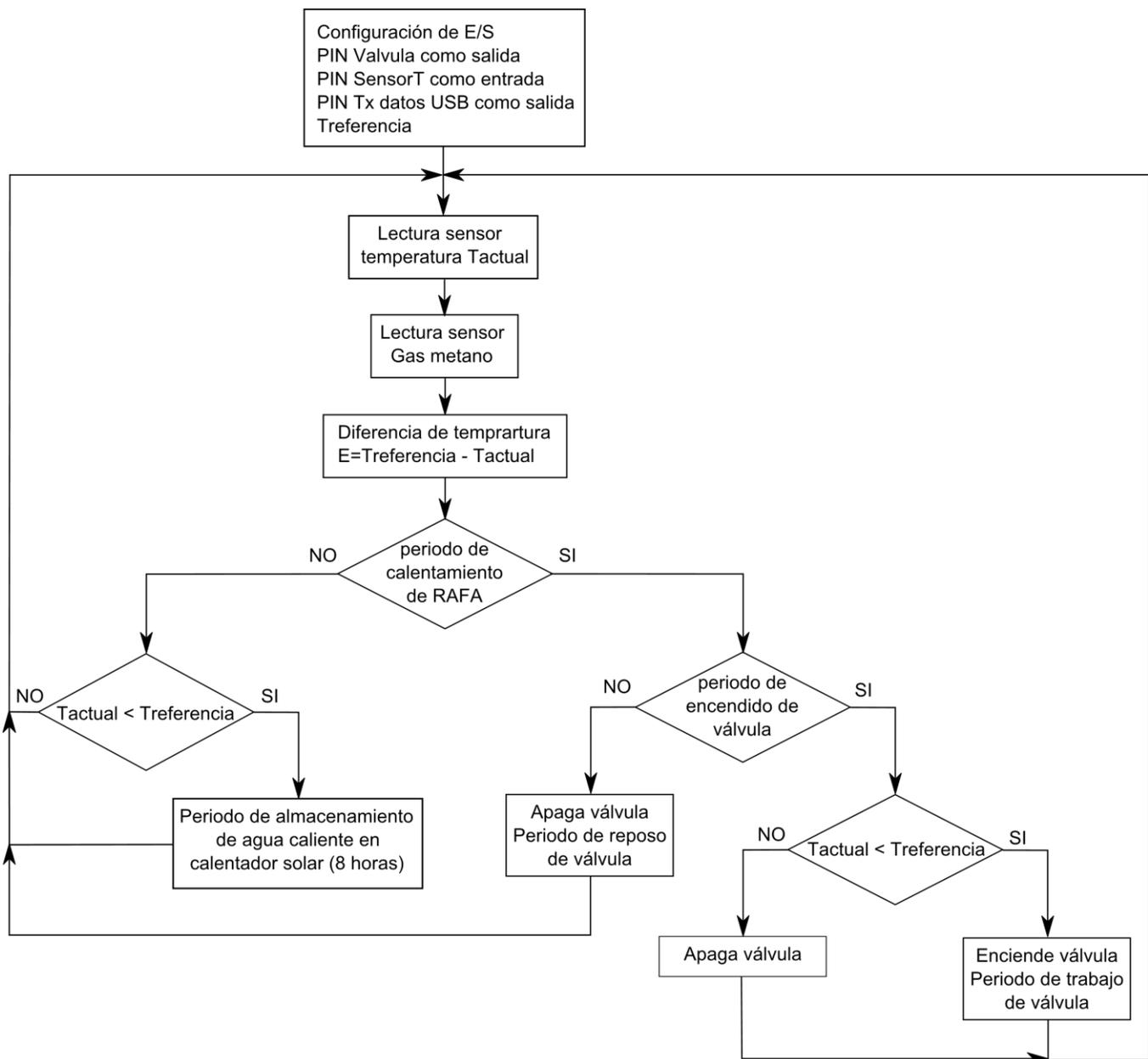


Figura 9. Diagrama de flujo de código

8.2.2 Sistema electrónico de lectura de gas metano

El sistema electrónico de control permite realizar múltiples actividades debido a sus características como número de pines de entrada – salida, velocidad de procesamiento y la

capacidad de modificar el programa principal en función del proceso. Actualmente existen sensores de gas de bajo costo que permiten detectar la presencia o ausencia de gases como el metano. El sensor MQ-4 como se muestra en la Figura 10 detecta la presencia de gas metano, entregando una señal eléctrica como respuesta de una cantidad de gas con baja exactitud.



Figura 10. Sensor de gas metano MQ-4

La Figura 11 muestra el diagrama eléctrico de conexión del sistema electrónico microcontrolador y el sensor de gas metano. La señal es adquirida en tiempo real por el convertidor de analógico a tipo digital, decodificada y enviada junto con el dato de temperatura vía puerto USB a una PC para su almacenamiento y análisis

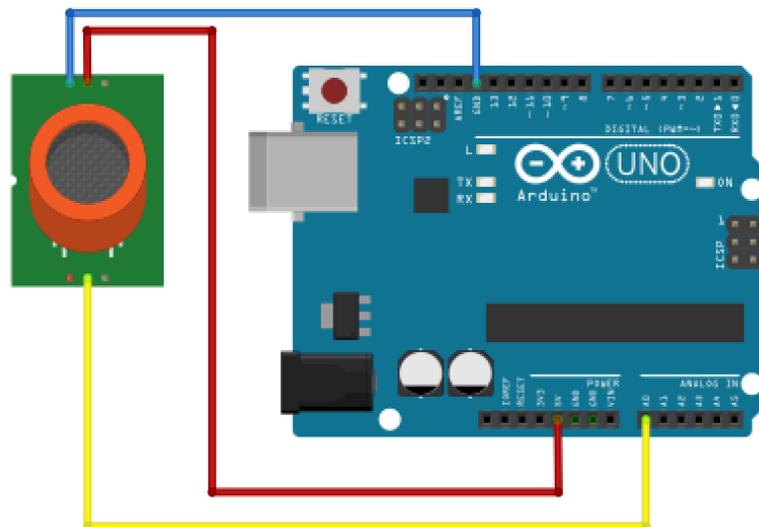


Figura 11. Diagrama eléctrico

8.2.3 Sistema de Monitoreo por computadora

Para visualizar y almacenar la información obtenida por un sistema electrónico de control, es preciso realizar una interfaz de monitoreo que permita entre otras cosas, visualizar en tiempo real determinados datos de manera gráfica o puntualmente, almacenar la

información en base de datos para su posterior análisis y procesar la información mediante métodos matemáticos, estadísticos y computacionales para obtener una respuesta o resultados concreto.

Se desarrolló una interfaz gráfica de monitoreo empleando el software de desarrollo de MATLAB. Se realizó el programa de comunicación de datos externos por puerto USB para leer la información de temperatura y gas metano provenientes del microcontrolador como sistema electrónico de control. Posteriormente se realizó una base de datos en la computadora para almacenar y guardar la información obtenida en caso de fallas o cortes de suministro eléctrico. El programa principal tiene un tiempo de muestreo de 2 segundos, pero requiere un tiempo de almacenamiento, por lo que se ingresa el dato de 300 segundos equivalente a 5 minutos para tomar una muestra y guardarla por ser un proceso de respuesta lenta. La información obtenida se muestra de manera gráfica en dos cuadros con escalas diferentes para la magnitud de temperatura y gas metano. La gráfica de temperatura muestra adicionalmente la temperatura deseada y la diferencia entre temperaturas como el error. La Figura 12 muestra el diagrama de conexiones del sistema de control y una PC como sistema para el monitoreo.

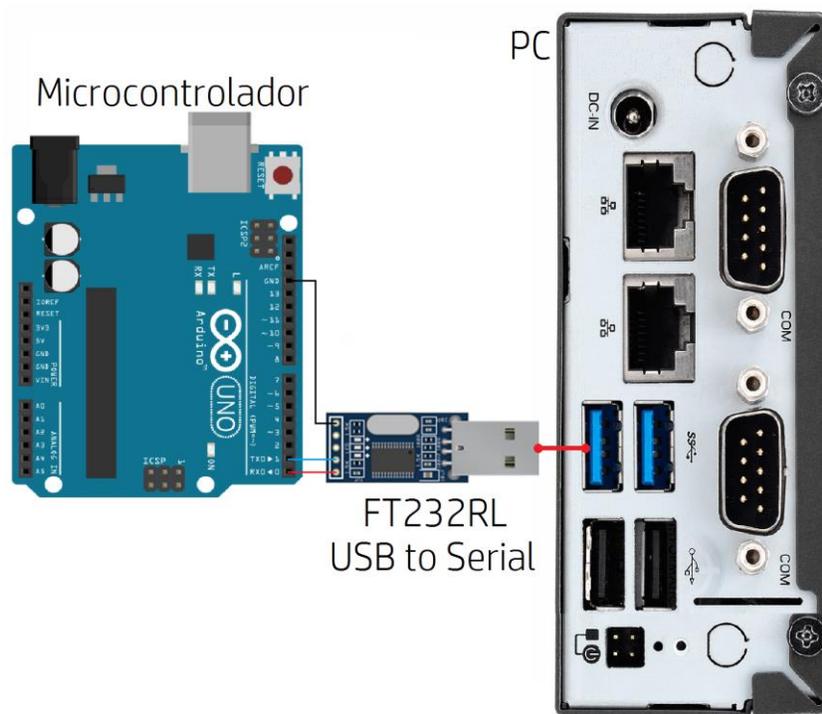


Figura 11. Diagrama de conexiones

El diagrama de bloques de la Figura 12 muestra el flujo de código del programa en MATLAB para la lectura, almacenamiento y despliegue de datos en la PC provenientes de un

microcontrolador. El programa comentado de la interfaz de monitoreo se encuentra en el Anexo 12.2.

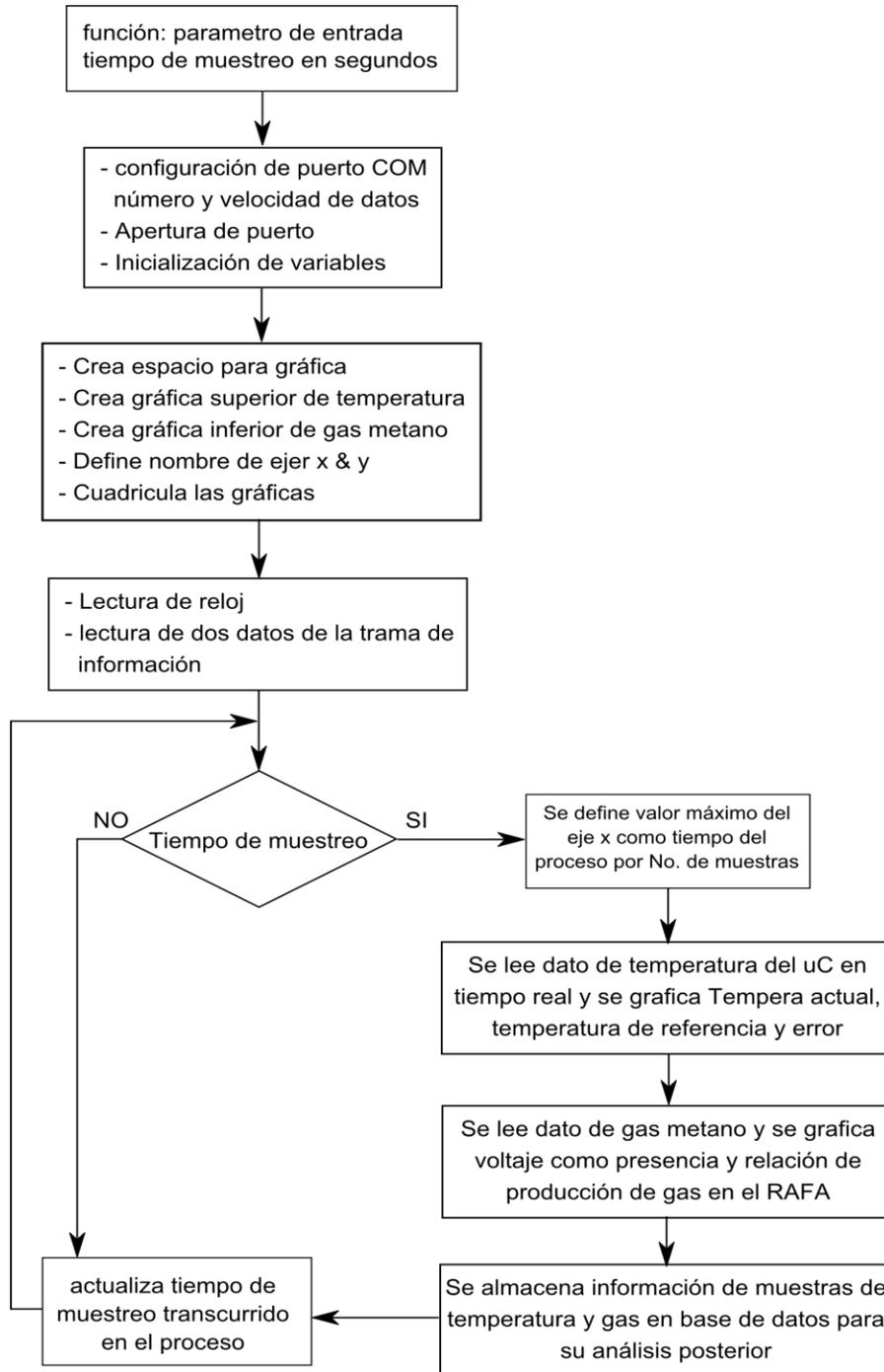


Figura 12. Diagrama de flujo de código en MATLAB

8.3 Estudio Biológico en el RAFA

8.3.1 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Se instaló un reactor tubular de vidrio, con un volumen de operación de 2 litros. El reactor está integrado por una chaqueta, a través de la cual se circula agua caliente para regular la temperatura dentro del reactor. Para elevar la temperatura del agua, se empleó un calentador solar de 8 tubos. El reactor cuenta con una campana interna para la recolección de biogás (CH_4 y CO_2); los cuales se cuantificaron empleando una columna invertida con solución salina. El agua residual se alimentó a través de una bomba peristáltica con control de flujo.

8.3.2 Inóculo, medio de cultivo y operación del reactor RAFA

El reactor RAFA se inoculó con 1/3 del volumen del reactor de lodo anaerobio proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales instalada en Valle de Bravo. Inicialmente, el reactor se alimentó con agua sintética, conteniendo 1.5 g DQO/L, a un TRH de 24h. Se empleó glucosa como fuente de carbono y energía, y amonio como fuente de nitrógeno para las rutas anabólicas. Una vez alcanzado el estado pseudo-estacionario, es decir, cuando la eficiencia de remoción de DQO presentó un coeficiente de variación menor al 10% y se cumplieron 5 TRHs como mínimo, se evaluó el sistema a través de las siguientes variables de respuesta: Eficiencia de remoción de DQO ($\%E_{\text{DQO}}$) y la velocidad de producción de metano (Q_{CH_4} ; ml CH_4/h). Una vez alcanzado el estado pseudo-estacionario, se elevó y se controló automáticamente la temperatura a 35°C empleando el calentador solar de 8 tubos. La misma metodología se siguió para la evaluación del agua residual industrial. El agua residual fue facilitada por la “Empresa Reciclagua”; un agua que es una mezcla de aguas residuales de más de 200 empresas.

9. Resultados y discusión

9.1 Simulación Hidrodinámica

Se modeló la geometría de un reactor RAFA con un radio interno de 0.03m, un grosor de 0.003m y una altura de 0.645m. La salida tiene un radio de 0.0025m y está situada a 0.61m de la base del reactor. Los lodos se consideraron como un material poroso (porosidad de 0.83) con una altura de 0.31m. En la Figura 13 se muestra la geometría modelada.

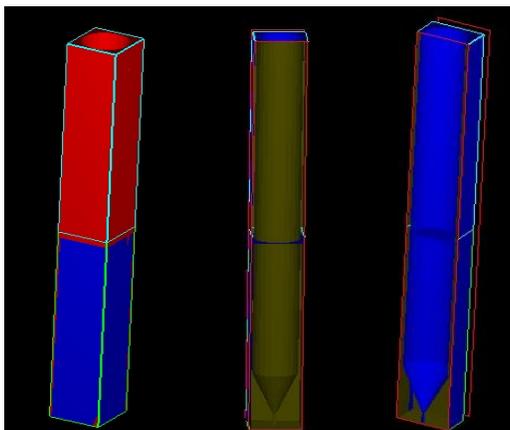


Figura 13. Modelación de la geometría del RAFA

Las propiedades que se consideraron para la simulación fueron: viscosidad del fluido, gravedad, volumen del reactor, densidad del agua y porosidad de los lodos anaerobios (Tabla 4).

Tabla 4. Características físico-químicas consideradas para las simulaciones

Variables	Valores
Volumen del reactor RAFA	2L
Gravedad	9.81m/s ²
Viscosidad a 20°C	0.001 kg/ms
Viscosidad a 30°C	0.000798 kg/ms
Porosidad de lodos	0.83
Tipo de fluido	Incompresible
Densidad del agua a 20°C	998 kg/m ³
Densidad del agua a 30°C	996 kg/m ³

Se definió un tamaño de celda de 2 milímetros y el número total de celdas fue de 204,768. Los escenarios simulados para obtener el comportamiento hidrodinámico se muestran en la Tabla 5:

Tabla 5. Flujos de entrada y TRH para las simulaciones a 20 y 30°C

Temperatura	TRH (h)	Flujo de entrada m ³ /s
20°C	4	1.38889E-7
20°C	24	2.31481E-8
30°C	4	1.38889E-7
30°C	24	2.31481E-8

En las condiciones iniciales para las simulaciones se consideró que el reactor RAFA estaba lleno.

En las condiciones de frontera se estableció el caudal de entrada y de salida, también se estableció que la salida está situada a 0.61m de la base del reactor y que el RAFA es de un material sólido, no deformable y estático.

9.1.1 Modelación del comportamiento hidrodinámico a 20°C

Para la modelación hidrodinámica a una temperatura de 20°C se consideraron 2 escenarios:

a) En el primer escenario se realizó la modelación hidrodinámica del reactor RAFA sin considerar la interacción del líquido con el biogás producido por los lodos anaerobios. Se generaron imágenes para los TRH de 4 y 24 horas, a una temperatura de 20°C (Figura 14).

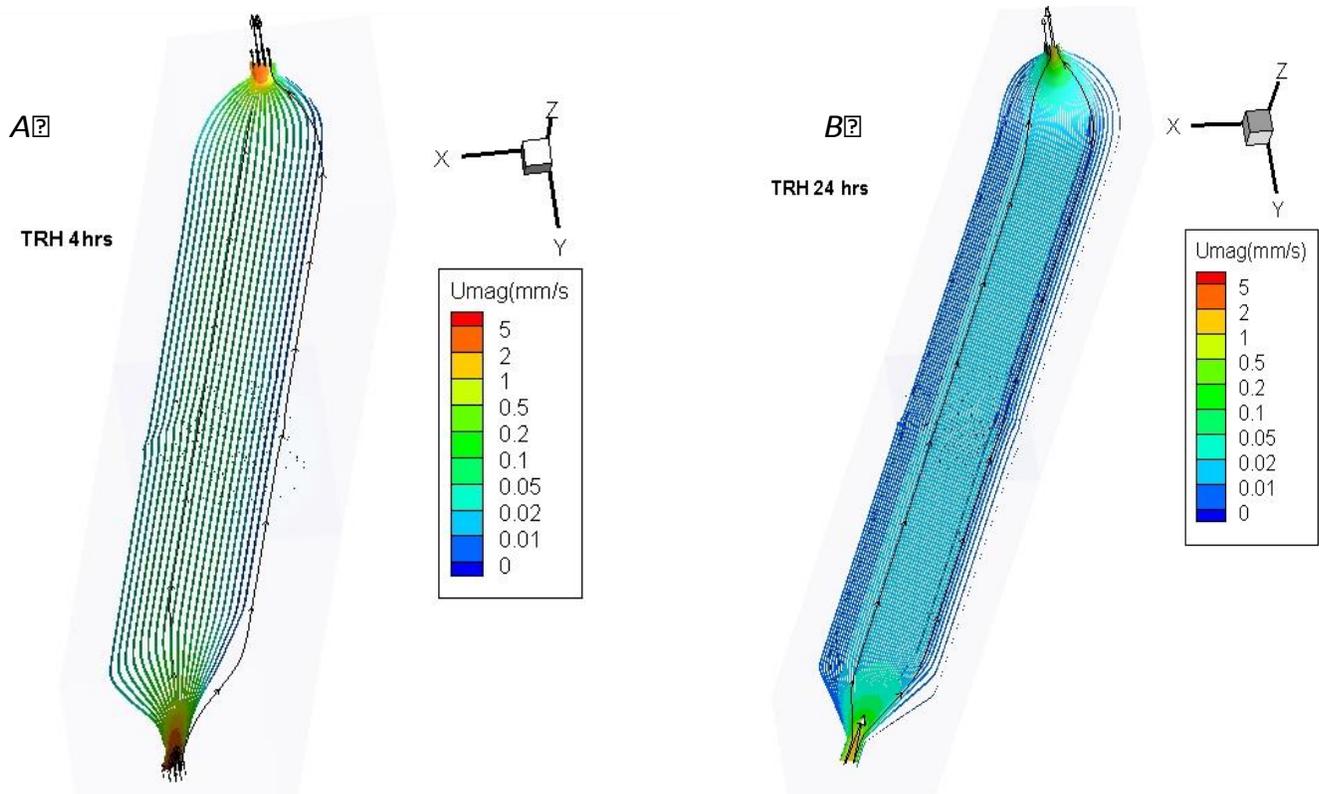


Figura 14. Simulación hidrodinámica a un TRH de 4h (A) y 24 h (B), a temperatura ambiente

En la Figura 14, de acuerdo a las líneas de corriente se muestra una distribución uniforme del movimiento del líquido dentro del RAFA para ambos TRH (4 y 24h), no se observaron comportamientos anómalos dentro del sistema, lo que indica un comportamiento hidrodinámico adecuado bajo ambos TRH.

La velocidad máxima que se alcanzó en el TRH de 4h fue de 8.99 mm/s, mientras que la velocidad máxima en el TRH de 24h fue de 1.49 mm/s.

Las mayores velocidades se observaron a la entrada y salida del reactor, asimismo, en la zona de reacción del reactor se presentaron velocidades uniformes por lo que no se alteró el tiempo de retención hidráulica. La velocidad promedio en el TRH de 4h fue de 0.027mm/s, mientras que en el TRH de 24h fue de 0.004625mm/s, por lo que se observa una correspondencia entre la velocidad promedio desarrollada en el reactor, el caudal de entrada y el TRH, puesto que en un TRH menor (4h), el caudal de entrada es mayor y la velocidad del fluido también es mayor. Todo lo anterior indica que no es necesario el

rediseño geométrico del reactor RAFA, para las condiciones de temperatura ambiente y ausencia de producción de biogás.

También se generaron cortes verticales (Figura 15) para las simulaciones de 4 y 24h a 20°C en donde se muestra que el influente asciende desde la parte inferior del RAFA, pasando por el manto de lodos a la parte superior sin problemas de flujo. No se observaron recirculaciones, canalizaciones o zonas muertas, pero se observó que la dirección del flujo fue de forma ascendente.

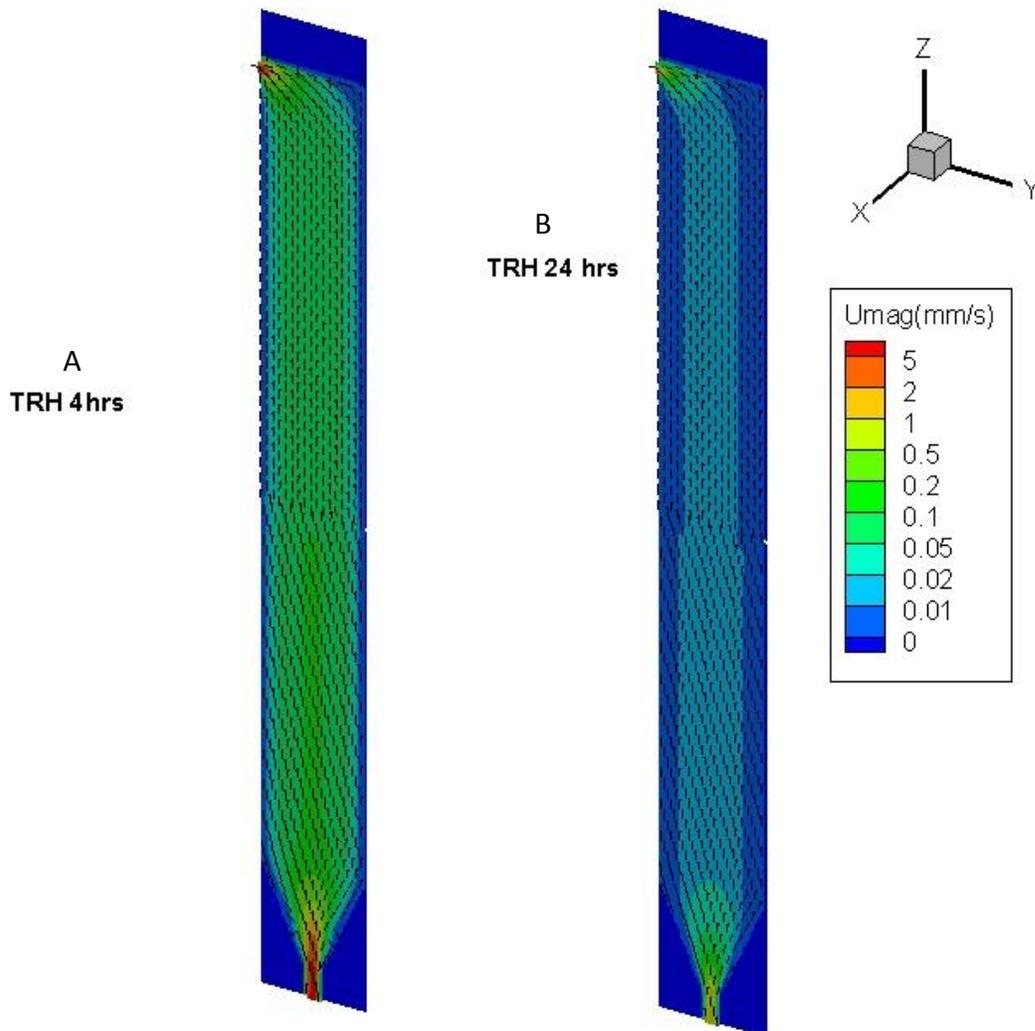


Figura 15. Cortes verticales para las simulaciones de 4 h (A) y 24 h (B).

b) En el segundo escenario, para un análisis de acuerdo a las condiciones experimentales del RAFA, se consideró la interacción del líquido con las burbujas de biogás producidas dentro del reactor a 20°C, para definir el número de burbujas se realizó un video del RAFA montado en el laboratorio y se reprodujo el video en cámara lenta para poder contar las burbujas que pasaban por un sección específica en un tiempo determinado en el reactor RAFA. Las modelaciones se realizaron para los TRH de 4 y 24h.

- Simulación a una temperatura de 20°C y un TRH de 24h con la presencia de biogás. Se consideró una producción de 30 burbujas por segundo.

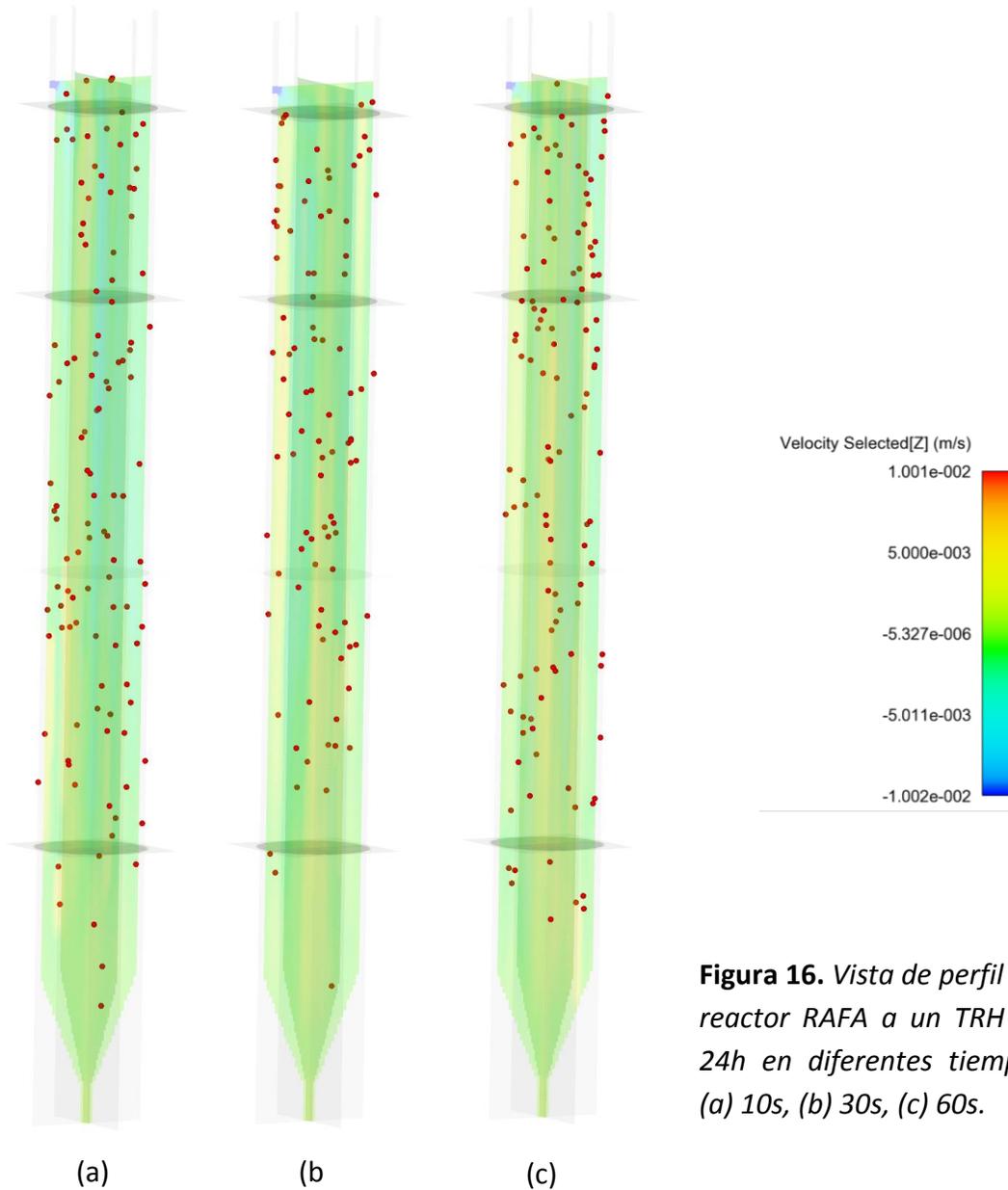


Figura 16. Vista de perfil del reactor RAFA a un TRH de 24h en diferentes tiempos (a) 10s, (b) 30s, (c) 60s.

En la Figura 16 se muestra la simulación del comportamiento hidrodinámico a un TRH de 24h en vista de perfil y diferentes tiempos. En las imágenes se observa que las burbujas modifican significativamente la hidrodinámica del reactor (a comparación con la simulación sin burbujas) ya que estas generan un desplazamiento del líquido produciendo un cambio de velocidad en la trayectoria por la que se mueven. Hay un aumento en la velocidad, siendo la velocidad promedio de 0.5694645mm/s. La trayectoria que siguen las burbujas produce

que parte del líquido se desplace hacia arriba y otra parte hacia abajo originando un mezclado del líquido por donde transitan las burbujas.

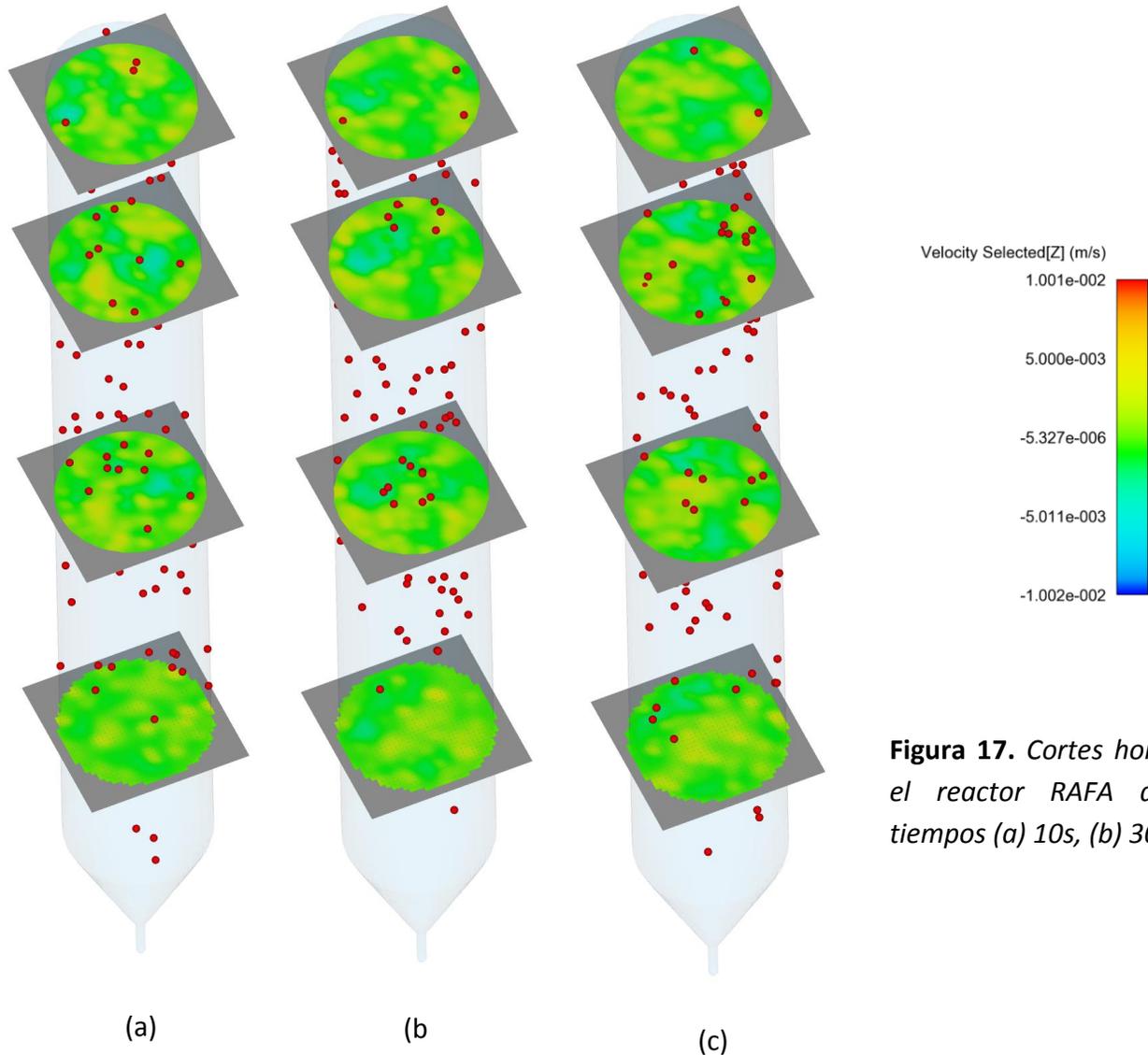


Figura 17. Cortes horizontales en el reactor RAFA a diferentes tiempos (a) 10s, (b) 30s, (c) 60s.

En la Figura 17 se observa que el líquido es desplazado en dirección ascendente y descendente por efecto de las burbujas. Las coloraciones amarillas muestran un aumento de la velocidad en el espacio por donde pasan las burbujas en dirección ascendente, las coloraciones azules representan una dirección descendente y las coloraciones verdes muestran velocidades cercanas a cero.

- Modelación a 20°C y un TRH de 4h con presencia de biogás. Se consideró una producción de 30 burbujas por segundo.

En la modelación hidrodinámica correspondiente a un TRH de 4h, también hay un aumento de velocidad en el líquido que se encuentra en el cuerpo del reactor debido a la acción de las burbujas.

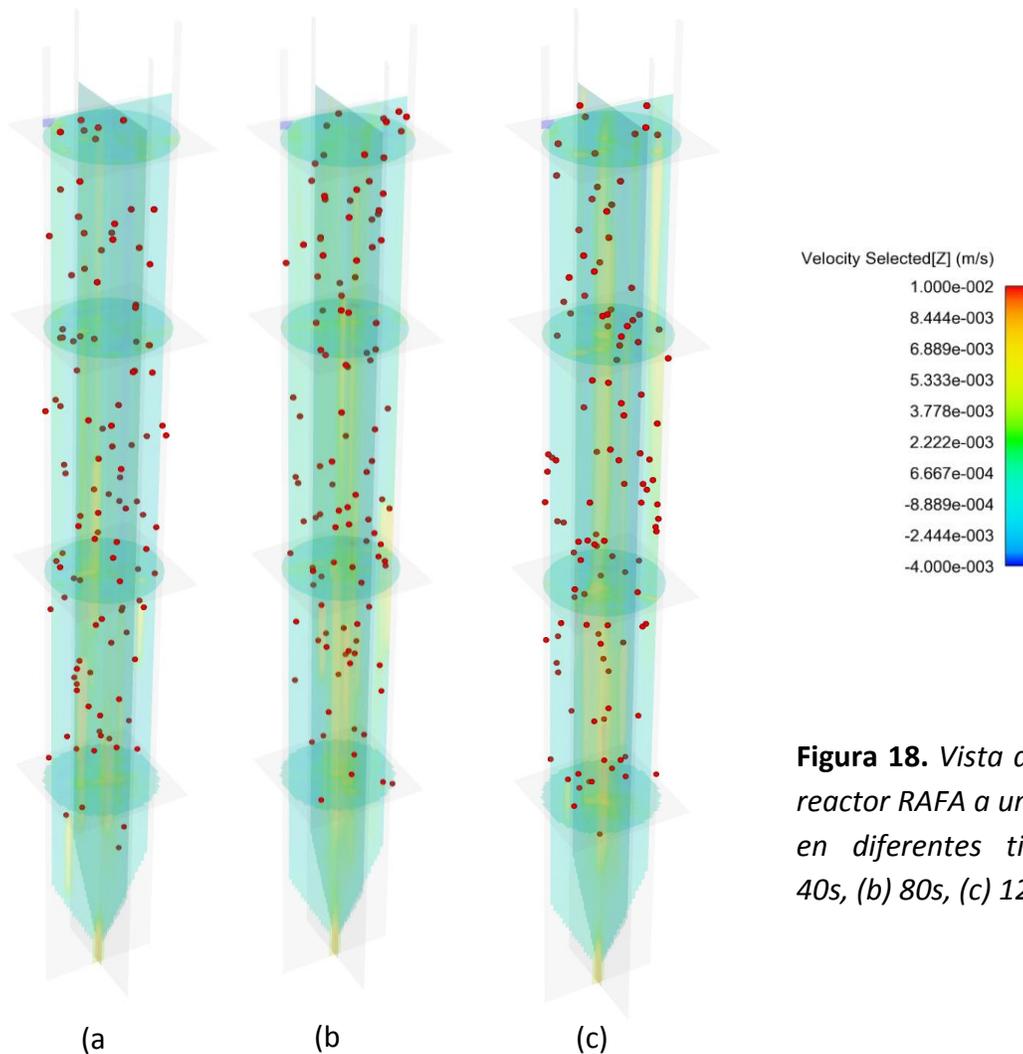


Figura 18. Vista de perfil del reactor RAFA a un TRH de 4h en diferentes tiempos (a) 40s, (b) 80s, (c) 120s.

En la Figura 18 se muestra la magnitud de velocidad en el RAFA a un TRH de 4h, la velocidad promedio fue de 0.64083mm/s y la mayor velocidad alcanzada de 47.73cm/s.

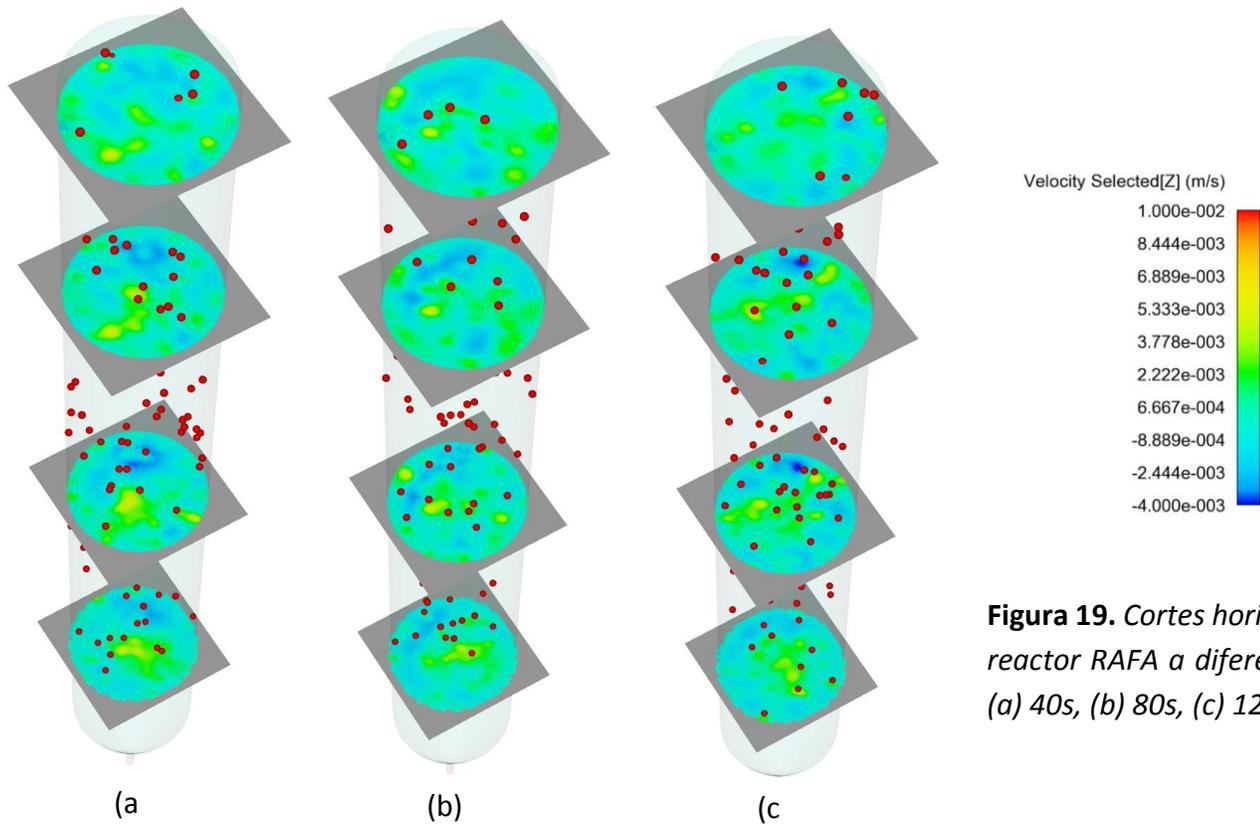


Figura 19. Cortes horizontales en el reactor RAFA a diferentes tiempos (a) 40s, (b) 80s, (c) 120s.

En los cortes horizontales de la Figura 19 se observa la modificación que se produce en la zona por la que transitan las burbujas, generando zonas en las que el líquido asciende y otras en las que desciende (magnitudes negativas en la escala de color).

9.1.2 Modelación hidrodinámica a 30°C

Para la modelación hidrodinámica a 30°C se realizaron las simulaciones considerando ambos casos con biogás y en ausencia de biogás para los TRH de 4 y 24h.

a) En el primer escenario a 30°C y un TRH de 24h no se consideró el efecto del biogás en el RAFA y se observaron condiciones favorables de flujo, la velocidad máxima que se presentó fue de 1.79mm/s y la velocidad promedio de 0.0146mm/s (Figura 20a).

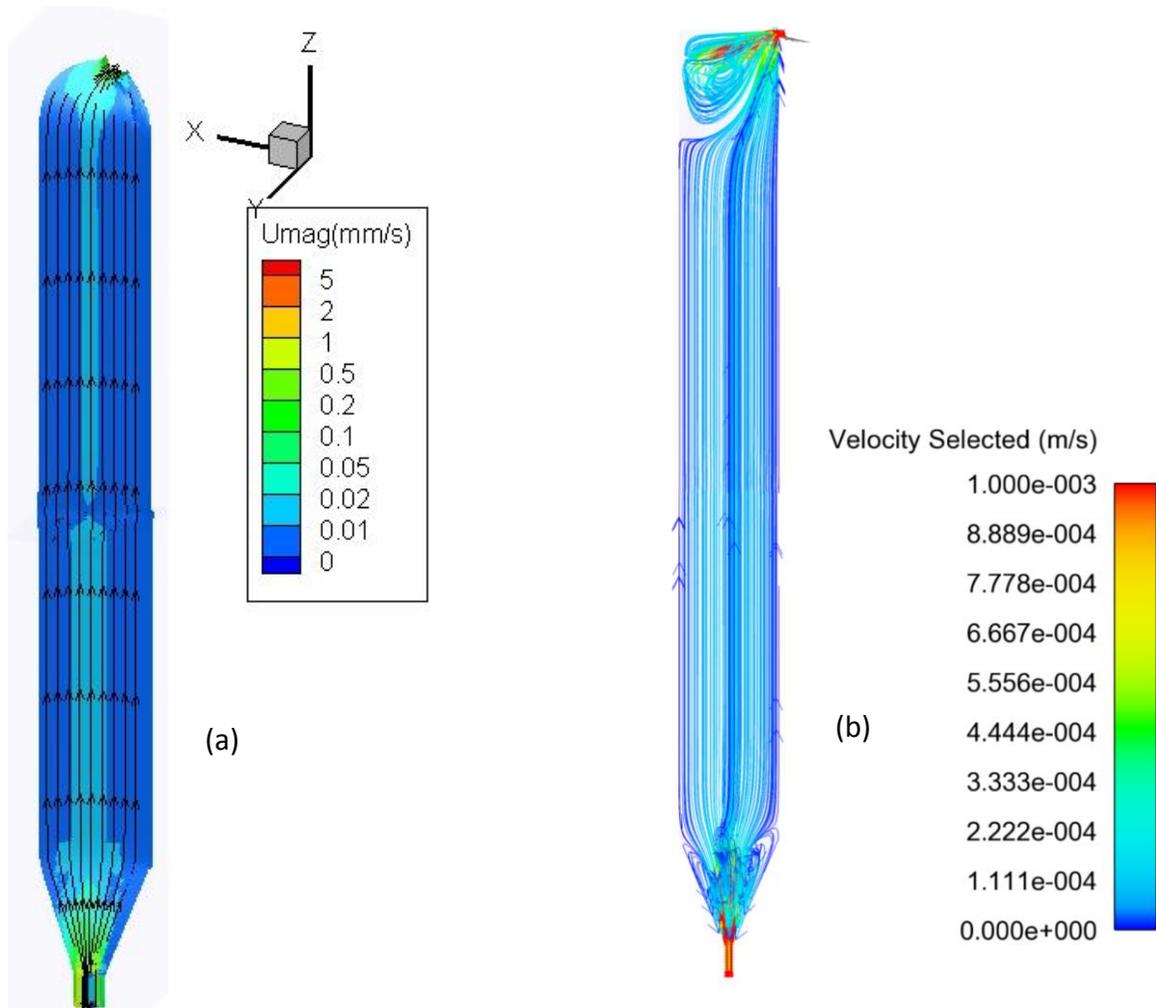


Figura 20. (a) Simulación hidrodinámica a un TRH de 24h a 30°C (b) Simulación hidrodinámica

Sin embargo en un TRH de 4h, sin considerar el biogás, como se muestra en la Figura 20b, se observaron comportamientos anómalos en la entrada y salida del reactor. En la Figura 21 se muestran las recirculaciones que se presentan en un TRH de 4h a 30°C. Las recirculaciones internas podrían generar la acumulación de contaminantes, provocando así un efecto negativo sobre el aspecto biológico. La velocidad máxima que se presenta a 30°C y un TRH de 4h es de 11.34mm/s y la velocidad promedio de 0.1045mm/s.

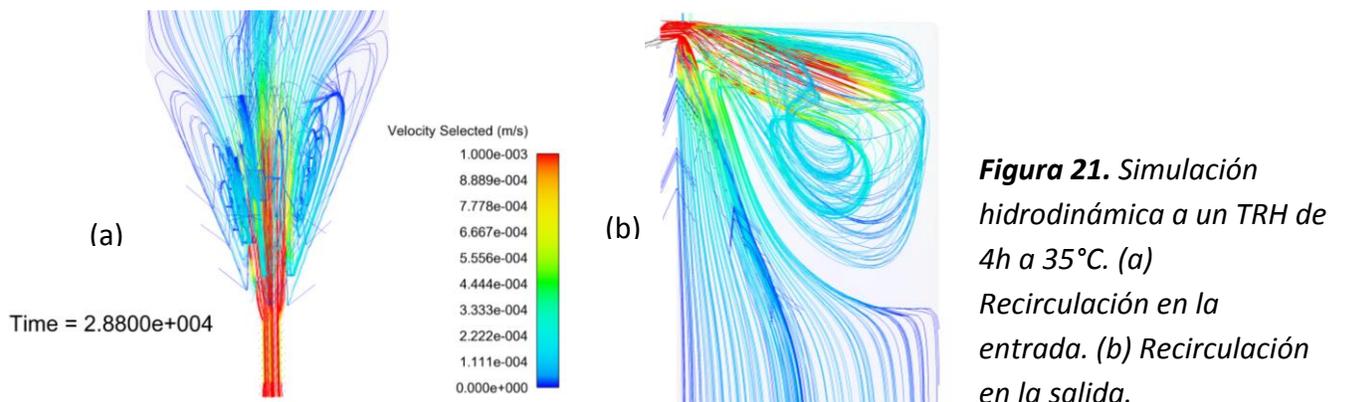


Figura 21. Simulación hidrodinámica a un TRH de 4h a 35°C. (a) Recirculación en la entrada. (b) Recirculación en la salida.

b) En el segundo escenario se consideró el efecto de las burbujas de biogás, en los TRH de 4 y 24h a 30°C.

- Modelación hidrodinámica a 30°C a un TRH de 24h. Se consideró una producción de 45 burbujas por segundo.

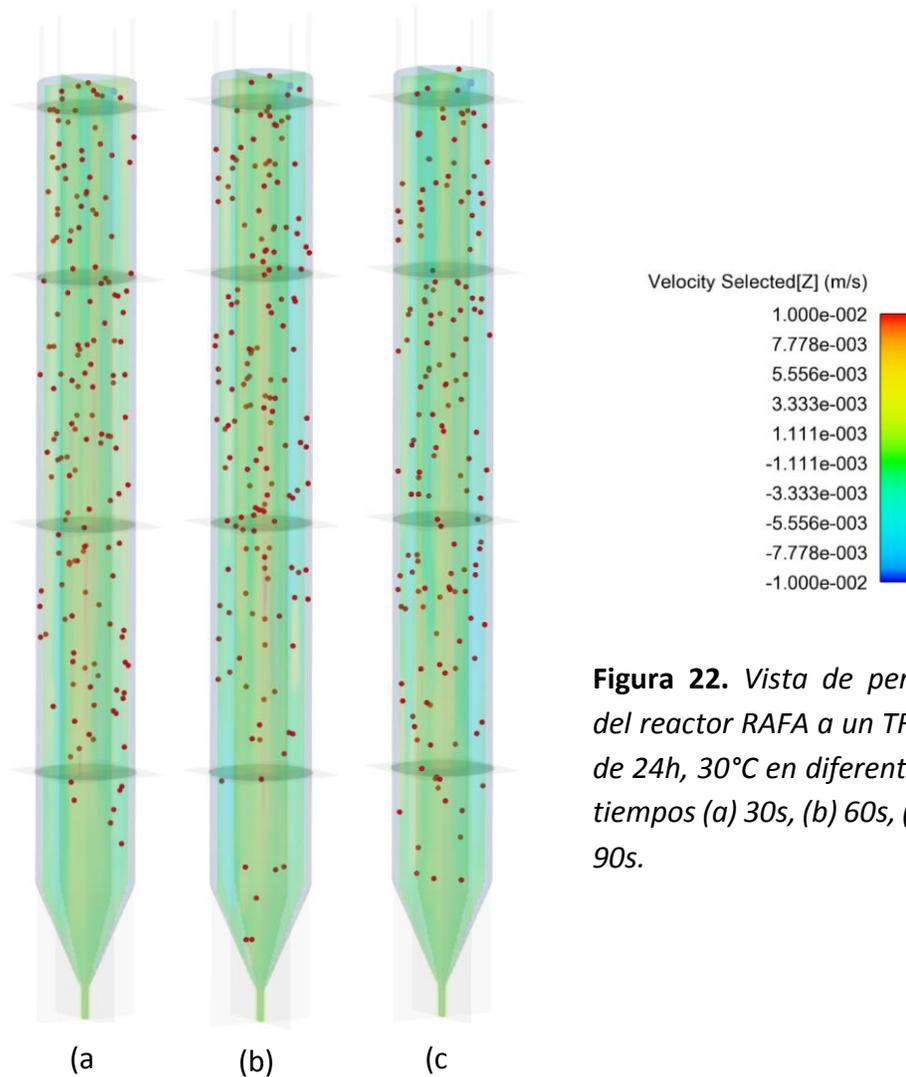


Figura 22. Vista de perfil del reactor RAFA a un TRH de 24h, 30°C en diferentes tiempos (a) 30s, (b) 60s, (c) 90s.

En la Figura 22 se presenta una imagen de perfil del RAFA a 30°C y a un TRH de 24h, donde se observa una mayor presencia de burbujas y por tanto mayor interacción de estas con el líquido del reactor. La velocidad aumenta debido al tránsito de las burbujas, se observan zonas con una coloración rojiza, con una velocidad aproximada de 1cm/s. El área coloreada de amarillo es mayor comparada con la simulación a 20°C.

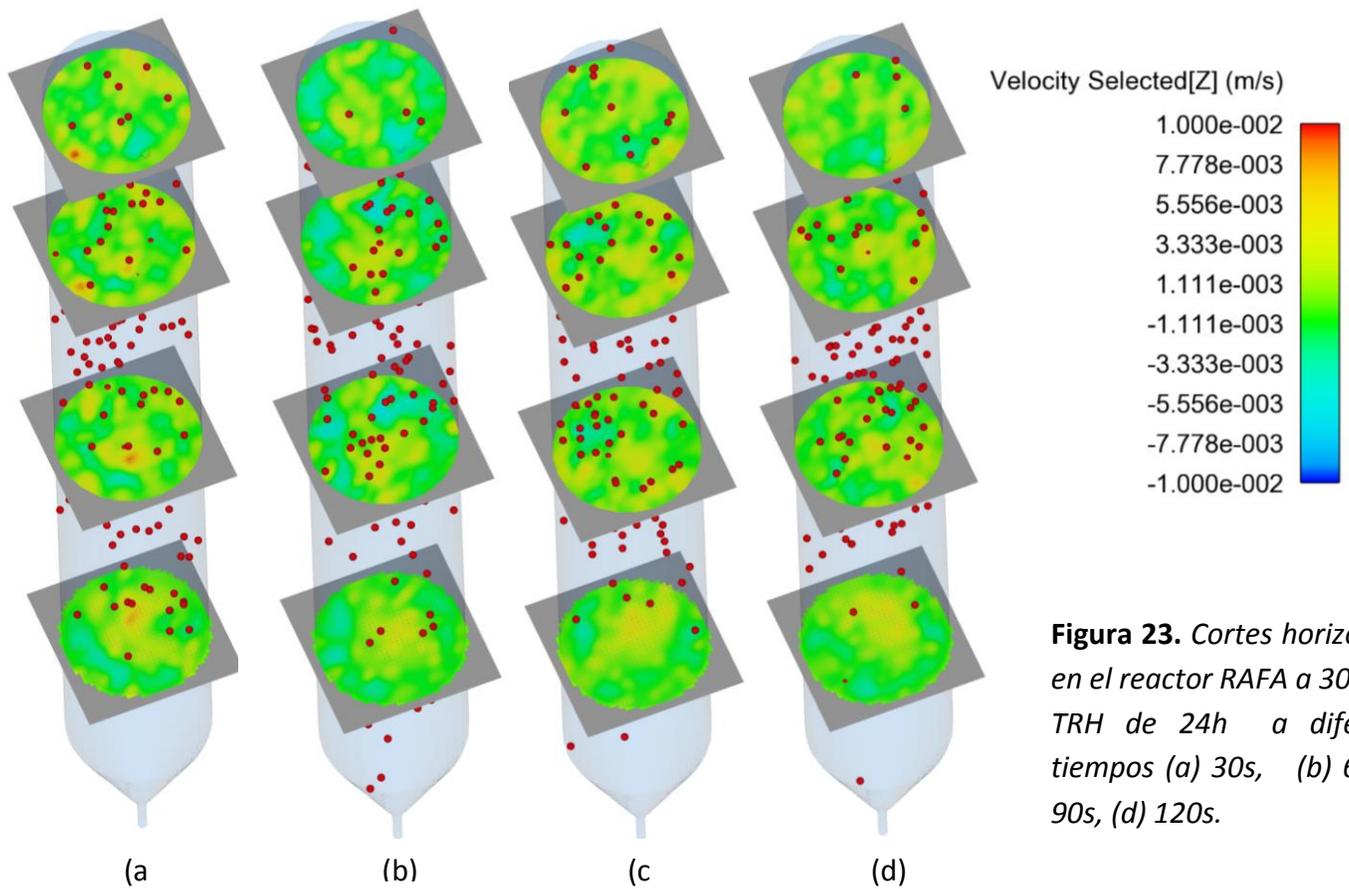


Figura 23. Cortes horizontales en el reactor RAFA a 30°C y un TRH de 24h a diferentes tiempos (a) 30s, (b) 60s, (c) 90s, (d) 120s.

En la Figura 23 se muestran cortes horizontales donde se observa que hay mayor presencia de burbujas comparado con la simulación a 20°C, la mayor cantidad de burbujas produce un mayor desplazamiento del fluido en dirección ascendente y descendente generando mayores velocidades y procesos de mezclado. La velocidad promedio fue de 0.820 mm/s.

- Modelación hidrodinámica a 30°C a un TRH de 4h. Se consideró una producción de 45 burbujas por segundo.

En la Figura 24 se muestra la vista de perfil del reactor RAFA a 30°C y un TRH de 4h, se observan mayores zonas de coloración amarilla comparadas con las que se muestran en la simulación a 30°C y un TRH de 24h, lo que indica mayor velocidad del fluido. La velocidad promedio es de 0.848 mm/s.

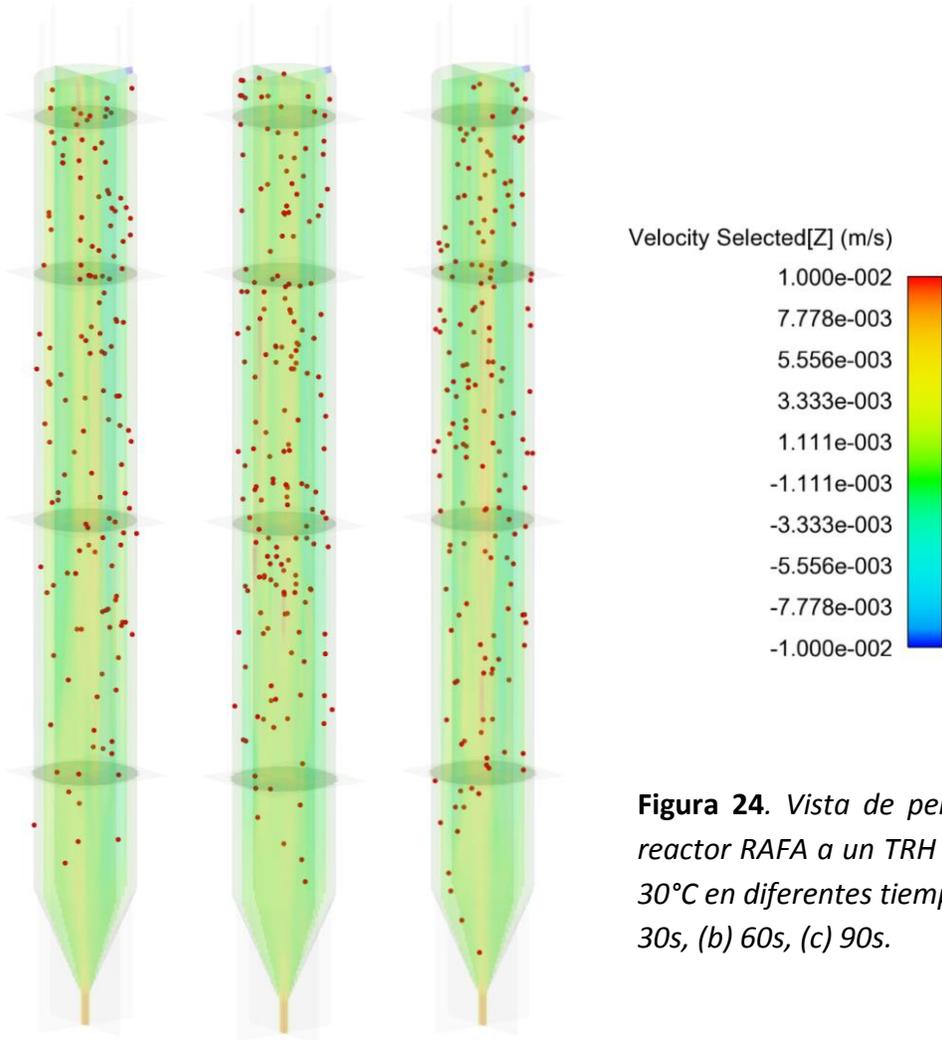


Figura 24. Vista de perfil del reactor RAFA a un TRH de 4h, 30°C en diferentes tiempos (a) 30s, (b) 60s, (c) 90s.

En la Figura 25 se muestran cortes horizontales en el reactor RAFA a diferentes tiempos. La escala de la velocidad se muestra en colores, la coloración en azul indica que la dirección es descendente, la coloración amarilla, verde y roja representa una dirección del fluido ascendente. Se muestran mayores zonas coloreadas de roja en comparación con las simulaciones anteriores.

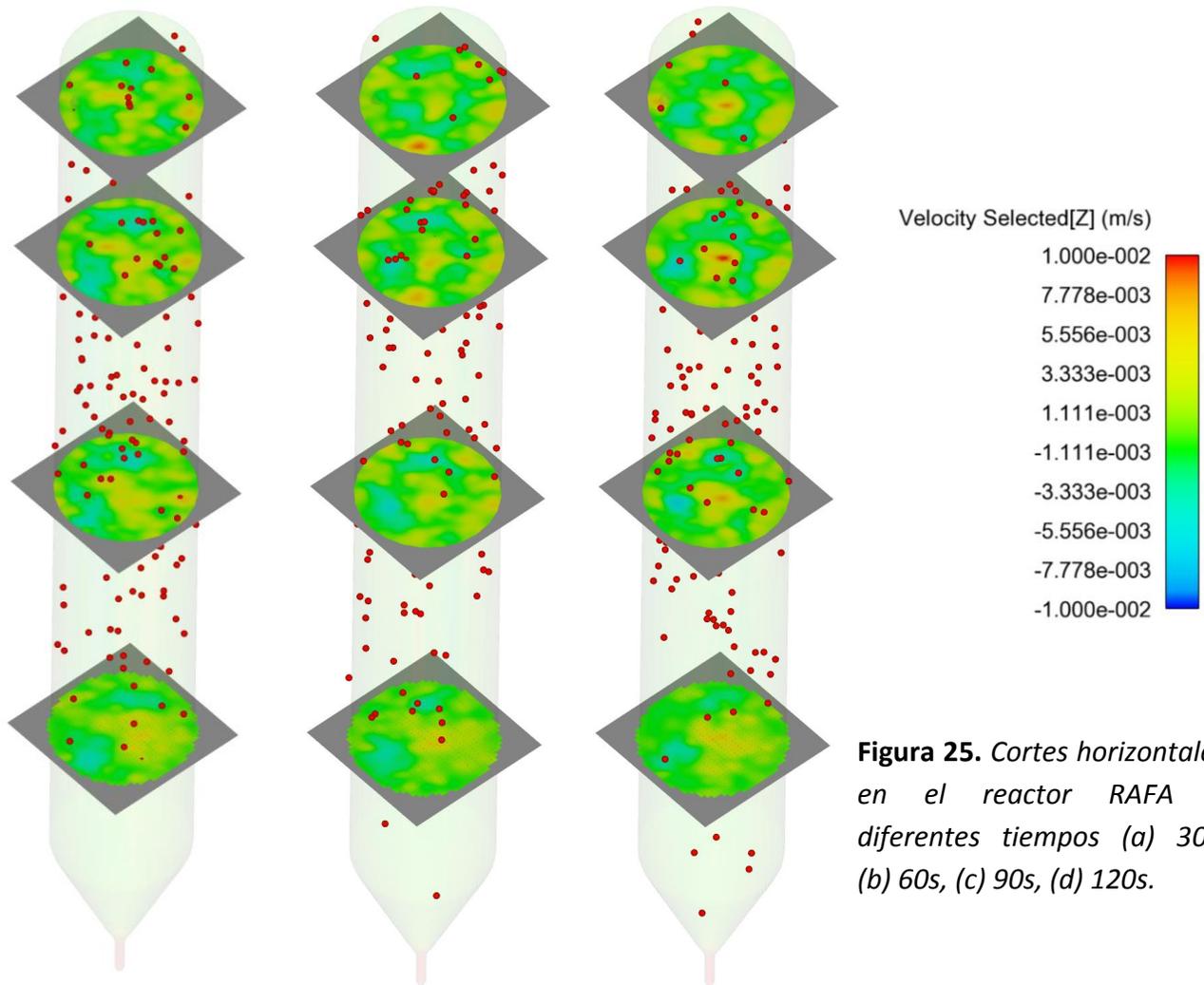


Figura 25. Cortes horizontales en el reactor RAFA a diferentes tiempos (a) 30s, (b) 60s, (c) 90s, (d) 120s.

9.1.3 Discusión del comportamiento hidrodinámico

De acuerdo a las simulaciones efectuadas en los TRH de 4 y 24h a una temperatura de 20 y 30°C, el comportamiento de flujo en el reactor RAFA cambia significativamente con la presencia de biogás, debido a que las burbujas generan un desplazamiento del líquido produciendo un cambio de velocidad en la trayectoria por la que se mueven y un cambio de dirección de forma ascendente y descendente en el fluido circundante, originando un mezclado del líquido por donde transitan, lo que coincide con el estudio realizado mediante la técnica de estímulo-respuesta realizado por Singh *et al.* (2006) que documenta que a temperaturas entre 20 y 32°C, en un reactor RAFA alimentado con aguas residuales

municipales, el patrón de flujo sigue una dinámica de flujo completamente mezclado, del mismo modo Unigarro *et al.* (2014) consideran que los reactores RAFA tienen un comportamiento de flujo completamente mezclado con recirculaciones y zonas muertas, sin embargo Singh *et al.* (2006) señalan que en un reactor completamente mezclado se produce un licor de composición uniforme, por lo que se puede despreciar el flujo de bypass.

Cabe señalar que la producción de biogás también depende del sustrato a metabolizar, de la biodegradabilidad del mismo y de la temperatura de operación de los reactores RAFA, por lo tanto, el mezclado dentro del reactor dependerá de dichos factores y debido a esto se puede presentar discontinuidad en el comportamiento de mezclado como lo señalan Ren *et al.* (2009) y también se muestra en el estudio de estímulo-respuesta realizado por Sevilla *et al.* (2009) en el que el mezclado en un RAFA fue pobre debido a la baja carga orgánica y la baja producción de biogás.

En la Tabla 6 se muestra una comparación de las velocidades promedio obtenidas en las simulaciones efectuadas, se observa un incremento significativo de la velocidad al considerarse la interacción con el biogás.

Tabla 6. Velocidades promedio.

	20°C mm/s	s/b* mm/s	30°C mm/s	s/b* mm/s	20°C mm/s	c/b** mm/s	30°C mm/s	c/b** mm/s
TRH 4h	0.027		0.104		0.640		0.848	
TRH 24h	0.004		0.014		0.569		0.820	

s/b* Sin interacción de biogás; c/b** interacción de biogás

De acuerdo con Singh *et al.* (2006) a temperaturas menores de 20°C el patrón de flujo del reactor cambia a régimen tipo pistón, lo que se atribuye a la baja producción de biogás asociada a las bajas temperaturas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos de las simulaciones sin considerar la interacción del biogás puesto que muestran una distribución uniforme del movimiento del líquido dentro del RAFA y no se observaron comportamientos anómalos dentro del sistema, de acuerdo a dichas simulaciones se observa una correspondencia entre la velocidad promedio y el caudal relacionado al TRH.

En las simulaciones en las que se consideró la interacción con el biogás la velocidad promedio tiene una mayor relación con la producción de burbujas que con el caudal de alimentación asociado al TRH.

9.1.2 Comparación del TRH real y el teórico de 4h en la modelación hidrodinámica a 20°C

- Simulación de un TRH teórico de 4h, 20°C, con interacción de biogás

Se realizó una simulación para comparar la correspondencia entre el TRH teórico de 4h y el que se desarrolla de acuerdo a las simulaciones al interior del RAFA a 20°C y con interacción de burbujas.

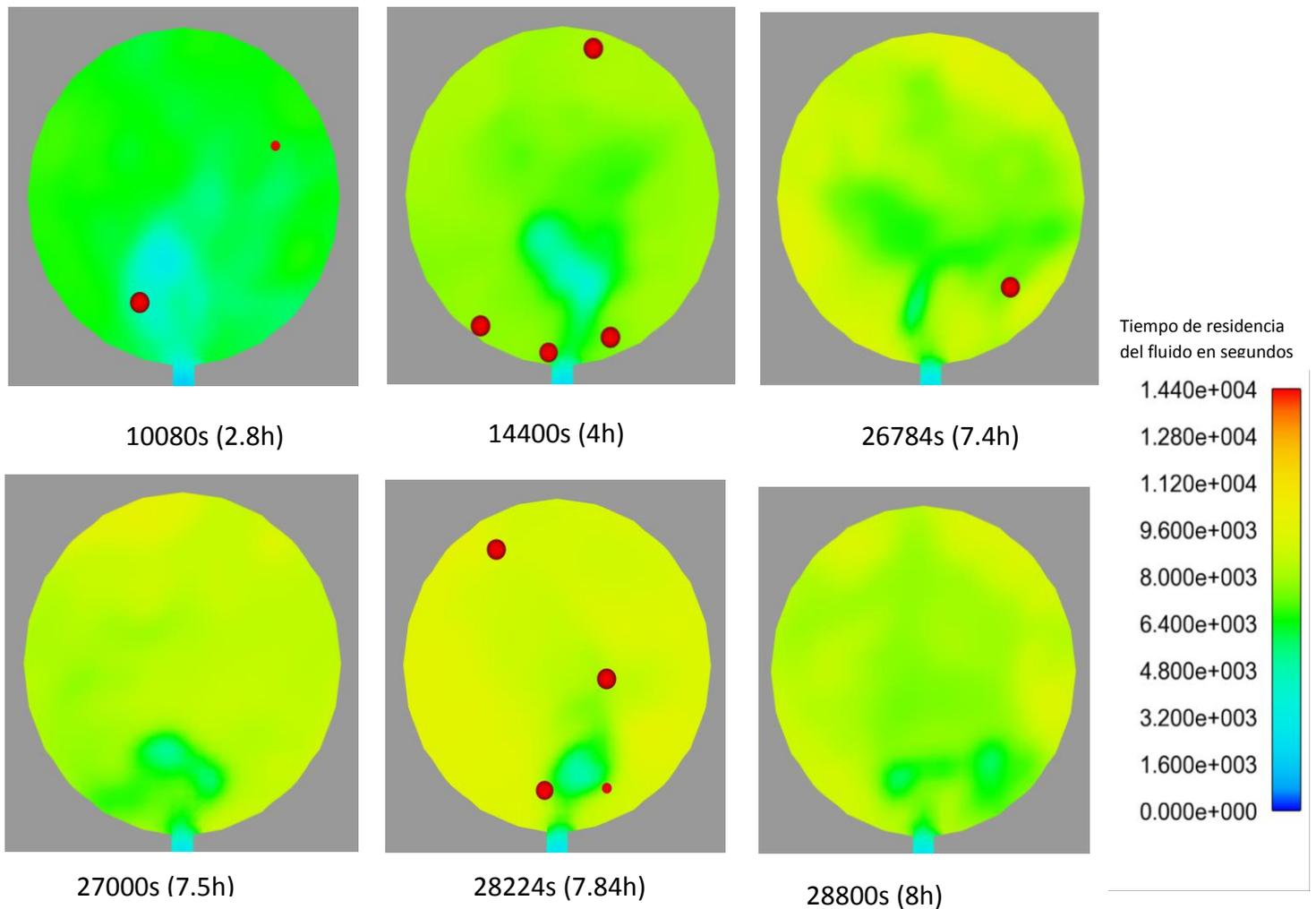


Figura 26. Cortes horizontales del tiempo de residencia del fluido en el reactor RAFA a diferentes tiempos (s) en un TRH de 4h y 20°C

En la Figura 26 se presentan cortes horizontales a la altura de la salida del RAFA, en las imágenes se observa que el tiempo que permanece el agua dentro del reactor varía debido a la interacción del agua residual con las burbujas; hay un cambio en la velocidad ascensional del agua y en la dirección del fluido con respecto al tiempo. También hay un

mezclado entre el agua con mayor tiempo en el reactor y la que tiene poco tiempo de haber ingresado. De acuerdo a la Figura 27 gran parte del agua permanece aproximadamente 9600s, es decir 2.6h lo que representa un TRH menor que el teórico de 4h, cabe señalar que el TRH que se presenta es un promedio del tiempo que permanece el agua que esta poco tiempo y la que permanece más tiempo en el RAFA.

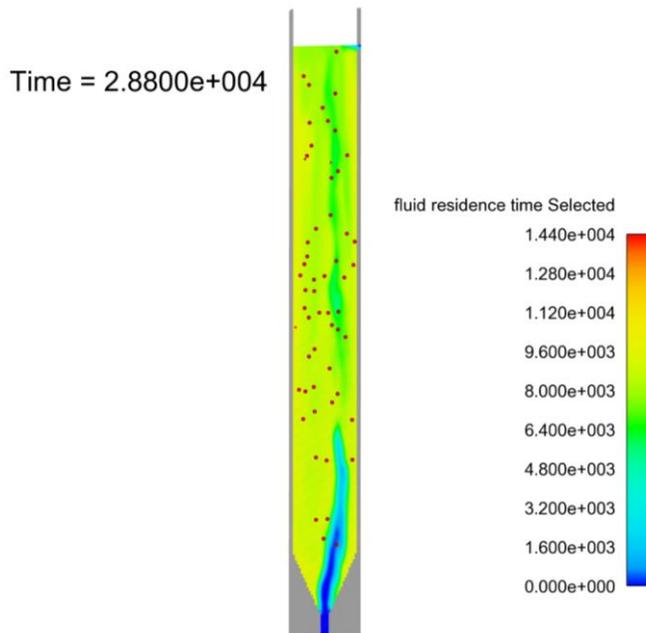


Figura 27. Corte vertical correspondiente al TRH de 4h a 20°C

- Simulación hidrodinámica de un TRH teórico de 4h, 30°C, con interacción de burbujas.

Se realizó una simulación hidrodinámica con un TRH teórico de 4h y 30°C para observar el comportamiento del fluido con la interacción de una mayor cantidad de burbujas producidas por los lodos anaerobios.

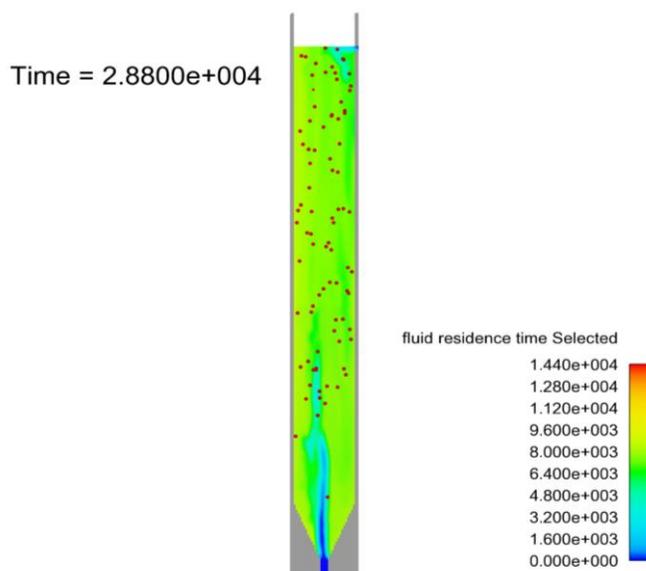


Figura 28. Corte vertical correspondiente al TRH de 4h a 30°C

En la Figura 28 se muestra el tiempo de residencia del fluido en una escala de colores, se observa que el agua permanece aproximadamente entre 6400s y 8000s dentro del reactor, el tiempo que permanece el agua en el reactor a 30°C es menor al tiempo que permanece cuando el agua está a 20°C, lo que está relacionado con la viscosidad del agua y a la producción de biogás en las respectivas temperaturas.

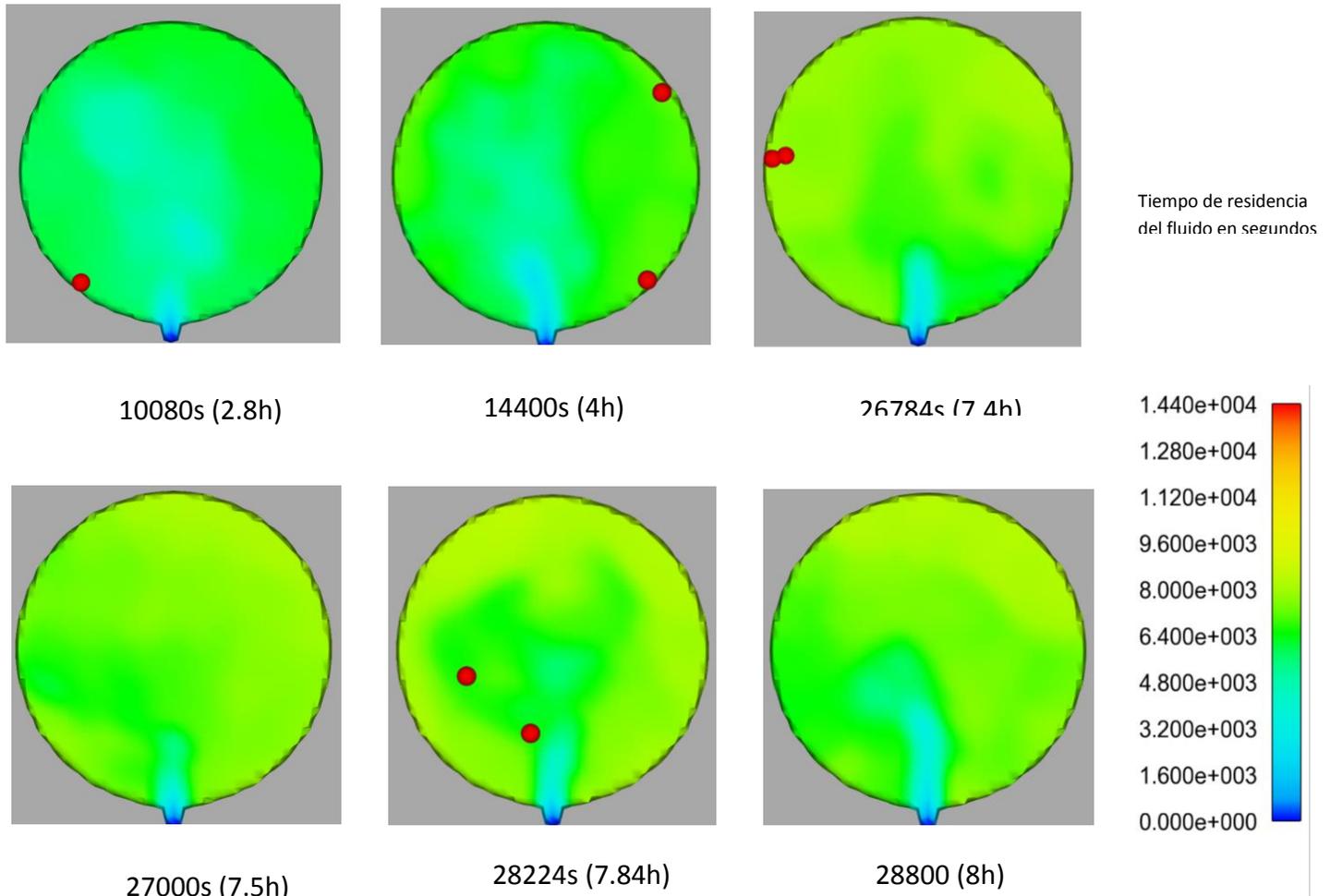


Figura 29. Cortes horizontales del tiempo de residencia del fluido en el reactor RAFA a diferentes tiempos (s) en un TRH de 4h a 30°C.

- Simulación hidrodinámica de un TRH teórico de 4h, 30°C, sin interacción de burbujas

Se realizó una simulación hidrodinámica con un TRH teórico de 4h, 30°C, sin interacción de biogás para observar el comportamiento del TRH en ausencia de burbujas, en la Figura 30 se muestra un corte vertical del reactor RAFA en el que se muestra el tiempo de residencia del agua en el reactor en escala de colores.

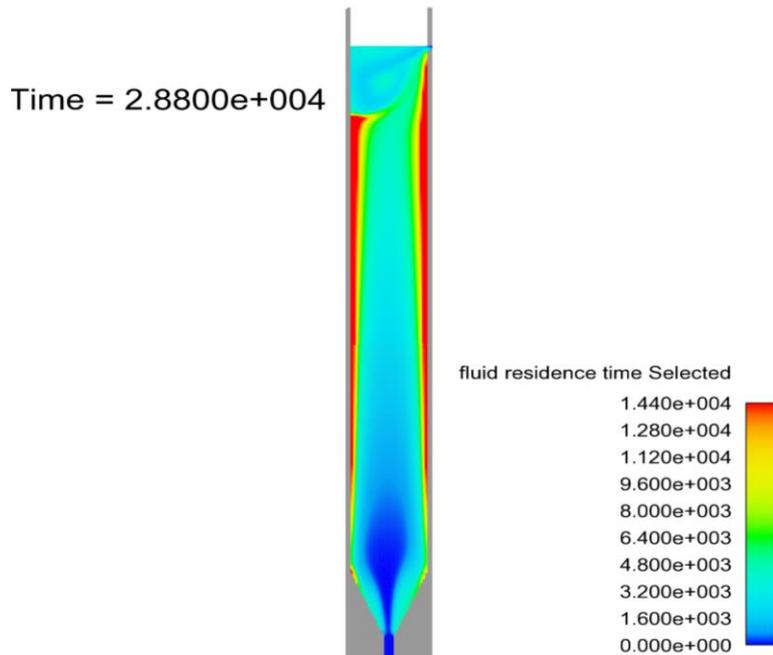


Figura 30. Corte vertical correspondiente al TRH de 4h a 30°C y ausencia de

En la Figura 30 se observa que el agua que permanece más tiempo dentro del reactor es la que se encuentra cercana a las paredes y la que permanece menos tiempo es la que se encuentra cerca del centro. En la Figura 31 se observa que debido a las recirculaciones que se generan en el reactor el tiempo de residencia del fluido no es uniforme.

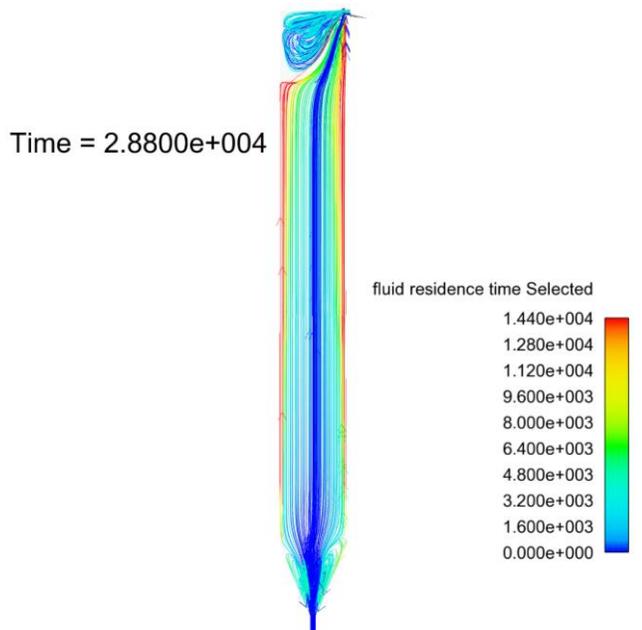


Figura 31. TRH de 4h a 30°C y ausencia de biogás, escala en segundos.

El TRH se ve modificado por las recirculaciones internas que se generan a una temperatura de 30°C debido al cambio de la viscosidad del agua. Sin embargo al incluir la interacción con

biogás el comportamiento hidrodinámico cambia, las burbujas impiden la formación de las recirculaciones.

9.2 Control y Automatización

Se diseñó la electrónica de instrumentación, potencia, control y comunicación para regular el paso de agua caliente proveniente del calentador solar a través de la chaqueta del RAFA en un control de lazo cerrado (Figura 32).

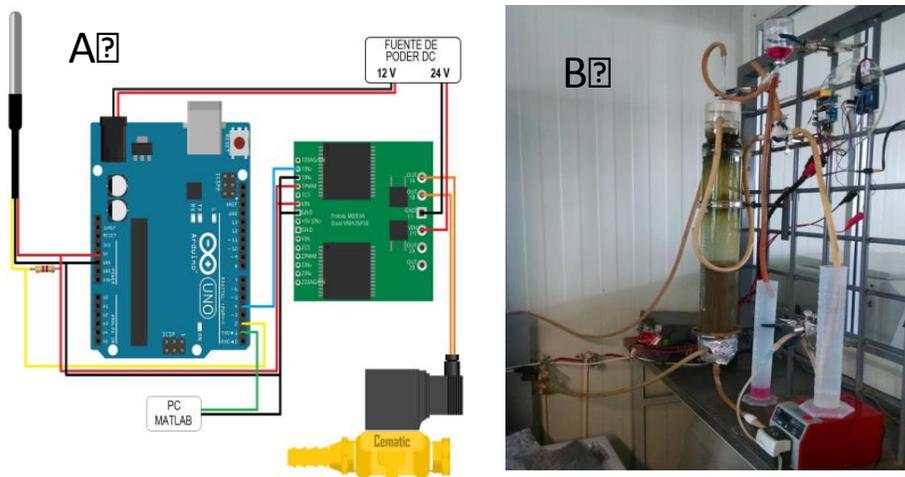


Figura 32. Sistema de instrumentación y control del RAFA. A) Sistema de control, B) reactor RAFA.

El microcontrolador Arduino® como sistema electrónico de control realiza la lectura digital de temperatura en grados Celsius a través de un sensor DS18B20 instalado en el reactor, comparando dicha señal con una temperatura de referencia definida.

El resultado de esta resta, conocido como error de actuación, es regulado por un control on/off que determina la apertura y cierre de una electroválvula Cematic PD02022. Este control evalúa el signo del error, si es positivo (verdadero) abre la válvula y si es negativo (falso) cierra la misma, esto con un interruptor electrónico como etapa de potencia UK1122, permitiendo así el paso de agua caliente procedente del calentador solar a la chaqueta del reactor hasta que se obtiene la temperatura óptima. Los resultados de la temperatura controlada en el reactor se envían a una PC por un convertidor serial – USB, estos son almacenados para visualizarse mediante una interfaz desarrollada con el IDE de MATLAB como se muestra en la Figura 33.

En la Figura 33 la línea azul representa la temperatura dentro del reactor, la línea roja corresponde a la temperatura de referencia y la línea verde representa el error. Cuando la temperatura del reactor está por debajo de la línea de referencia, automáticamente el sistema de control lo regula a la temperatura de referencia. La línea rosa muestra la señal del sensor de gas metano que indica la presencia o ausencia del gas.

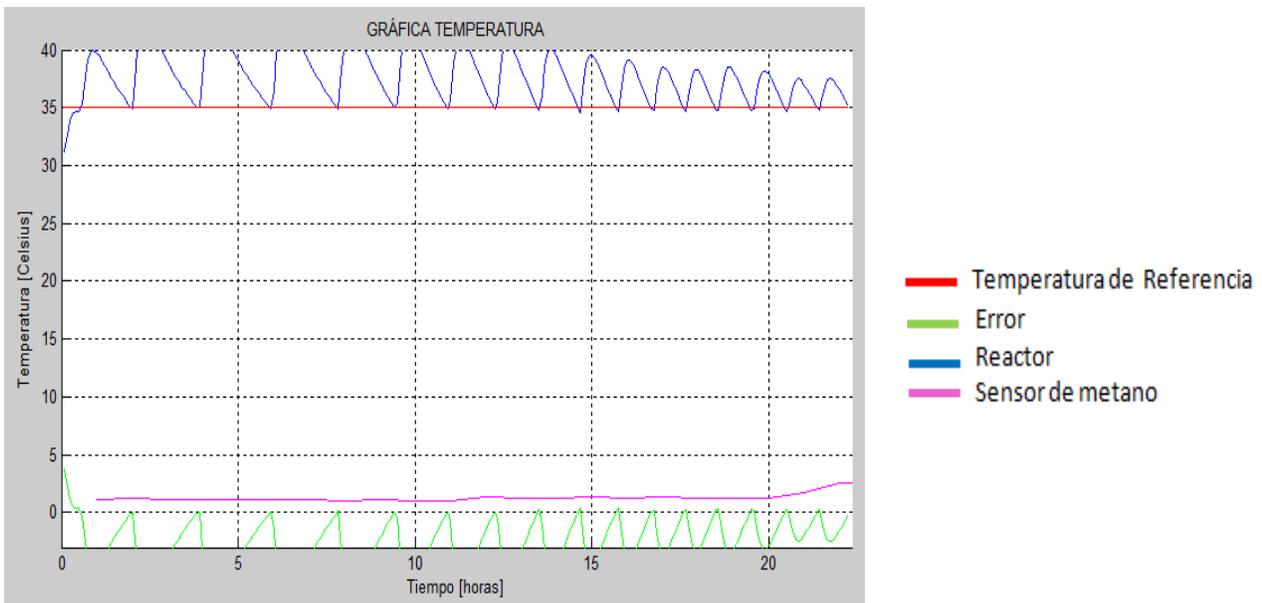


Figura 33. Perfil de control de temperatura a 35°C

En la etapa I la operación del RAFA fue a temperatura ambiente y con agua sintética, por lo que solo se monitoreó la temperatura y la producción de biogás (sensor de biogás). Durante la etapa II se implementó el sistema de control en el cual se estableció la temperatura de referencia en 35°C, lo que permitió mantener una temperatura adecuada para los procesos biológicos de la biomasa anaerobia por 3 semanas (Figura 33), sin embargo, durante el tiempo en que se operó esta etapa hubo varios días nublados por lo que no fue posible mantener la temperatura estable (Figura 34a) y se decidió fijar la temperatura de referencia en 29°C, logrando mayor estabilidad como se observa en la Figura 34b, al establecer esta temperatura de referencia, el reactor se mantuvo por encima de los 30°C.

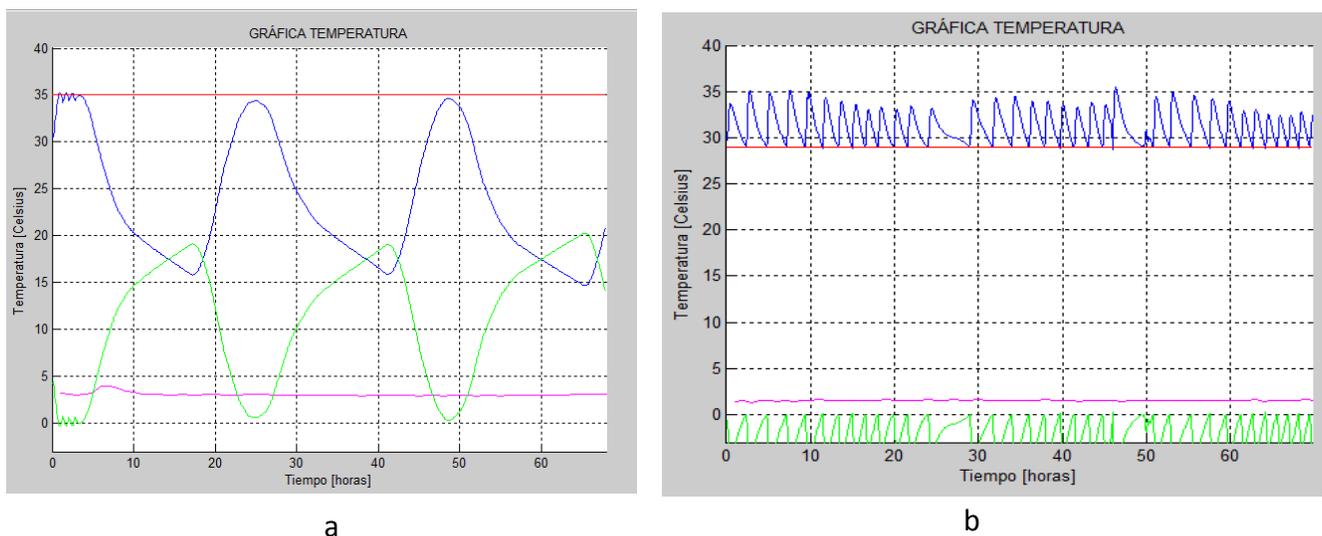


Figura 34. Gráfica de control de temperatura a 35°C y b 29°C

En la etapa III se operó el reactor con agua residual industrial y a temperatura ambiente, por lo que solo se realizó el monitoreo de la temperatura y la producción de biogás como se observa en la Figura 35.

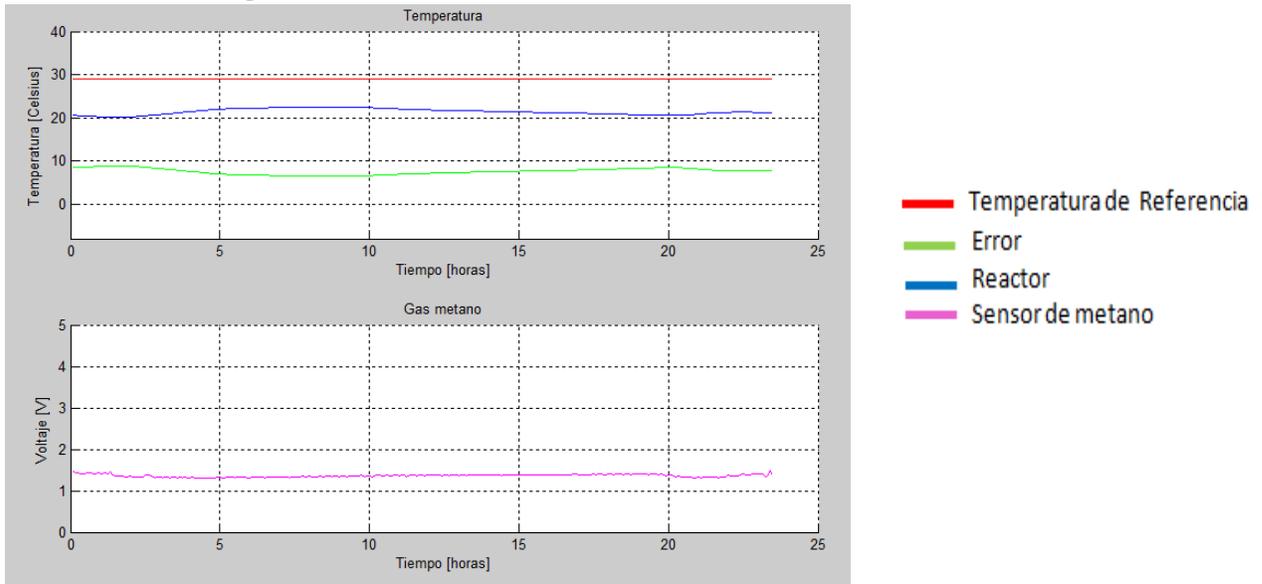


Figura 35. Gráfica de control de temperatura ambiente

En la etapa IV con el agua residual industrial se volvió a establecer la temperatura de referencia en 29°C, logrando mantener la temperatura por encima de los 29°C como se observa en la Figura 36.

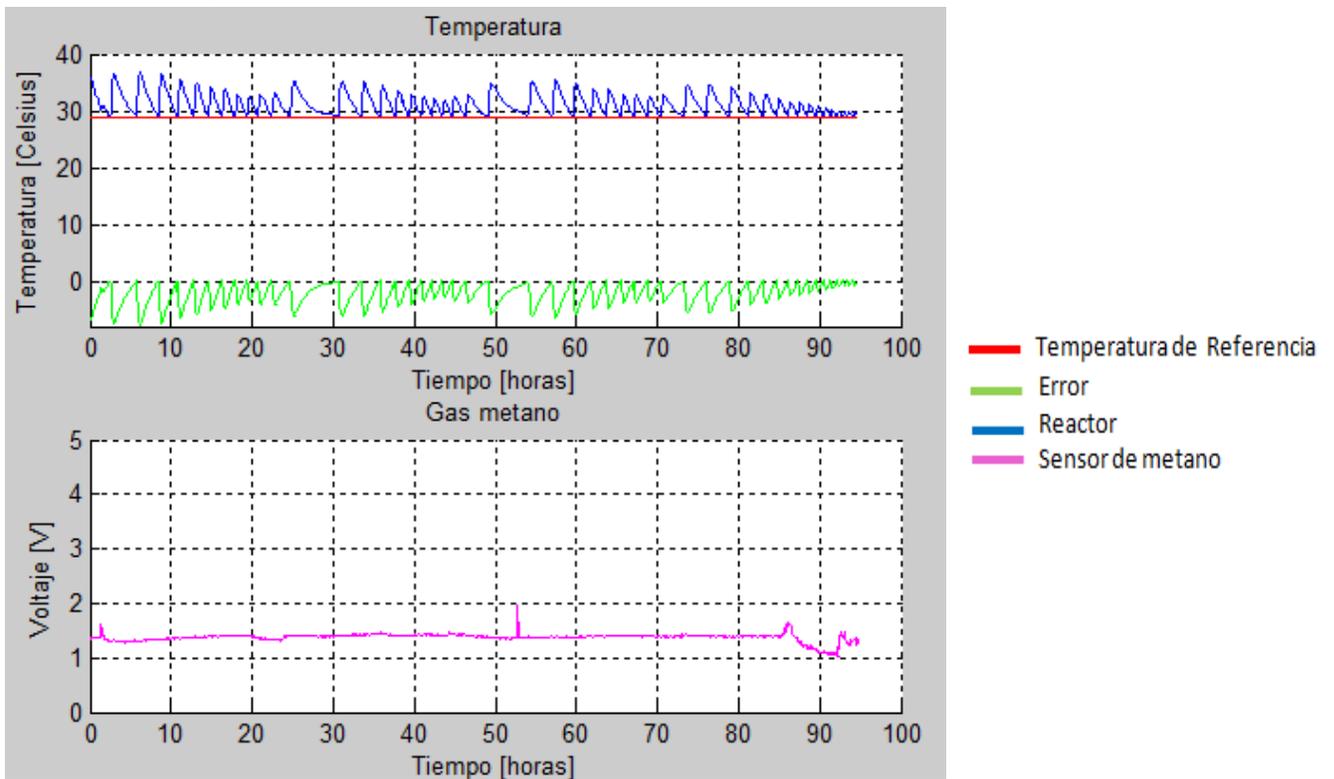


Figura 36. Gráfica de control de temperatura 29°C

9.3 Operación y Evaluación de la temperatura en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Con el fin de evaluar los efectos de la temperatura en la eficiencia de remoción de DQO y en la producción de biogás, el reactor fue operado en cuatro etapas, a un TRH de 24h, en sistema continuo:

Etapa	TRH	Alimentación	Temperatura
I	24h	Agua sintética 1.5gDQO/L	Ambiente
II	24h	Agua sintética 1.5gDQO/L	35 y 30°C
III	24h	Agua industrial \approx 1.5gDQO/L	Ambiente
IV	24h	Agua residual industrial \approx 1.5gDQO/L	30°C

Tabla 7. Etapas RAFA

En la primera etapa (*Etapa I*), el sistema se alimentó con agua sintética a temperatura ambiente; con glucosa como fuente de energía y carbono, y amonio como fuente de nitrógeno para las rutas del anabolismo (Figura 37). Del día 1 al 25 se observó un incremento lineal en las eficiencias de remoción de DQO. El estado pseudo-estacionario se alcanzó a partir del día 26, obteniéndose una eficiencia de remoción de DQO de $85 \pm 5\%$. Respecto a la formación de metano, se alcanzó una producción de 27.55 ± 3 ml CH_4/h (Figura 38). La producción de metano estuvo de acuerdo a los cálculos teóricos propuestos por Lettinga (1994) a temperatura ambiente (33.6 ml CH_4/h). Lew *et al.* (2011) operaron un reactor UASB alimentado con aguas residuales domésticas con una concentración de DQO de 1576 mg/L; observando una eficiencia de remoción de DQO de 76% a 15°C . Por otro lado, Hina *et al.* (2015) evaluaron un reactor UASB alimentado con agua residual doméstica a una concentración de DQO de 474 mg/L, reportando una eficiencia de remoción de DQO de $57\text{--}62\%$ a una temperatura de 17°C . En esta etapa, se observó una mejor eficiencia en la remoción de DQO, lo que se debe posiblemente a que se trabajó con un agua sintética y una molécula orgánica 100% biodegradable.

En la *Etapa II*, se incrementó la temperatura interna del reactor por medio del control automático empleando el agua caliente del calentador solar de 8 tubos. Se programó el control automático para mantener una temperatura de 35°C , no obstante, mantener esta temperatura depende de las condiciones climáticas. Bajo estas condiciones, se logró mantener una temperatura constante alrededor de 30°C . Para la actividad metabólica de la digestión anaerobia, una temperatura entre $30\text{--}35^\circ\text{C}$ es idónea para alcanzar altas eficiencias de remoción de DQO y producciones de metano (Britannica Academic, 2017). En esta etapa, la eficiencia de remoción de DQO fue de $95 \pm 5\%$, con una producción de metano de 39 ± 3 ml CH_4/h ; siendo la producción teórica de metano de 45.12 ml CH_4/h a 30°C . Beni-Lew *et al.* (2015) sugieren que el aumento de la temperatura aumenta la sedimentación de los lodos, mejorando así el contacto entre los lodos y la materia orgánica.

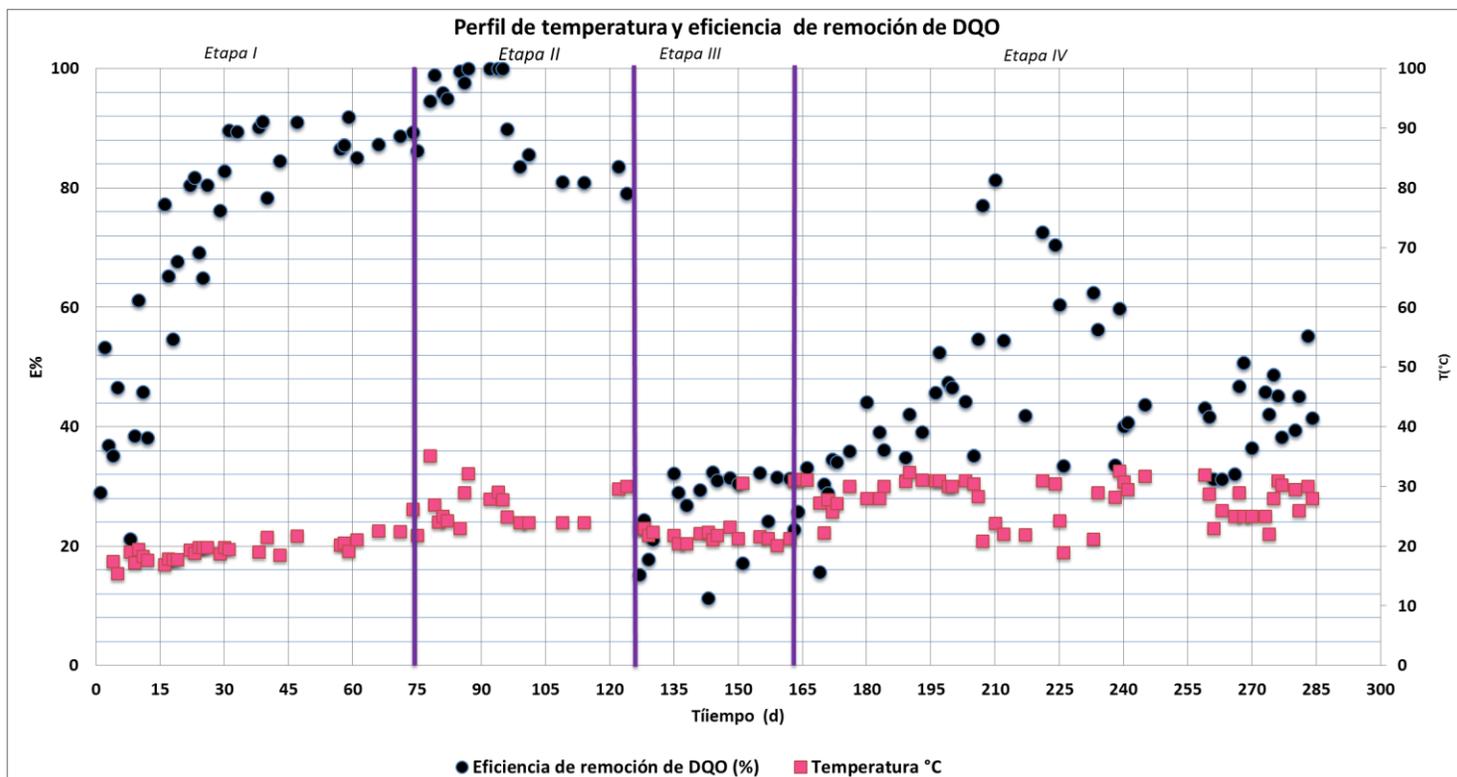


Figura 37. Perfil de la eficiencia de remoción de DQO y temperatura en el RAFA en

En la *etapa III*, el reactor se operó con un agua residual industrial de composición química muy compleja. Cabe mencionar, que esta agua residual es una mezcla de efluentes industriales de más de 200 empresas de diferentes giros (textiles, químicas, alimentarias, etc.). El índice de biodegradabilidad (i_B) de esta agua residual industrial es alrededor de 0.5 mg DBO₅/mg DQO. Este valor nos indica que el 50% de la materia orgánica es de tipo recalcitrante, y que no se biodegradará por vía biológica. Esto nos permite predecir bajas eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de DQO. En esta etapa se evaluó el reactor inicialmente a temperatura ambiente (Figura 22, *Etapa III*). En el estado pseudo-estacionario, se observó una baja eficiencia de remoción de DQO de $20 \pm 2\%$, con una baja producción de metano (7 ± 3 ml CH₄/h). En las aguas residuales industriales el control de temperatura es necesaria, ya que la baja temperatura afecta la velocidad de hidrólisis de la materia orgánica compleja y la formación del lodo granulado, lo que reduce la eficiencia de remoción de DQO (Lorenzo *et al.*, 2006).

Posteriormente la temperatura se incrementó a 30°C (*Etapa IV*), lo que mejoró la eficiencia de remoción de DQO y la producción de metano, siendo de $48 \pm 13\%$ y 20 ± 3 ml CH₄/h respectivamente. Estos resultados experimentales indican claramente el efecto positivo de la temperatura en la eficiencia de remoción y producción de metano.

Comparando los resultados experimentales del RAFA con un Sistema de Lodos Activados Convencional (SLAC) para tratar el agua residual de la zona industrial de Lerma, proporciona las siguientes ventajas: 1) mejor remoción de DQO (SLAC sólo remueve el 30% en términos de DQO), 2) el sistema RAFA requiere menos área para su construcción, 3) no requiere sistema de aeración, 4) y emplearía energía renovable para el control de temperatura.

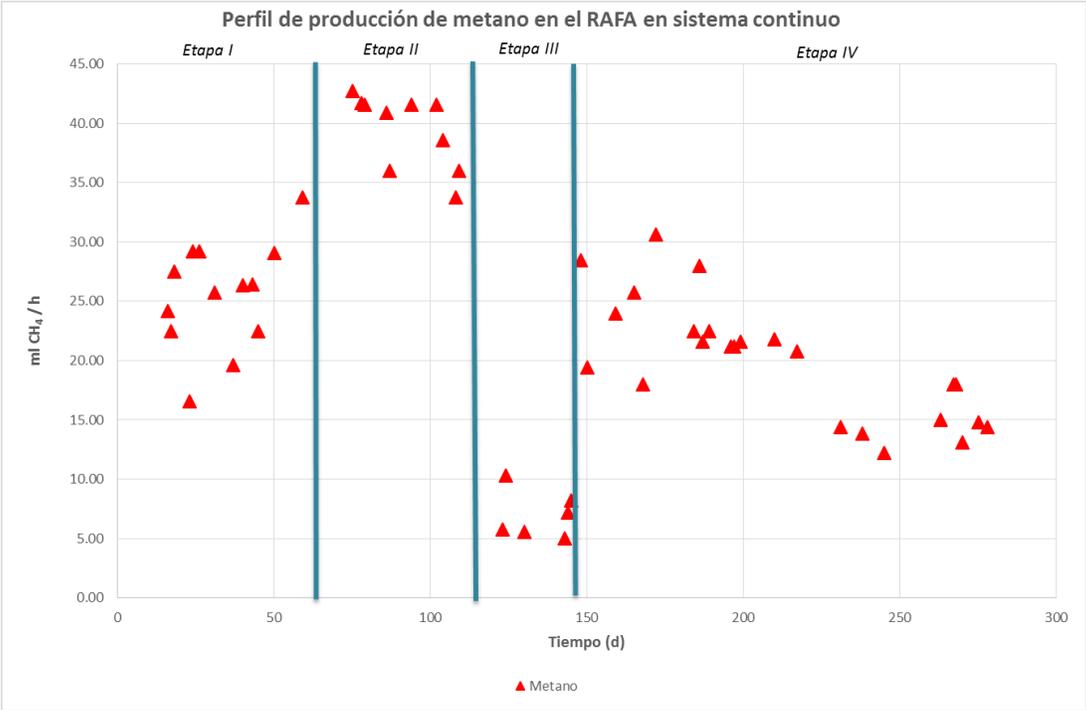


Figura 38. Perfil de producción de metano en el RAFA en continuo.

Tabla 8. Eficiencias de remoción de DQO, temperatura de evaluación y producción de metano teórica y experimental en el RAFA.

	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
E%DQO	85±3	95±5	20±2	48±13
T°C	19.22	30	21.95	30
mlCH ₄ /h Experimental	27.55±3	39±3	7±3	20±3
mlCH ₄ /h Teórico	33.6	45.12	33.6	45.12

10. Conclusiones

El sistema de control de temperatura automatizado que se implementó permitió ajustar la temperatura dentro del reactor de manera continua, sin embargo, bajo las condiciones en que prevalecen los días nublados se adicionó una rutina de reposo que permite seguir monitoreando la temperatura y dar un tiempo para el almacenamiento de agua caliente. Dicho sistema de control de temperatura automatizado permitió mantener una temperatura de referencia y evaluar el efecto de la misma en el proceso de la digestión anaerobia.

El reactor se evaluó en 4 etapas, en la Etapa I a una temperatura ambiente de 19 °C, alimentado con agua sintética, 1.5 g DQO/L y un TRH de 24h, se obtuvo una eficiencia de remoción de 85 ± 3% y una producción de metano de 27.55 ml CH₄/h. En la etapa II se elevó la temperatura empleando el sistema de control, a un promedio de 30°C, obteniéndose un incremento en la eficiencia de remoción de DQO de 95 ± 5% con una producción de metano de 39 ± 3 ml CH₄/h. El aumento de la temperatura mejoró en un 15% la eficiencia de remoción de la DQO. En la Etapa III se alimentó el reactor con agua residual industrial manteniendo una concentración de DQO aproximadamente de 1.5 g DQO/L. La temperatura ambiente promedio fue de 22 °C y un TRH de 24 h. En el estado pseudo-estacionario la eficiencia de remoción de DQO fue de 20 ± 2% con una producción de metano de 7 ± 3 ml CH₄/h. En la última etapa se elevó la temperatura a un promedio de 30°C, en esta etapa la eficiencia de remoción de DQO mejoró, siendo de 48 ± 13%, un incremento aproximado del 41% con respecto a la etapa III. La producción de metano también se mejoró, siendo de 20 ± 3 ml CH₄/h.

Por otro lado, los estudios hidrodinámicos permitieron identificar el tipo de flujo desarrollado dentro del reactor RAFA. En las simulaciones que consideró una temperatura

de 20°C, TRH de 4 y 24 h, y ausencia de biogás, se observó un comportamiento hidrodinámico similar al tipo pistón, con una velocidad media de 0.027 mm/s y 0.004 mm/s, respectivamente, también se observó que aunque las velocidades son pequeñas, es importante el efecto que tienen las paredes del reactor sobre el perfil de velocidades, puesto que la velocidad en el centro del reactor es mayor que en la cercanía de las paredes (ver Figura 15). En la simulación con un TRH de 24 h y una temperatura de 30°C se observó el mismo comportamiento similar al tipo pistón con una velocidad media de 0.014 mm/s, sin embargo, en el escenario en el que el TRH fue de 4 h y 30°C, en ausencia de biogás, se observaron recirculaciones y canalizaciones internas con una velocidad media de 0.104 mm/s; dichas anomalías se debieron al cambio de viscosidad en el agua al aumentar la temperatura.

En las simulaciones efectuadas considerando la producción de biogás en los TRH de 4 y 24 h, a una temperatura de 20 y 30°C, el comportamiento de flujo en el reactor RAFA cambió significativamente con la presencia de biogás, debido a que las burbujas generaron un desplazamiento del líquido produciendo un cambio de velocidad en la trayectoria por la que se mueven y un cambio de dirección de forma ascendente y descendente en el fluido circundante, originando así un mezclado del líquido por donde transitan. La velocidad media en las simulaciones con presencia de biogás a 20 °C y TRH de 4 y 24 h fueron de 0.64 y 0.569 mm/s, respectivamente. En las simulaciones a 30 °C y TRH de 4 y 24 h, la velocidad media fue de 0.848 y 0.82 mm/s, respectivamente.

Finalmente, la presente investigación permitió determinar la posibilidad del uso de energía renovable empleando un calentador solar, a través de un sistema de control automatizado como herramienta para elevar la temperatura dentro de un reactor RAFA y así favorecer el proceso de digestión anaerobia para la depuración de aguas residuales en regiones en donde la temperatura ambiental no es adecuada para dichos procesos.

11. Bibliografía

- Agua, C. N. (2014). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. D.F.: CONAGUA.
- Azeem, K., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11001668>
- Britannica, A. (2017). *Encyclopædia Britannica. Anaerobic digestion*. Obtenido de <http://www.bidi.uam.mx:6317/levels/collegiate/article/anaerobic-digestion/605449>
- C. Sharma, D. M. (2011). Review of Computational Fluid Dynamics Applications in Biotechnology Processes. *AIChE*, 27(6), 1497-1510.
- Cengel Yunus A., C. J. (2014). *Fluid Mechanics*. New York: Mc Graw Hill.
- Chen, Y. C. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresour Technology*(99), 4044–4064. Recuperado el 2017
- Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Estadísticas del Agua en México Edición 2015*. México.
- Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Estadísticas del Agua en México, Edición 2016*. México .
- Dong, F., Li, W.-W., Sheng, G.-P., Tang, Y., Yu, H.-Q., & Harada, H. (2011). An online-monitored thermophilic hydrogen production UASB reactor for long-term stable operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 13559-13565. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.010>.
- Fernández, O. J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Barcelona: Reverté.
- Gómez, P. P. (2012). Solución de la ecuación de Stokes usando elementos finitos cuadriláteros. *Revista Universidad EAFIT*, 46(160), 90-102. doi:0120-341X.
- Grady C.P. Leslie, G. T. (2011). *Biological Wastewater Treatment*. Boca Ratón: CRC Press.
- Hina Rizvi, N. A. (Noviembre de 2015). Start-up of UASB reactors treating municipal wastewater and effect of temperature/sludge age and hydraulic retention time

- (HRT) on its performance. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(6), 780-786.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.016>
- Jiankai Jiang, J. W. (2014). Multiscale hydrodynamic investigation to intensify the biogas production in upflow anaerobic reactors. *Bioresource Technology*, 155, 1-7.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.079>
- Lema, J. M., Rozzi, A., Puñal, A., & Melloni, P. &. (2001). Automatic start-up of UASB reactors. *Journal of Environmental Engineering*, 127(5), 397-402.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:5(397)
- Lettinga, G. (1994). Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate. Boston: Jhon wiley and sons.
- Lew, B., Belavski, M., Admon, S., Tarre, S., & Green, M. (2003). Temperature effect on UASB reactor operation for domestic wastewater treatment in temperate climate regions. *Water Science and Technology*, 48(3), 25-30.
- Lew, B., Lustig, I., Belavski, M., Tarre, S., & Green, M. (Abril de 2011). An integrated UASB-sludge digester system for raw domestic wastewater treatment in temperate climates. *Bioresource Technology*, 102, 4921-4924. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.030>.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I . Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *ICIDCA*, XXXIX(1), 35-48. Recuperado el 2017
- Lorenzo, Y., & Obaya, M. C. (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades.Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *ICIDCA*, XL(1), 13-21.
- Mendes, C., da Silva Magalhes, R., & Esquerre, K. &. (2015). (20Artificial neural network modeling for predicting organic matter in a full-scale up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(6), 625-635.
doi:10.1007/s10666-015-9450-x
- Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater engineering : treatment and reuse*. Boston: McGraw-Hill.
- Mu, S. J., Zeng, Y., Tartakovsky, B., & Wu, P. (2007). Simulation and control of an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor using an ADM1-based distributed parameter model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(5), 1519-1526. doi:10.102

- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Orhan Yenigün, B. D. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, 48, 901-911. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.04.012>.
- Orhan Yenigün, B. D. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, 48, 901-911. Recuperado el 2017, de <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.04.012>
- Ren, T.-T., Mu, Y., Ni, B.-J., & Yu, H.-Q. (2009). Hydrodynamics of upflow anaerobic sludge blanket reactors. *AIChE*, 516-528. doi:10.1002/aic.11667
- Roca, C. A. (2002). *Control de procesos*. Barcelona, España: Alfaomega.
- Sevilla, E. S., & Solórzano-campo, M. &.-m. (2010). Performance of staged and non-staged up-flow anaerobic sludge bed (USSB and UASB) reactors treating low strength complex wastewater. *Biodegradation*, 21(5), 737-751. doi:http://dx.doi.or
- Singh, K. S., & Viraraghavan, T. &. (2006). Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactors: Temperature Effects. *Journal Of Environmental Engineering*, 8(132), 895-900. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:8(895)
- SMN. (5 de Enero de 2018). *Sistema Meteorológico Nacional*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>
- Speece, R. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. Nashville, Tennessee: Archea Press.
- Tarek A. Elmitwalli, K. L. (Mayo de 2002). Treatment of domestic sewage in a two-step anaerobic filter/anaerobic hybrid system at low temperature. *Water Research*, 36(9), 2225-2232.
- Unigarro, G. D. (2014). Caracterización y modelación del comportamiento hidráulico de un reactor. uasb/characterization and modeling of the hydraulic behavior of a uasb reactor. *Revista EIA*, 11(22), 65-75. Obtenido de <http://www.bidi.uam.mx:8331/login?url=https://search.proquest.com/docview/1679412252?accountid=37347>
- Yaya-Beas, R.-E., Cadillo-La-Torre, Erika-Alejandra, R., Kujawa, K., & Van Lier, J. B. (2016). Presence of helminth eggs in domestic wastewater and its removal at low

temperature UASB reactors in Peruvian highlands. *Water Research*, 90(1), 286-293.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.023>.

12. Anexos

12.1 Programa comentado

```
#include <OneWire.h> //libreria sensor temperatura DS18B20

OneWire ds(2); // on pin 2 //pin de entrada digital sensor temperatura

const int Ahot = 4; //pin4 valvula electrónica
int cont01 = 0; //variable de conteo 1
int cont02 = 0; //variable de conteo 2
int cont03 = 0; //variable de conteo 3
int seguro = 120; //variable intervalo
float GasM = 0; //variable valor de gas

float Tref = 29.0; //variable temperatura de referencia
float T1;
float Error; //variable error de temperatura
byte type_s; //variables de libreria sensor
byte data[12]; //registro de libreria sensor
byte addr[8]; //registro de libreria sensor
byte i; //contadores
int j; //contadores
int k; //contadores

boolean onTime = false;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600); //velocidad de comunicación SERIAL TTL
  pinMode(Ahot, OUTPUT); //pin activador de válvula como salida
  pinMode(13, OUTPUT); //pin salida LED indicador de estado
  //de calentamiento del tanque
}

void loop(void) {
  byte present = 0; //código librería sensor DS18B20
  if ( !ds.search(addr) ) {
    ds.reset_search();
    delay(250);
    return;}
}
```

```

if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) {
  Serial.println("CRC is not valid!");
  return;}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44,1);
delay(1000);

present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE);

for ( byte i = 0; i < 9; i++) {
  data[i] = ds.read();}

unsigned int raw = (data[1] << 8) | data[0];
if (!type_s){
  byte cfg = (data[4] & 0x60);}

T1 = (float)raw / 16.0;
Serial.print("TE"); //envío cadena de caracteres "TE" por puerto
USB a PC
Serial.println(T1); //envío dato temperatura por puerto USB a PC

GasM = analogRead(A0); //lee señal analógica proveniente de sensor
MQ-4
GasM = GasM*0.0048875; //convierte a rango de niveles de 0 a 5V
Serial.print("GA"); //envía cadena de caracteres "GA" por puerto
USB a PC
Serial.println(GasM); //envío dato gas metano por puerto USB a PC

Error = Tref-T1; //Error de temperatura, temp referencia-valor
de sensor

```

12.2 Programa comentado MATLAB

```

function []=reactor(TimePro) %nombre de la función con parámetro de
                             entrada tiempo de muestreo en segundos;
  delete(instrfind({'port'},{'COM4'})); %borra configuraciones previas de puerto
COM;

```

puerto=serial('COM4');	%definición del número de puerto asignado
puerto.BaudRate=9600;	%Velocidad de transmisión de datos en baudios
fopen(puerto);	%apertura de puerto asignado
cont1=1;	%Inicialización de Contador 1
cont2=1;	%Inicialización de contador 2
difec=0;	%inicialización
figure;	%Crea espacio para gráfica
subplot(2,1,1);	%Asigna 2 gráficas en mismo espacio y se
coloca en 1	
grid on;	%crea rejilla en gráfica 1
hold on;	%Permanencia de datos en gráfica 1
title('Temperatura');	%Título de 1ra gráfica "Temperatura"
xlabel('Tiempo [horas]');	%Etiqueta de eje x "Tiempo [horas]"
ylabel('Temperatura [Celsius]');	%Etiqueta de eje y "Temperatura [Celsius]"
subplot(2,1,2);	%se coloca en gráfica 2
grid on;	%crea rejilla en gráfica 2
hold on;	%Permanencia de datos en gráfica 2
title('Gas metano');	%Título de 2da gráfica "Gas metano"
xlabel('Tiempo [horas]');	%Etiqueta eje x "Tiempo [horas]"
ylabel('Voltaje [V]');	%Etiqueta eje y "Voltaje [Volts]"
reloj(1,1:6)=clock	%lectura de reloj año, mes, día, hora, minuto,
segundo	
NoV=fscanf(puerto,'%s')	%lee 1er dato de puerto COM
NoV=fscanf(puerto,'%s')	%lee 2do dato de puerto COM
while (1)	%ciclo cerrado de programa principal
if difec>=TimePro difec<0	%condición de tiempo dentro de rango
reloj(1,1:6)=reloj(2,1:6);	%lectura de reloj inicial
reloj(1,1:6)	%muestra en pantalla hora de muestra
horaR(cont2,1:6)=reloj(2,1:6);	%se guarda hora de la muestra realizada
%xlim([0 cont2*(TimePro/3600)]);	%se define valor x en función de tiempo de
programa	
for n=1:2	%registro 2 datos de trama principal de
información	
palabra=fscanf(puerto,'%s');	%lectura de primer dato
var1=strcmp('TE',palabra(1:2));	%comparación de dato con
temperatura	

```

        if var1 == 1                                %condición de comparación de dato
temperatura
            temp(cont2)=str2double(palabra(3:end)); %conversión de string a número de
temperatura
            temp(cont2)                            %muestra temperatura en pantalla
            tiempo(cont2)=(cont2*(TimePro/3600)); %tiempo de muestreo asociado a
temperatura
            tref(cont2)=29;                        %temperatura de referencia
            error(cont2)=29-temp(cont2);          %calculo de temperature de diferencia
como error
            subplot(2,1,1);                        %se coloca en gráfica uno
            plot(tiempo,temp,'b',tiempo,tref,'r',tiempo,error,'g'); %grafica datos en
pantalla
            ylim([-8 40]);                         %define límites del eje Y en
temperatura
            drawnow;                               %dibuja y actualiza gráfica
            cont2=cont2+1;                         %incrementa el registro de número de muestra
            end                                    %termina condición de dato de temperatura

        var1=strcmp('GA',palabra(1:2));           % comparación de dato con
temperatura
        if var1 == 1                                % condición de comparación de dato de gas
            gasm(cont1)=str2double(palabra(3:end)); %conversión de string a número de gas
            gasm(cont1)                            %muestra valor de gas en pantalla
            tiempo2(cont1)=(cont1*(TimePro/3600)); %tiempo de muestreo asociado a gas
            subplot(2,1,2);                        %se coloca en gráfica dos
            plot(tiempo2,gasm,'m');               %grafica datos en pantalla
            ylim([0 5]);                          %define límites del eje Y en voltaje
            drawnow;                               %dibuja y actualiza gráfica
            cont1=cont1+1;                         %incrementa el registro de número de
muestra
            end                                    %termina condición de dato de gas

        end                                        %fin de condición
        tempdata=temp';                            %datos de temperatura en columna
        gasmdata=gasm';                            %datos de gas en columna
        dataall=[horaR tempdata gasmdata];        %matriz de almacenamiento de todos
los datos
        save('reactor_01.mat','dataall');        %salva datos en archivo
        else                                       %si no se cumple condición de tiempo
            NoV=fscanf(puerto,'%s');              %se lee datos para limpiar buffer de
puerto COM
        End                                       %termina condición

```

```
reloj(2,1:6)=clock;           %lectura de reloj
difec=((reloj(2,5)*60)+reloj(2,6))-((reloj(1,5)*60)+reloj(1,6)); %cálculo de diferencia de
tiempo
end                             %fin de programa principal

fclose(puerto);                %cierre de puerto de comunicaciones
delete(puerto);                %borra configuración de puerto en
programa
```



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00027

Matrícula: 2161801585

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
HIDRODINÁMICO Y BIOLÓGICO DE
UN RAFA PARA LA REMOCIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA EMPLEANDO
ENERGÍA RENOVABLE

En la Ciudad de México, se presentaron a las 11:30 horas del día 9 del mes de marzo del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. CARLOS DAVID SILVA LUNA
DRA. GEHOVANA GONZALEZ BLANCO
MTRO. JORGE LOPEZ ORTEGA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: ITZEL ALEJANDRA HERNANDEZ RODRIGUEZ

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



ITZEL ALEJANDRA HERNANDEZ RODRIGUEZ

ALUMNA

REVISÓ

LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA

PRESIDENTE

DR. CARLOS DAVID SILVA LUNA

VOCAL

DRA. GEHOVANA GONZALEZ BLANCO

SECRETARIO

MTRO. JORGE LOPEZ ORTEGA