

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“DIAGNÓSTICO Y AISLAMIENTO DE FALLAS EN UN  
REACTOR ANAEROBIO DEDICADO A LA  
PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO”**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

**ING. ARTURO ALVARADO ELÍAS**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA**

**CODIRECTOR DE TESIS**

**DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN**

**Orizaba, Veracruz, México.**

**Junio 2019**

---

## DEDICATORIAS

A mis papás, Arturo Alvarado  
Lassmann y Agueda Geisel Elias  
Gómez, quienes desde el inicio de  
mi vida me han proporcionado en  
cada paso todas las herramientas  
para poder cumplir con mis  
sueños y metas. Gracias a ustedes  
soy todo lo que soy ahora.

A mi hermano, Armando Alvarado  
Elías, por estar conmigo siempre  
sin importar la situación y por  
creer en mi incondicionalmente.

A mis abuelitos y mi familia, por  
todo su apoyo durante mi vida y  
por acompañarme en todo  
momento.

A mi esposa, Airam A. Rodríguez  
Duran, por estar a mi lado y por  
acompañarme en todo momento  
brindándome su cariño y apoyo.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, forjador de mi destino, la mayor inspiración para mi espíritu. Por cuidar siempre de mi camino, dichoso he sido en cada paso y para siempre. “Diosito me cuida”.

A mi escuela y sus integrantes, el Instituto Tecnológico de Orizaba, mi hogar, donde me han recibido con las puertas abiertas desde pequeño en visitas y hasta concluir mis estudios de maestría. Estoy muy orgulloso y me encuentro ansioso por continuar caminando con ustedes hacia el futuro en mi siguiente etapa, por siempre Búhos.

A mi asesor, Dr. Albino Martínez Sibaja, a quien considero como mi familia. Por otorgarme siempre su confianza incondicional en todo y apoyarme durante todas las adversidades a lo largo de mi trayecto educativo.

A mi codirector, Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, mi amigo, por apoyarme siempre a seguir en el camino correcto, por sus consejos y por brindarme su amistad como profesor.

A la Maestría en Ingeniería Electrónica, el núcleo académico y a mi coordinadora, M.C. Blanca Estela González Sánchez, por todo su apoyo y por guiarme exhaustivamente en cada paso durante mis estudios de posgrado. A mis profesores por compartir sus conocimientos y experiencia hacia mí.

A la institución del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por todo su apoyo hacia mi como estudiante y hacia mi programa de maestría..

## CONTENIDO

Lista de Figuras .....	VI
Lista de Tablas. ....	VIII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.2 PROBLEMÁTICA.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4 HIPÓTESIS .....	7
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
1.7 METODOLOGÍA .....	9
1.8 ESTADO DEL ARTE .....	10
1.8.1. Antecedentes.....	10
1.8.2. Digestión Anaerobia.....	14
1.8.3. Hidrolisis. ....	16
1.8.4. Acidogénesis .....	17
1.8.5. Acetogénesis .....	18
1.8.6. Metanogénesis. ....	19
1.8.7. Factores de la digestión anaerobia. ....	20
1.8.8 Temperatura. ....	20
1.8.9. Potencial de Hidrógeno (pH).....	22

---

CAPÍTULO II. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	23
2.1. Reactor anaerobio dedicado a la producción de biohidrógeno. ....	23
2.1.1. Reactor anaerobio.....	24
2.1.2. Sistema de alimentación .....	26
2.1.3. Sistema de gestión de biogás.....	29
2.1.4. Almacenamiento del biogás.....	31
2.1.5. Sensores utilizados .....	32
2.1.6. PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO.....	38
2.1.7. CARACTERISTICAS DE REACTOR DE BIOHIDRÓGENO.....	39
2.2. INTERFAZ HOMBRE – MAQUINA.....	40
2.2.1. Creación del login.....	42
2.2.2. Nivel de supervisión .....	43
2.2.3. Nivel de monitoreo .....	46
2.2.4. Nivel de monitoreo, control y programación.....	48
2.2.5. Conexión del convertidor de corriente a la electroválvula .....	49
2.2.6. Acoplamiento de Software con Hardware .....	50
2.3. DIAGNÓSTICO Y AISLAMIENTO DE FALLAS .....	50
2.3.1. Determinación del método a utilizar. ....	51
2.3.2. Diseño del sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas.....	55
2.3.3. ESQUEMA DEL MODELO .....	57
2.3.4. MODELO MATEMATICO DEL REACTOR .....	58
CAPÍTULO III. EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	61
3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	61
3.1.2. Caracterización y acondicionamiento del sustrato.....	61

---

3.1.3. Especialización del consorcio anaerobio para la producción de biohidrógeno. ....	63
3.1.4. pH de alimentación y salida del reactor .....	66
3.1.5. Remoción de DQO y SVT.....	68
3.1.6. Remoción de SVT en el reactor anaerobio.....	70
3.1.7. Producción y composición en modo metanogénico.....	71
3.1.8. Producción y composición en modo biohidrógeno .....	73
3.2 RESULTADOS DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y AISLAMIENTO DE FALLAS .....	76
3.2.1. Sistema de pH.....	76
3.2.2. Sistema de temperatura.....	77
3.2.3. Diagnóstico de fallas .....	77
3.3. PROBLEMAS DE OPERACIÓN .....	82
CONCLUSIONES Y ARTÍCULOS GENERADOS .....	83
TRABAJO FUTURO.....	85
REFERENCIAS.....	86

## Lista de Figuras

Ilustración 1. Esquema de digestión anaerobia de materiales poliméricos. ....	15
Ilustración 2. Diagrama esquemático del reactor anaerobio. ....	24
Ilustración 3. Diagrama a bloques del sistema de alimentación .....	26
Ilustración 4. Diagrama de flujo de sistema de control de pH. ....	28
Ilustración 5. Trampa de humedad. ....	29
Ilustración 6. Diagrama del Filtro de Ácido Sulfhídrico. ....	30
Ilustración 7. Pulmón diseñado para la captación de biogás. ....	31
Ilustración 8. Ilustración 8. PHIDGETS modelo 1130 con entrada BNC. ....	32
Ilustración 9. Sensor de temperatura DS-18B20. ....	34
Ilustración 10. Alimentación a través del pin de datos. ....	35
Ilustración 11. Alimentación usando una fuente externa. ....	36
Ilustración 12. Conexiones del sensor de temperatura. ....	37
Ilustración 13. Diagrama de Variables del Sistema .....	40
Ilustración 14. Diseño de los botones de encendido y apagado e indicador de operación .....	41
Ilustración 15. Recuadro para la lectura a distancia del sensor de pH .....	41
Ilustración 16. Sistema de Ingreso LOGIN .....	43
Ilustración 17. Interfaz Gráfica .....	45
Ilustración 18. Nivel de Control .....	48
Ilustración 21. Funcionamiento de Válvulas .....	49
Ilustración 22. Diagrama Esquemático MIMO de la Lógica Difusa Aplicada. ....	57
Ilustración 23. Función perteneciente generada. ....	58
Ilustración 24. Comparación de medición Gaussiana y distribuciones estimadas. .....	59
Ilustración 25. Histogramas de discretización de errores. ....	60
Ilustración 26. Gráfica de la variación del pH dentro del tanque de alimentación. .....	67
Ilustración 27. Gráfica de comparación de pH de entrada y salida del reactor anaerobio .....	68
Ilustración 28. Gráfica de remoción de DQO en un reactor. ....	69

---

Ilustración 29. Gráfica de remoción de SVT en un reactor.....	70
Ilustración 30. Gráfica de producción de biogás.....	71
Ilustración 31. Gráfica de composición de biogás. ....	72
Ilustración 32. Remoción de DQO.....	73
Ilustración 33. Producción de gas en 24 horas.....	73
Ilustración 34. Volumen total de gas producido en 24 h. con pH controlado.....	74
Ilustración 35. Remoción de DQOs después del tratamiento térmico. ....	75
Ilustración 36. Producción de biogás en 24H después del tratamiento térmico..	75
Ilustración 37. phmetro Orion 250 <sup>a</sup> Vs Titulador Automático.....	76
Ilustración 38. Taza de dilución. ....	78
Ilustración 39. Medición de la biomasa $X(t)$ y del ácido acético $S_3(t)$ .....	79
Ilustración 40. Estimación de la velocidad de reacción $\alpha_1$ . ....	79
Ilustración 41. Estimación de la velocidad de reacción $\alpha_2$ . ....	80
Ilustración 42. Concentración de nitratos $S_1$ y su estimación.....	80
Ilustración 43. Concentración de nitrito $S_2$ y su estimación. ....	81

## Lista de Tablas.

Tabla 1. Especificaciones del Filtro. ....	30
Tabla 2. Características del prototipo del reactor. ....	39
Tabla 3. Velocidad de Transmisión Estándar para la mayoría de puertos seriales .....	44
Tabla 4. Tabla de indicadores de color de acuerdo al nivel. ....	47
Tabla 5. Caracterización del lactosuero. ....	61
Tabla 6. Comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero....	62
Tabla 7. Rendimientos y parámetros cinéticos del modelo de biorreactor. ....	78

## RESUMEN

El consumo excesivo de recursos no renovables para la generación de energías es uno de los mayores problemas existentes en la actualidad. La creación de alternativas energéticas, como lo es la utilización de biorreactores, genera una solución de alto impacto al aprovechamiento de desechos orgánicos, sin embargo, no son comúnmente utilizados debido al gran error que pueden presentar sobre todo dentro del sector industrial, esto ya que en su mayoría tienden a dar resultados que no son convenientes en la relación de costo – beneficio. La aplicación de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas, reduce enormemente la problemática que se obtiene durante su manejo por un operador humano haciendo de esta aplicación una solución atractiva para el sector industrial en la generación de energías mediante el aprovechamiento de desechos orgánicos.

## ABSTRACT

The excessive consumption of non-renewable resources for the generation of energy is one of the biggest problems currently. The creation of alternative energies, such as the use of bioreactors, generate a high-impact solution to the use of organic waste, however, they are not commonly used due to the great error that they can present especially within the industrial sector, this is because most tend to give results that are not convenient in the cost - benefit relationship. The application of a fault diagnosis and isolation system greatly reduces the problems encountered during its operation by a human operator making this application an attractive solution for the industrial sector in the generation of energy through the use of organic waste.

## INTRODUCCIÓN

La utilización de recursos no renovables para la obtención de energía en nuestro país es el método más utilizado hasta la fecha y la contaminación ambiental producida afecta continuamente nuestro estilo de vida. Se dice según estudios que se alcanzara el pico máximo de producción entre los años 2010 a 2020, así las reservas de recursos caerán drásticamente. (R., 2004)

Actualmente se realizan estudios especializados en la búsqueda de alternativas para la generación de energías renovables, tanto para uso particular como industrial, muchas de éstas parecen ser atractivas en base a la relación de costo-beneficio, sin embargo, se requiere de una mayor investigación para poder determinar cuál es la más conveniente para el sector industrial que se está buscando.

La mayoría de éstas tienen como objetivo atacar un grave problema, que es la dependencia casi total que se tiene de fuentes de energías de recursos no renovables causantes de grandes problemáticas tanto en su producción como en el impacto ambiental, esto hablando económica y socialmente, ya que para producirlas se necesita la extracción de materia fósil; y referente al impacto social y ambiental, el uso de los combustibles fósiles producen elevadas cantidades de CO<sub>2</sub> lo cual impacta de forma negativa a la población por el acumulamiento de gases contaminantes, provocando enfermedades de vías respiratorias como también un gran daño a la capa de ozono contribuyente a los cambios climatológicos como el calentamiento global.

Actualmente, una alternativa es la producción de biogás a partir de desechos orgánicos proveniente de biorreactores, gracias a la utilización del mismo es posible dar una solución a las grandes cantidades de desechos orgánicos que el ser humano produce y además generando conciencia a la hora de trabajar con la separación de los desechos urbanos.

Sin embargo estos no han obtenido un mayor impacto en la región debido a la poca confiabilidad en el apartado de optimización de este proceso, esto causado por la falta de instrumentación para su monitoreo y control en línea siendo utilizados comúnmente por sistemas a prueba y error humano arrojando como resultado porcentajes por debajo del promedio sustentable, siendo así, se propone el diseño de un sistema de diagnóstico de fallas en un Biorreactor anaerobio productor de biohidrógeno como apoyo para los operadores humanos, elevando enormemente los niveles de confiabilidad en el sistema y buscando eficientizar su proceso por completo, de tal manera que este tipo de Biorreactores sean mayormente atractivos para el sector industrial.

El Biohidrógeno como un combustible alterno se considera amigable con el medio ambiente, libre de emisiones de carbono como lo son sulfuro o nitrógeno, causantes de gran contaminación atmosférica. (Idania Valdez-Vazquez, 2009).

## CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.2 PROBLEMÁTICA

El aprovechamiento de los residuos orgánicos, tanto industriales como municipales, son un gran objetivo para reducir los niveles de contaminación en el mundo y de reducir la utilización de recursos no renovables. La producción de biohidrógeno a partir de residuos orgánicos es una alternativa de gran importancia ya que presenta bajos costos de operación y utilización de materia prima, siendo residuos que de cualquier manera se deben tratar previamente a su disposición final. De acuerdo con la situación actual del sector energético, una alternativa viable y confiable para la generación de energías renovables es el uso de biorreactores anaerobios dedicados a la producción de biohidrógeno, utilizados para generar energía eléctrica como también calorífica. Un biorreactor anaerobio depende de diferentes variables para su correcto funcionamiento, es necesario utilizar elementos de medida como lo son sensores, así como elementos de control o actuadores. Haciendo un conjunto de estos y las variables a medir y controlar se tiene como sistema principal una planta de proceso de producción de biohidrógeno. La principal problemática de estos sistemas es debido a su baja confiabilidad provocada por error humano a la hora de controlar las variables mencionadas anteriormente, debido a esta problemática el 90% de los principales sectores económicos productores del país no utilizan por completo el sistema sin antes eliminar este error para observar una conveniencia en la relación de costo – beneficio. Generando una propuesta para dar solución a la problemática planteada en la presente sección, en esta tesis se han establecido los siguientes puntos de justificación, objetivos e hipótesis.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Una solución a la problemática que se asocia a la operación de los biodigestores dedicados a la producción de biohidrógeno es el diseño de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas. Dicho sistema contiene algoritmos de detección de fallas capaces de estimar la velocidad de crecimiento de los grupos bacterianos a partir de la señal de los sensores del biodigestor y sobre todo cuando existe una falla dentro del sistema diagnosticando la posible causa emitiendo una recomendación para ser corregida evitando daños al sistema por causas del operador o del entorno de trabajo. El sistema ayuda a los operadores mediante los siguientes puntos:

- Adquirir y procesar las señales de entrada
- Utilización de una interfaz Hombre – Maquina.
- Realización de un esquema de diagnóstico y aislamiento de fallas
- Realización de un esquema de soluciones.
- Evaluación del estado actual de las operaciones.

El modelo que se ocupará para este proyecto será desarrollado mediante técnicas de identificación mediante el análisis dinámico del Biorreactor. Utilizando para el módulo de diagnóstico de fallas una estrategia basada en observadores dinámicos, debido a sus características robustas contra la presencia de incertidumbres en el modelado.

El presente trabajo tendrá un impacto en los trabajos futuros de la institución y una vez validado podrá tener impacto también en otras instituciones y centros de investigación.

#### 1.4 HIPÓTESIS

Existe la posibilidad de diseñar e implementar un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas en un reactor anaerobio dedicado a la producción de biohidrógeno para ser utilizado como un sistema auxiliar al operador humano en el manejo y mantenimiento del reactor.

### 1.5 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas para el manejo de un reactor anaerobio dedicado a la producción de biohidrógeno. Las variables que intervienen son concentraciones de biomasa y concentración de sustratos y productos. Estas variables se estiman mediante modelos matemáticos partiendo de un análisis observado previamente.

### 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y analizar en el estado del arte los últimos avances entorno al funcionamiento de los biodigestores dedicados a la producción de biohidrógeno
- Diseño e implementación eléctrico / electrónico de un sistema de adquisición de variables de estado.
- Validación de un modelo de la digestión del biorreactor.
- Implementación de una interfaz gráfica de control y monitoreo para el sistema.
- Diseño e implementación del sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas.

## 1.7 METODOLOGÍA

Se tiene planeada la siguiente metodología para la elaboración del trabajo de tesis de maestría.

- I. Revisión del estado del arte.
  - a. Revisión de artículos y publicaciones sobre sistemas de digestión anaerobia.
  - b. Revisión de artículos y publicaciones referente a diagnóstico y aislamiento de fallas.
  - c. Revisión de artículos y publicaciones sobre observadores aplicados a diagnóstico de fallas.
- II. Análisis del sistema.
  - a. Análisis del proceso de digestión anaerobia.
  - b. Identificación del modelo matemático del proceso.
- III. Análisis de fallas en el sistema.
  - a. Análisis de fallas en el proceso.
  - b. Diagnóstico de fallas en sensores.
- IV. Sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas.
  - a. Diseño de observadores.
  - b. Implementación de observadores basados en identificación de modelo.
- VII. Redacción de artículos, productos tecnológicos y del trabajo de tesis.

## 1.8 ESTADO DEL ARTE

### 1.8.1. Antecedentes

Se ha encontrado que existen otras formas de obtener energía en base a un proceso de fermentación de materia orgánica, como lo es el metano procesado en biorreactores anaerobios, pero dentro de estas investigaciones también se han encontrado que se puede obtener hidrógeno a partir de procesos de producción similares al metano, utilizando biorreactores anaerobios.

Hablando un poco del hidrógeno tenemos que es un gas que no se obtiene de forma natural en relación a otros combustibles fósiles, porcentualmente hablando se obtiene de las siguientes maneras: 40% oxidación catalítica de gases naturales, 30% de metales pesados, 18% del carbón, 4% por electrólisis y 1% de biomasa; ésta última ha sido altamente estudiada por su producción inagotable; se encuentra que posee un contenido energético muy alto por unidad de peso (122-142 kJ/g) en comparación con los otros combustibles fósiles (Kargi, 2011), y mencionando el aporte ambiental, éste tipo de combustible no contamina ya que solo desprende agua al exterior.

Existe un proceso para la obtención de este gas en tasas altas de producción comparadas con otros procesos, el cual se basa en la fermentación oscura de compuestos orgánicos ricos en carbohidratos con rango alto de microorganismos y sustratos renovables, utilizando bacterias anaerobias en biorreactores o biorreactores productores de biohidrógeno (Castelló, 2012).

Los reactores anaerobios UASB han permitido obtener altas tasas de producción de metano a través de la inmovilización de la biomasa, formando gránulos metanogénicos durante el proceso de digestión (Salcedo, 2008).

Los reactores que se ocupan para el tratamiento de aguas residuales como también para la producción de biogás, presentan gran complejidad por la inestabilidad del sistema, así como por la no linealidad de su comportamiento, y en el control de las variables de interés para su operación; esto se debe a los sensores utilizados para su medición, los cuales pueden fallar dando lecturas no precisas lo que conlleva a problemas en el monitoreo de las variables implícitas en el proceso (D.J.Batstone, 2002)

Los bio-digestores anaerobios fueron estudiados a principios de 1930 debido a su gran potencial para utilizar los gases que se producían en su interior. Anteriormente ya se habían ocupado este tipo de bio-digestores con el propósito de generar energía, en Inglaterra en el año 1985 se desarrolló un tanque séptico para generación de gas, de esa manera lo utilizaron para combustión y generar energía luminosa (lámparas). También se ocuparon estos tanques en el año 1904 en Hampton- Inglaterra, para tratamiento de lodos generados por materia orgánica (Chan, 2010).

A lo largo del tiempo, la investigación ha concluido que este tipo de tanques se pueden ocupar para generación de energía, con el propósito de obtener diferentes tipos de gases llamados también como bio-gases tales como el metano, dióxido de carbono, hidrógeno, ácido sulfhídrico, etc. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007); esto es debido al metabolismo microbiano que se genera en dicha descomposición de bio-masa. Teniendo en cuenta este tipo de aspectos, los bio-digestores anaerobios forman parte de una bio-tecnología capaz de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al aprovechar este tipo de materias primas (materia orgánica) (Mata-Alvarez, 2000), reducción significativa de malos olores y mineralización por la generación de bio-abonos.

El funcionamiento de un bio-digestor depende de diversos factores como lo son el PH, Temperatura, Oxígeno, tiempo de retención hidráulica (HRT), y otras más. En la digestión anaerobia existen diferentes fases en el proceso de degradación del sustrato (desintegración, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), las cuales intervienen 5 poblaciones de microorganismos presentando diferentes velocidades de reacción las cuales dependen de la composición del sustrato.

Esto necesita de un equilibrio para evitar la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) lo cual provocaría un decremento en el PH (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007).

En las etapas de la digestión anaerobia la hidrólisis y la desintegración forman una misma, en ésta se hidrolizan los polímeros como lo son los polisacáridos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, los cuales forman a los azúcares, alcoholes, ácidos grasos y otros más que corresponden a la familia de los oligómeros y monómeros. En la segunda fase se encuentra la acidogénesis la cual transforma a los oligómeros y monómeros en ácidos grasos volátiles como lo son el acético, propiónico, butírico y valérico.

La tercera fase transforma los AGV's en ácidos acéticos, y la última fase está conformada por la metanogénesis lo cual hace que las bacterias metanogénicas acetoclastas transformen los ácidos acéticos en metano y dióxido de carbono (Castelló, 2012).

El modelo ADM1 establecido por la "International Water Association (IWA)", la meta fue desarrollar un modelo generalizado para la digestión anaerobia. Dicho modelado fue establecido en el octavo congreso mundial de digestión anaerobia en la ciudad de Sendai, Japón en 1997 (L. Wang, 2010).

El ADM1 incluye varias etapas que describen los procesos bio-químicos y físico-químicos de la digestión anaerobia. En la parte bio-química está la degradación de partículas homogéneas en carbohidratos, proteínas y lípidos, en el proceso de hidrólisis de esas partículas forman los azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga (AGCL). Seguido de la acidogénesis, esta forma los ácidos grasos volátiles (AGV) y la producción de hidrógeno. La acetogénesis convierte los AGCL y AGV en acetato, en la cual se encuentra  $H_2$  y  $CO_2$ ; en el último proceso de la digestión anaerobia se encuentra la metanogénesis, la cual convierte al acetato juntamente con el  $H_2$  y  $CO_2$  en  $CH_4$ ,  $CO_2$  (L. Wang, 2010).

### 1.8.2. Digestión Anaerobia.

Para dar a entender el proceso de digestión anaerobia se puede interpretar como la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno la cual se lleva a cabo por microorganismos, teniendo como producto resultante el biogás. La producción de biogás por digestión anaerobia ha sido un método eficaz para reducir los residuos contaminantes biodegradables en estos últimos años , convirtiéndolos en aguas residuales. En la última etapa del proceso existe una remoción de hasta el 90% de la materia solida orgánica contaminante liberando una combinación de gases mejor conocidos como biogás, compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano. (García A.I., 2007).

Existe un proceso biotecnológico dentro de estas interacciones químicas y microbiológicas en el sistema de digestión anaerobia. La degradación de la materia orgánica transformada en biogás es un producto derivado de las reacciones químicas que se presentan, por otra parte, las interacciones microbiológicas que son realizadas por medio de las colonias bacterianas anaerobias, expuestas a la materia orgánica que se va a tratar.

El proceso de digestión anaerobia tiene como resultado una eficiencia determinada mediante las características químicas en cuanto a la composición del biogás, dependiendo de la concentración generada de metano dentro de la solución debe ser muy alta en un aproximado del 85% para que pueda ser aprovechado como una fuente de energía sustentable. El biogás tiene la factibilidad de ser utilizado en ciertas condiciones en sustitución del gas LP debido a su combustión es posible generar energía calorífica, o también, puede ser utilizado en la generación de otras energías alternativas como lo es energía eléctrica.

Para la operación de estos sistemas, la temperatura, sobre todo, dentro del sistema anaerobio; son los factores que determinan el tipo de digestión anaerobia a utilizar.

Si este proceso se encuentra dentro de un rango establecido entre los 20 y 40°C. de temperatura, se tiene como factor que es un proceso de digestión anaerobia mesofílica. Otro tipo de digestión anaerobia puede ser la termofílica, la cual se encuentra compuesta en rangos de 45 hasta 60°C de temperatura.

El proceso de la digestión anaerobia tiene un elevado número de reacciones bioquímicas las cuales tienen lugar en un sistema muy complejo debido a la gran cantidad de microorganismos involucrados en ellas y en este sistema la mayoría de reacciones ocurren simultáneamente. Dentro de los estudios bioquímicos y microbiológicos hasta nuestros días utilizan una división en el proceso de descomposición anaeróbica de toda la materia orgánica en cuatro fases o etapas.

Este proceso consiste en varias etapas en las cuales toman lugar las reacciones antes mencionadas, dando lugar a interacciones químicas y microbiológicas dentro de la materia orgánica a tratar.

Las etapas de la digestión anaerobia son:

1. Hidrólisis
2. Fermentativa o Acidogénesis
3. Acetogénesis
4. Metanogénesis

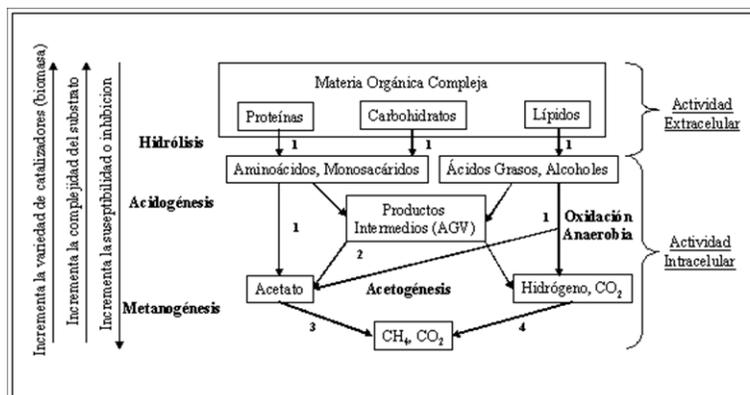


Ilustración 1. Esquema de digestión anaerobia de materiales poliméricos.

A continuación, se dará a conocer los antecedentes e investigaciones relacionadas de las etapas de la digestión anaerobia.

### 1.8.3. Hidrolisis.

En la primera fase de la digestión anaerobia se encuentra la etapa de la hidrolisis, este proceso consiste en descomponer las moléculas químicamente complejas, independientemente de que sean solubles o insolubles a partículas de menor tamaño. La etapa que lleva a cabo la acción hidrolítica de la materia se encuentra en cierto tipo de bacterias anaerobias conocidas como bacterias hidrolíticas.

El principal objetivo de ellas consiste en los carbohidratos, proteínas, lípidos y compuestos aromáticos en monómeros simples, como alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno. (S., 2008)

El proceso de la hidrolisis de moléculas complejas se lleva a cabo gracias a enzimas extracelulares que son producidas por una serie específica de microorganismos hidrolíticos.

Este proceso depende mucho de varios factores como lo son: la temperatura del sistema, el tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica del sustrato (Como lo es el porcentaje de carbohidratos, lignina, proteínas y grasas), además, del tamaño de las partículas mencionadas o del nivel de pH y por último la concentración de amonio ( $\text{NH}_4$ ) en el sistema.

Para facilitar el proceso, en algunos casos el paso inicial es catalizado por el uso de un ácido o alcalino.

#### 1.8.4. Acidogénesis

El proceso de acidogénesis o de fermentación, es el proceso en el que las azúcares, los aminoácidos y los ácidos grasos de cadena larga producidos por la etapa de al hidrólisis se transforman en su mayor parte en hidróxido de carbono, alcoholes, ácidos grasos volátiles (AVG) e hidrógeno, mediante oxidantes anaerobios y microorganismos fermentativos. Para este proceso, las principales bacterias de esta etapa con bacterias facultativas, del género Clostridium, Bacillus, Pseudomonas y Micrococcus. Caracterizadas por tener una alta de crecimiento en comparación con las restantes.

En la etapa de la acidogénesis se encuentra la fermentación de las moléculas orgánicas solubles dando como resultado compuestos utilizados directamente por las bacterias metanogénicas y algunos compuestos reducidos como lo son valérico, láctico, butírico, propiónico y etanol las cuales posteriormente son oxidadas por las bacterias acetogénicas. Este grupo de bacterias es importante no solo porque que producen el alimento para los grupos de bacterias del siguiente proceso, sino también, porque eliminan los posibles residuos de oxígeno disuelto del sistema. Por último, estos microorganismos se componen de un grupo de bacterias facultativas anaeróbicas, o mejor conocidas como bacterias dedicadas a la formación de ácidos.

### 1.8.5. Acetogénesis

Para la etapa encargada de realizar la acetogénesis, existen reacciones microbiológicas en donde los alcoholes y ácidos grasos que se produjeron de la etapa de acidogénesis sufren de fuertes cambios transformándose principalmente en dióxido de carbono, ácido acético y sobre todo hidrógeno.

Para que los productos derivados de la fermentación de este proceso puedan ser completamente metabolizados por los organismos metanogénicos (acético y H<sub>2</sub>) y otros derivados como etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deberán de ser transformados para completar el proceso en productos simples como lo son acetato CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup> e hidrógeno H<sub>2</sub>, por medio de las bacterias acetogénicas. (S., 2008).

Existen diferentes tipos de microorganismos acetogénicos, los cuales son diferentes del resto ya que tienen propiedades especiales y son conocidos como homoacetogénicos. Las bacterias homoacetogénicas tienen la posibilidad de crecer heterotróficamente mediante la presencia de azúcares o compuestos monocarbonados como lo son la mezcla de H<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>, produciendo como único producto el acetato. A diferencia de las bacterias acetogénicas, este tipo de bacterias no contienen la posibilidad de producir hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que estas lo consumen como sustrato. Dentro de varios estudios, se ha dado como resultado neto del metabolismo homoacetogénico es posible mantener bajas presiones parciales del hidrógeno en el sistema y, por lo tanto, permite que exista actividad entre las bacterias acidogénicas y acetogénicas.

#### 1.8.6. Metanogénesis.

Esta es la última etapa del proceso completo de descomposición anaerobia para la degradación de la materia orgánica, este proceso está a cargo de bacterias anaerobias metanogénicas que son pertenecientes al género conocido como *Methanobacteriumformicum* y *Methanobrevibactersp.* El proceso consiste en que los microorganismos metanogénicos se encargan de la formación del metano a partir del resultado del acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono.

Para este proceso existen dos especies de microorganismos metanogénicos como lo son las bacterias metanogénicasacetotróficas y las bacterias metanogénicashidrogenotróficas. Para estas bacterias es considerado que un 70% del metano producido en el medio anaerobio proviene de la concentración del acetato en el lecho y el 30% restante se puede considerar como proveniente de la atmósfera con CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. (S., 2008)

Para completar el proceso de la metanogénesis, los microorganismos metanogénicos realizan la formación de metano a partir de los sustratos monocarbonados o con doble átomo de carbono en un enlace covalente, acetato, H<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>, metanol y algunas metilaminas. Por ello, se establecen dos grupos de microorganismos en función del sustrato encargado de la metabolización. Los Hidrogenotróficos, consumidores de H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> y fórmico y los Acetoclásticos, consumidores del acetato y algunas aminas.

#### 1.8.7. Factores de la digestión anaerobia.

Para que exista la posibilidad de que la digestión anaerobia se lleve a cabo, es necesario asegurar la supervivencia de las bacterias y sobre todo mantener su crecimiento dentro del digestor. Teniendo esto en cuenta, los métodos a seguir para que las condiciones sean optimas son el control de las variables del proceso: temperatura, potencial de Hidrógeno (pH), nutrientes y compuestos tóxicos.

#### 1.8.8 Temperatura.

Parámetros como la temperatura son variables que se encuentran directamente relacionados con la posible supervivencia del biodigestor, además uno de los factores más importantes en el crecimiento de las bacterias dentro del sistema. Todas las reacciones anaerobias que se mencionaron anteriormente dependen de la temperatura de operación del biorreactor. Si deseamos que la digestión anaerobia se realice de manera exitosa se deben considerar dos tipos de digestión que se establecen mediante la temperatura de operación existiendo dos variables que son: mesofílica y termofílica.

Como se mencionó anteriormente existen dos modalidades en las que se puede trabajar la digestión anaerobia de acuerdo a la temperatura en la que se trabaja, la digestión mesofílica en un rango desde los 12°C hasta los 40°C dejando un óptimo promedio entre los 29° C y 30°C. Por otro lado, la termofílica se encuentra en rangos diferentes los cuales están establecidos entre los 35°C hasta los 65°, dando un promedio de rendimiento óptimo de 53°C.

La razón por la que la temperatura es un factor muy importante dentro de la digestión anaerobia es porque esta determina la velocidad de las reacciones que se generan dentro del sistema anaerobio, por lo que, a una mayor temperatura de trabajo en el sistema, las reacciones son más veloces y además el crecimiento de las bacterias es mayor, sin embargo, si los rangos de temperatura establecidos son excedidos causaran que los compuestos celulares formados cambien la estructura química actual dañando de manera definitiva el sistema. Por lo tanto, para cada uno de los grupos bacterianos que existe una temperatura mínima y máxima para mantenerlos con vida, la temperatura óptima de trabajo permitirá el completo desarrollo del sistema y temperaturas extremistas fallas críticas dentro del sistema.

### 1.8.9. Potencial de Hidrógeno (pH)

Para mantener los parámetros óptimos de trabajo dentro del biorreactor, además de la temperatura otro de los factores importantes que se deben tomar en cuenta para el buen funcionamiento del sistema es el potencial de hidrogeno (pH). Para que las bacterias tengan un crecimiento continuo debe existir un equilibrio en la producción de los ácidos dentro del sistema, el hidrógeno se encuentra directamente relacionado debido a su velocidad de producción y de consumo. En este caso el potencial de hidrogeno pH se debe establecer en el valor de pH al que las bacterias tengan su mayor rendimiento. (Lay, 2011).

Para que la producción de biogás se encuentre en una alta concentración de metano, el pH debe encontrarse en un rango situado entre el 6.5 y el 8.5, aunque para varios sistemas fue determinado que un rango óptimo de trabajo para los microorganismos anaerobios debe encontrarse en la escala de los 7 hasta los 7.5 de pH.

Gracias al desarrollo de los apartados mencionados, se llevó a cabo una recopilación de manera exhaustiva acerca de los antecedentes científicos dentro del tema, demostrando de manera exitosa que el presente proyecto cuenta con un extenso campo de investigación, además, fue posible extender grandemente el conocimiento acerca de los subtemas derivados de cada uno de los apartados.

Dentro de la investigación de los conceptos clave para el estado del arte, se

## CAPÍTULO II. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 2.1. Reactor anaerobio dedicado a la producción de biohidrógeno.

El primer paso para la experimentación con el reactor anaerobio dedicado a la producción de biohidrógeno es la obtención del inóculo de trabajo el cual fue obtenido de un digester anaeróbico instalado en la planta piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba alimentado con residuos sólidos orgánicos triturados y homogenizados utilizando agua en un porcentaje del 10% siguiendo con lo establecido la adición de residuos se incrementó durante cinco días con el objetivo de que el reactor se encontrara operando en condiciones de sobrecarga (“overloaded”) debido a que diversos autores han reportado que dicha condición favorece la producción de H<sub>2</sub> sobre la producción de CH<sub>4</sub>.

El segundo paso es el de practicar un pre-tratamiento al inóculo existente para lograr la inhibición de los organismos metanogénicos. Se han utilizado diversos tipos de pre-tratamientos con el fin de inactivar a los microorganismos metanogénicos y de esta forma obtener la máxima producción de hidrógeno gracias a la recopilación de datos encontrados en artículos científicos. Entre los distintos tipos de pre-tratamientos que se han utilizado para obtener cultivo enriquecido de microorganismos productores de hidrógeno se encuentran el pre-tratamiento básico, el pre-tratamiento ácido, con aireación, con ácido 2-bromoetanosulfónico y térmico. Sin embargo, aún después de haber aplicado distintos métodos, se ha observado en conclusión que el pre-tratamiento térmico es un método eficiente para la remoción de los microorganismos consumidores de hidrógeno.

El cultivo dominante de Clostridium puede ser fácilmente obtenido por el tratamiento térmico del lodo. Las esporas formadas a altas temperaturas pueden ser activadas cuando las condiciones son adecuadas para la producción de gas hidrógeno.

Dicho pretratamiento en el caso de estudio consistió en someter al inóculo a una temperatura de 80°C a baño maría durante 30 minutos y posterior a este pretratamiento el inóculo fue empleado en el reactor anaerobio dedicado a la producción de biohidrógeno.

La producción de hidrógeno por fermentación anaerobia es un proceso muy complejo influenciado por varios factores como pueden ser el inóculo, el tipo de sustrato utilizado, el tipo de reactor, nitrógeno, fosfato, iones metálicos; pero los factores más importantes para mantener la producción de hidrógeno son las variables de pH y temperatura.

#### 2.1.1. Reactor anaerobio.

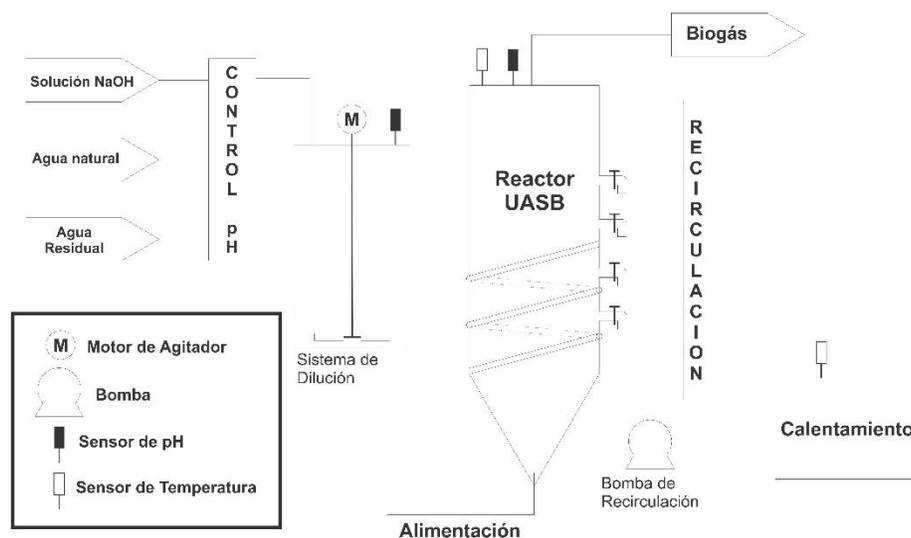


Ilustración 2. Diagrama esquemático del reactor anaerobio.

Se puede decir que el proceso de digestión anaerobia es biológicamente complejo, para llevarse a cabo, materiales orgánicos de un substrato como residuos vegetales y animales, son convertidos en biogás, el cual como mencionamos anteriormente es una mezcla de metano y dióxido de carbono con algunos restos de otros elementos mediante el proceso químico de bacterias y microorganismos que son sensibles al oxígeno y sus precursores como el  $H_2O_2$ .

Dentro del proceso de digestión anaerobia, la mayor parte de residuos tanto vegetales como estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de gran parte de industrias papeleras y sobre todo algunas de las industrias de tratamiento de productos químicos, pueden ser convertidos en subproductos útiles para la generación de energías renovables.

Gracias a el proceso de digestión anaerobia, aproximadamente el 90% de la energía derivada de los productos tratados por oxidación directa son transformados en metano, dejando solo 10% de la energía para su crecimiento bacteriano siendo este frente al 50% que es consumido en un sistema aeróbico.

Cuando se realiza el proceso de digestión anaeróbica, existen microorganismos metanogénicos que desempeñan la función de actuar como enzimas respiratorias que, junto con las bacterias que no son metanogénicas, componen una gran cadena alimentaria que crea una relación entre las dos cadenas enzimáticas compuestas de células anaeróbicas.

De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo.

El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación anaeróbica o respiración anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones (Castelló, 2012)

### 2.1.2. Sistema de alimentación

Para poder mantener el reactor en modo de producción de biohidrógeno una de las variables más importantes a controlar es el pH tanto de la entrada como del interior del reactor. Para poder controlar el pH de entrada se instaló un Sistema de alimentación automático que incluye una solución alcalina y una solución ácida que pueden ser agregadas automáticamente a un tanque de ajuste de pH del sustrato disuelto en agua en la proporción establecida por la carga volumétrica aplicada calculada para el reactor.

El diagrama a bloques del sistema de alimentación automático se muestra en la Ilustración 3. Diagrama a bloques del sistema de alimentación.

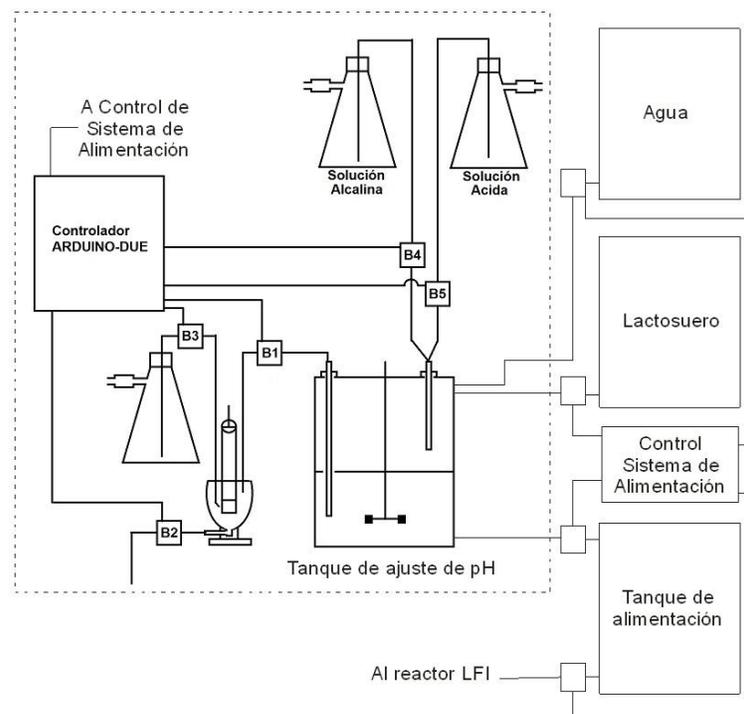


Ilustración 3. Diagrama a bloques del sistema de alimentación

El funcionamiento del Sistema automático de alimentación es el siguiente:

Se inicia con 2 depósitos de alimentación, el primero con el sustrato y el segundo con agua; el Sistema dosificador inicia con el llenado del tanque de ajuste de pH con una mezcla de 1 litro de sustrato y 10 litros de agua los cuales se homogenizan con un agitador para posteriormente iniciar el control de pH el cual debe ser ajustado a 4.5 por medio de la adición de una solución alcalina o ácida según se requiera acorde a la lectura del sensor de pH el cual es enjuagado con agua para asegurar su estabilización después de cada lectura realizada y la mezcla homogenizada con el agitador. Una vez alcanzado el pH deseado la mezcla es transferida a un tanque de alimentación de modo tal que el Sistema pueda preparar una nueva mezcla en el tanque de ajuste de pH mientras el tanque de alimentación es utilizado para alimentar el reactor permitiendo así una alimentación en modo continuo del reactor.

El Ajuste de pH se lleva a cabo mediante una placa de desarrollo ARDUINO DUE; la cual tiene como entrada el voltaje de salida de la punta sensor de pH industrial y con las salidas controla 5 bombas peristálticas con las siguientes funciones:

- -B1 toma de muestra
- -B2 retira líquido de recipiente de muestreo
- -B3 Limpieza del sensor con agua destilada
- -B4 solución alcalina
- -B5 solución ácida

Además, se controla un motor para agitación por medio de pastilla magnética.

Se obtiene como salida las mediciones de pH realizadas durante el proceso.

El diagrama de flujo del sistema se muestra a continuación:

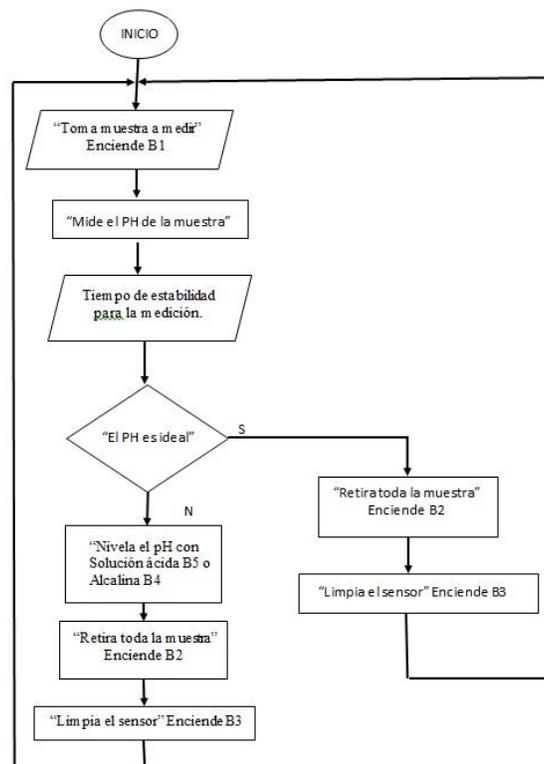


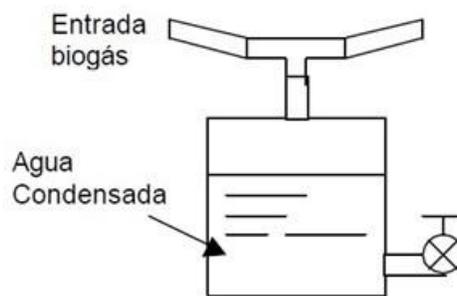
Ilustración 4. Diagrama de flujo de sistema de control de pH.

### 2.1.3. Sistema de gestión de biogás.

La gestión del biogás comprende desde la salida del reactor, la purificación del biogás, la cuantificación y el almacenamiento del mismo.

El primer paso de purificación consiste en la deshumidificación del biogás para lo cual a la salida de biogás del reactor se colocó una trampa de eliminación por condensación de contenedor cerrado fabricada con tubo de PVC de 1/2" de diámetro con una llave de salida inferior para poder purgar la trampa.

En la figura se observa la configuración de la trampa de humedad.



*Ilustración 5. Trampa de humedad.*

El segundo paso de purificación consiste en la eliminación de ácido sulfhídrico del biogás el método utilizado en la investigación para eliminar el ácido sulfhídrico del biogás consiste en una trampa de lana de hierro para atrapar el ácido sulfhídrico del biogás el dispositivo consiste en un tubo de PVC cédula 80 de 2" al cual se le agregaron dos rejillas en los extremos y 2 tapas con conexión a manguera de 1/4" para poder acoplarse al sistema.

Las especificaciones del filtro utilizado son las siguientes:

Dimensiones Ø x L en cm	Carga lana acero	Caudal máximo	Retención
2.54 x 30	300gr	0.62 m <sup>3</sup> /h	0.179 KgH <sub>2</sub> S

Tabla 1. Especificaciones del Filtro. .



Ilustración 6. Diagrama del Filtro de Ácido Sulfhídrico.

Una vez obtenido el biogás es necesario cuantificarlo para lo cual el método tradicional es por medio de desplazamiento de agua en una probeta, pero tiene muchas desventajas; en su lugar en el Tecnológico de Orizaba se desarrolló un medidor volumétrico de gas a escala de laboratorio para reactores anaerobios que propone un medidor volumétrico de gas en línea basado en el principio de desplazamiento de líquido en un rango de 1ml a 1000ml. Una de las principales ventajas de este sistema es que el biogás medido es recolectado en una bolsa removible de nylon para poder evaluar dicho biogás y obtener las concentraciones de hidrógeno, metano y dióxido de carbono. Otra ventaja es su bajo costo en comparación con medidores comerciales equivalente a una veintea parte del costo comercial. (Martínez-Sibaja, et al., 2011).

#### 2.1.4. Almacenamiento del biogás.

Se llevó a cabo el diseño e implementación de un pulmón a la salida del biogás para almacenamiento del biogás. Este dispositivo a su vez servirá para resolver problemas de obstrucción en la recirculación, ya que en lugar de recircular líquido en dirección inversa en la manguera de recirculación resulta más efectivo recircular biogás ya que además de corregir obstrucciones también puede ser utilizado para resolver apelmazamientos de biomasa en la parte superior del reactor.

El dispositivo diseñado como pulmón del reactor puede observarse en la Ilustración 7. Pulmón diseñado para la captación de biogás.



*Ilustración 7. Pulmón diseñado para la captación de biogás.*

### 2.1.5. Sensores utilizados

#### Sensor de pH

Para realizar la medición de pH se utilizó un electrodo industrial de la marca PHIDGETS modelo 3551; este dispositivo entrega una diferencia de potencial en mili voltios para cada valor de pH. Además, cuenta con una termo resistencia (RTD) PT1000 la cual permite censar la temperatura. Esto sirvió para mejorar la medición de pH debido a que la temperatura afecta su valor.

Para realizar la interconexión del sensor de pH al controlador se utilizó un adaptador:



Ilustración 8. Ilustración 8. PHIDGETS modelo 1130 con entrada BNC.

Los sensores de pH incluyen de fábrica una solución para mantener húmeda la punta de prueba, pero se debe llevar a cabo además un acondicionamiento inicial del electrodo de la siguiente manera:

- Remover la tapa protectora de la punta del electrodo y remojar la punta con agua destilada.
- Introducir el electrodo en un vaso de precipitado durante 20 minutos en una solución 4 M de KCL.
- Se debe evitar la exposición prolongada de la punta del sensor al agua destilada ya que puede llegar a dañarse la membrana especial de vidrio.
- 

Después del acondicionamiento del sensor por 20 minutos se remoja nuevamente con agua destilada para realizar la limpieza de la punta y se procede a la calibración del electrodo con las soluciones buffer.

#### Sensor de temperatura

Para la medición de la temperatura del reactor y del tanque de alimentación se utiliza un DS18B20 que es un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo 1-Wire, este protocolo necesita solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus.

El sensor DS18B20 es fabricado por “Maxim Integrated”, el encapsulado de fábrica es tipo TO-92 similar al empleado en transistores pequeños. La presentación comercial más utilizada por conveniencia y robustez es la del sensor dentro de un tubo de acero inoxidable resistente al agua.



*Ilustración 9. Sensor de temperatura DS-18B20.*

El sensor registra lecturas en un rango de temperatura desde los  $-55^{\circ}\text{C}$  hasta los  $125^{\circ}\text{C}$  y con una resolución programable desde 9 bits hasta 12 bits.

Cada sensor tiene una dirección única de 64bits establecida de fábrica, esta dirección sirve para identificar al dispositivo con el que se está comunicando, puesto que en un bus 1-wire pueden existir más de un dispositivo.

El sensor tiene dos métodos de alimentación:

- Alimentación a través del pin de datos
- Alimentación usando una fuente externa

Alimentación a través del pin de datos:

De esta forma, el sensor internamente obtiene energía del pin de datos cuando este se encuentra en un estado alto y almacena carga en un condensador para cuando la línea de datos esté en un estado bajo, a esta forma de obtener energía se le llama "Parasite Power" y se usa cuando el sensor debe conectarse a grandes distancias o en donde el espacio es limitado, puesto que de esta forma no se necesita la línea de VDD. El diagrama para su conexión es de la siguiente forma:

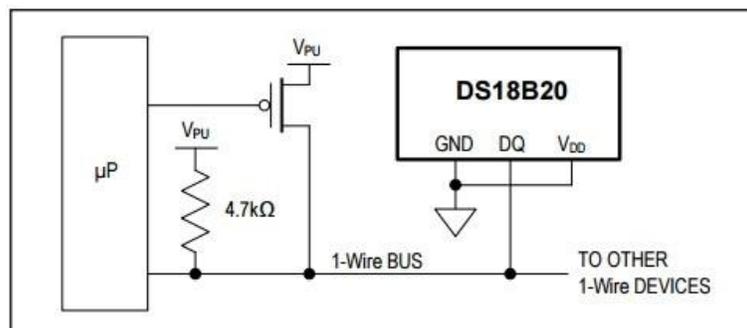


Ilustración 10. Alimentación a través del pin de datos.

El pin GND y VDD están ambos conectados a GND, esto es indispensable para que se active el Parasite Power. EL MOSFET en la imagen es necesario para cuando se realizan conversiones de temperatura o se copian datos desde la memoria de circuito de la EEPROM, en estas operaciones la corriente de operación aumenta y si solo se suministra energía a través de la resistencia pueden causar caídas de voltaje en el condensador interno.

Alimentación usando una fuente externa:

De esta forma el sensor se alimenta a través del pin VDD, de esta forma el voltaje es estable e independiente del tráfico del bus 1-wire.

El diagrama de conexión es de la siguiente forma:

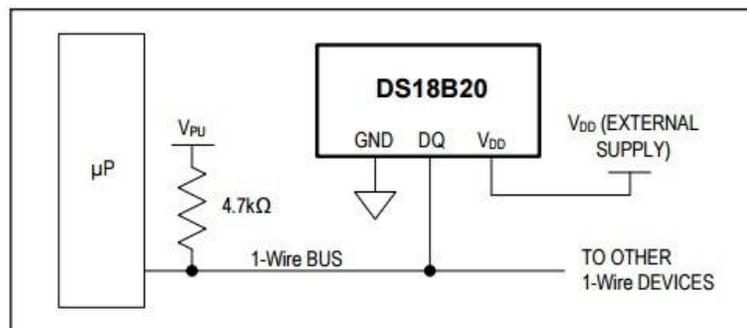


Ilustración 11. Alimentación usando una fuente externa.

Esta forma de alimentación es la más recomendada y es la utilizada en este proyecto de investigación.

Para poder trabajar el DS18B20 en Arduino necesitamos dos librerías:

- Librería OneWire
- Librería DallasTemperature

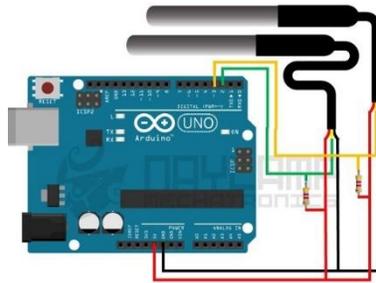
### Librería OneWire

En esta librería está implementado todo el protocolo del bus 1-wire. Y puede usarse tanto para el DS18B20 como para otros dispositivos 1-wire.

### Librería DallasTemperature

En esta librería están implementadas las funciones necesarias para poder realizar las lecturas o configuraciones del DS18B20.

Para este caso las conexiones son las siguientes:



*Ilustración 12. Conexiones del sensor de temperatura.*

Cada sensor trabaja con un pin diferente y necesita su propia resistencia Pull-Up de 4.7K.

### 2.1.6. PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO

Abordando el tema del biohidrógeno, se dará a conocer su etimología, el término biohidrógeno proveniente de la palabra griega “bio” que significa vida, “hidro” que significa agua y “genes” que significa nacido o formado, juntas hacen referencia a un material orgánico no fosilizado y además, biodegradable, procedente de las plantas, animales y también microorganismos derivados de fuentes biológicos. El Biohidrógeno puede definirse como el elemento del hidrógeno, sin embargo, producido de manera biológica en su mayoría por bacterias, utilizado como un biocombustible proveniente de material orgánico y desechos. Existen plantas fermentativas dedicadas a la producción de biohidrógeno, estas son plantas industriales que trabajan continuamente en la producción de hidrógeno.

Dentro de las industrias productores de biohidrógeno, se trabaja continuamente varios procesos tales como la fermentación termofílica, la fermentación oscura y/o/ fotofermentación y, por último, la limpieza de gases.

La producción de biohidrógeno también puede implicar un elemento de digestión anaeróbica donde el metano del biogás se convierte mediante el reformado con vapor de agua en hidrógeno.

El hidrógeno producido a partir de microalgas y bacterias es biohidrógeno (Toledo, 2013). Actualmente no hay procesos prácticos de producción de biohidrógeno. Sin embargo, varios conceptos prometen un desarrollo de procesos a corto y largo plazo (Toledo, 2013).

El biohidrógeno se puede describir de manera competitiva como hidrógeno, que se produce químicamente, termoquímicamente, biológicamente, bioquímicamente y bio-fotolíticamente de todos los materiales de biomasa.

## 2.1.7. CARACTERÍSTICAS DE REACTOR DE BIOHIDRÓGENO

Para el diseño del reactor a utilizar en la investigación se partió de un reactor tubular anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket) fabricado en polimetilmetacrilato transparente, Nylamid tipo M y acero inoxidable cuyas características se muestran en la Tabla 2. Características del prototipo del reactor.

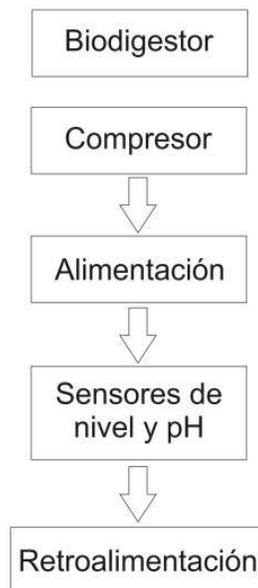
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Diámetro externo	15.24 cm (6")	Altura útil	95 cm
Diámetro interno	14.04 cm	Volumen útil total	17 L
Altura total	107 cm	Volumen de lodos / soporte colonizado	10 L
% Para cámara de biogás	10% (12 cm)	Volumen útil del reactor	7 L

Tabla 2. Características del prototipo del reactor.

## 2.2. INTERFAZ HOMBRE – MAQUINA

Para la creación de la interfaz Hombre – Maquina se requiere de un ambiente grafico de fácil uso y amigable para la vista, algo primordial que se debe recalcar es la fácil visualización para el operador.

Dentro de la metodología de la interfaz gráfica, se dio inicio realizando un análisis de las variables a observar y manipular por el sistema de control y monitoreo a distancia. En el siguiente diagrama se muestran las variables de interés a utilizar.



*Ilustración 13. Diagrama de Variables del Sistema*

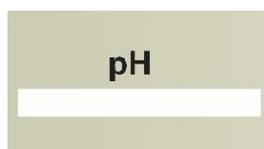
El buen funcionamiento de las electroválvulas para la alimentación del biodigestor depende del proceso de compresión el cual se ejerce mediante la activación de bombas por lo que una de las etapas en el sistema de control y monitoreo a distancia consiste en encender o apagar esta parte generando un indicador dentro de la aplicación.



*Ilustración 14. Diseño de los botones de encendido y apagado e indicador de operación*

De la misma manera se realizó el accionamiento de las etapas de las bombas de alimentación y retroalimentación. Además de los botones de encendido y apagado se generó un recuadro indicador para dar a conocer al operador si el proceso ya se encuentra en funcionamiento.

Terminando con el proceso de alimentación del biodigestor en la siguiente etapa existen sensores de nivel y pH para los cuales se dedicó un apartado dentro del sistema para que estos pudieran ser observados a distancia y así tomar las decisiones de operación necesarias.



*Ilustración 15. Recuadro para la lectura a distancia del sensor de pH*

Buscando que exista la posibilidad de monitorear el sistema de manera segura el comportamiento del biorreactor y su control, se procedió a generar niveles de seguridad dentro de la interfaz gráfica, para lograr este objetivo se creó un sistema de "login" o como se conoce en el ámbito de la informática un "longo", en esta parte de la interfaz se controla el acceso individual al sistema mediante la identificación de un usuario, utilizando un nombre de usuario asignado y una contraseña. Después de la generación del sistema de login fueron creados 3 niveles de seguridad, cada nivel cuenta con una contraseña y un usuario distinto y único.

Independiente a los niveles mencionados, se generó un nivel maestro, este no forma parte del login debido a que se encuentra alojado en la programación, almacenado directamente en el servidor para el funcionamiento de todo el sistema a nivel informático. La utilización de este nivel es exclusivamente para la modificación del código base, por seguridad del sistema, a este nivel solo se puede acceder de manera manual mediante una llave de seguridad directa hardware.

#### 2.2.1. Creación del login

Gracias a la creación del sistema de login, los usuarios pueden obtener una mayor seguridad en el acceso del sistema y a la administración de los recursos a utilizar. Para este sistema el usuario deberá identificarse mediante una cuenta de usuario y una contraseña asociada, a este sistema se le conoce como identificación de usuario, a continuación, se muestra el login del sistema.

El sistema fue diseñado utilizando el software Visual Studio, en el cual se pretende generar una interfaz gráfica amigable para el usuario y compatible con la mayoría de ordenadores que utilizan el sistema operativo Windows. Visual Studio proporciona un entorno IDE completo para cualquier desarrollador, muy independiente de su entorno de trabajo, debido a las más recientes extensiones y servicios cloud de Microsoft se han introducido una gran serie de novedades mejorando la productividad de los programadores. , además, dentro de los trabajos futuros mediante este software de desarrollo se pretende continuar con el monitoreo y control a distancia mediante la generación de una aplicación móvil dentro de IOS o Android.

Para la implementación del sistema fue requerida una serie de pasos que se muestran posteriormente, la aplicación de los filtros de ingreso, la selección de los elementos requeridos por el equipo para el manejo de señal adaptadas al sistema y el ensamble en conjunto de todo lo mencionado anteriormente.



*Ilustración 16. Sistema de Ingreso LOGIN*

### 2.2.2. Nivel de supervisión

Como se mencionó anteriormente para poder ingresar al nivel de supervisión debe de iniciar mediante el proceso de identificación de usuario, utilizando cuenta de acceso y contraseña. Una vez que se ha ingresado al nivel de supervisión, fueron agregados todos los elementos para realizar la interfaz gráfica. Algunos de los elementos utilizados fueron labels, textbox, picturebox, buttons, serialport, etc. los elementos mencionados y algunos otros componen la interfaz gráfica.

Después de que fue desarrollado el entorno agregando los elementos, estos fueron ordenados con la mayor comodidad visual hacia el operador. Para el desarrollo del entorno se realizó una investigación de campo exponiendo a los operadores a entrevistas y diferentes puntos de vista para lograr que la interfaz cumpliera con los requisitos de los expertos en el área, posteriormente se modificaron las características de los elementos agregados a la interfaz, como por ejemplo el botón de salida “Cerrar Sesión” para salir del sistema.

Para realizar la lectura de datos fue agregada una herramienta especial, recién establecida por actualizaciones de Visual Studio, llamada SerialPort; esta herramienta es de gran importancia ya que es la encargada de realizar la conexión entre nuestro sistema y el microcontrolador. El SerialPort (Puerto Serial), es el encargado de la lectura y escritura de datos, para realizar este tipo de configuración es necesaria la activación de una característica conocida como DataReceived, establecer la velocidad de baudios a utilizar en el puerto serial. Para el correcto funcionamiento en la comunicación de dos o más dispositivos es necesario que exista una relación en la velocidad de transferencia de datos.

110	300
600	1200
2400	4800
9600	14400
19200	28800
38400	56000
57600	115200

*Tabla 3. Velocidad de Transmisión Estándar para la mayoría de puertos seriales*

La velocidad máxima de transmisión para la mayoría de los puertos seriales es 115200, sin embargo, para nuestro caso la velocidad más conveniente a utilizar es de 9600. Esto debido al microcontrolador seleccionado. (Ferdoush, 2014)

En la siguiente imagen se presenta el modelo de la interfaz en el nivel supervisión, como se observa solo tiene indicadores y un botón de salida. Se muestran 4 biodigestores que en su interior indican 4 niveles proporcionados por los estados dentro de cada biodigestor. Del lado izquierdo se pueden observar 3 indicadores que serán activados dependiendo del nivel en el que se encuentre. Por último, en la parte inferior se cuenta con 3 indicadores de estado que representan 3 motores, que son los de la alimentación, la retroalimentación y el del compresor, junto con ellos también podemos observar un indicador (TextBox) que indica el nivel de pH medido por un sensor encontrado al interior.

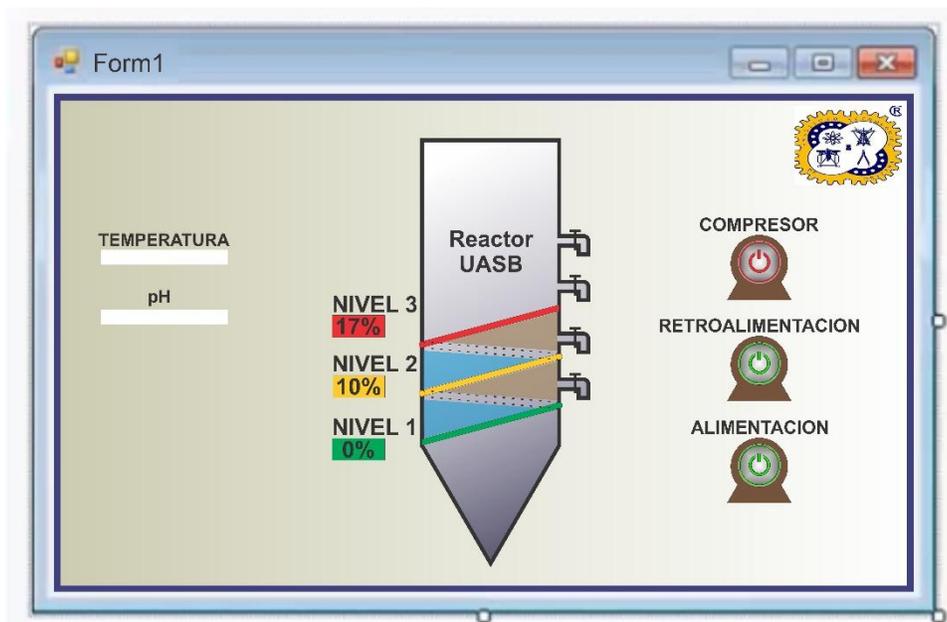


Ilustración 17. Interfaz Gráfica

### 2.2.3. Nivel de monitoreo

Para el nivel de monitoreo también es necesario ingresar mediante la utilización de un usuario y contraseña, de forma que sin ello no será posible el acceso, cabe destacar que este nivel no solo es de visualización, sino que también tiene la posibilidad de modificar partes del sistema. Una vez que se ingresa al nivel se hace una conexión serial automática a través del microcontrolador, como la que fue creada en el nivel de supervisión, esto para crear un tren de datos que serán leídos y subidos para crear y actualizar el servidor de estado en cada cambio.

Como se muestra en la imagen se pueden observar tres indicadores de color verde o rojo, los cuales muestran el estado de los motores de alimentación, retroalimentación y el motor del compresor, del lado opuesto de estos se muestra un cuadro de texto Textbox donde se encuentra la lectura de un sensor de pH colocado externamente junto a la toma de muestreo. En la imagen también se muestra cuatro biodigestores que representan los que se tienen físicamente, en ellos es representado el nivel que contiene cada uno.

En la imagen se pueden observar 4 colores que dependiendo del nivel cambiara entre azul y café representando el color del agua y del sedimento. También fueron agregados los botones de control de las electroválvulas que van desde el 0% hasta el 100% asignadas a cada biodigestor.

Cada biodigestor cuenta dentro de la interfaz con indicadores encontrados en la parte izquierda, estos indicadores son representados con los colores que se muestran a continuación establecidos de acuerdo a su porcentaje de nivel.

<b>Nivel</b>	<b>Color</b>	<b>Porcentaje %</b>
1	Rojo	17%
2	Amarillo	10%
3	Verde	0%

*Tabla 4. Tabla de indicadores de color de acuerdo al nivel.*

A diferencia del nivel anterior, dentro de este nivel es posible modificar los parámetros deseados tal y como se muestra en la siguiente imagen ahora se cuenta con cuatro electroválvulas, para ello se crearon 4 botones los cuales tienen el porcentaje de apertura con la que pueden ser manipuladas siendo además independientes entre ellas. En este nivel también es posible modificar el estado en el que se encuentran los tres motores que componen al sistema.

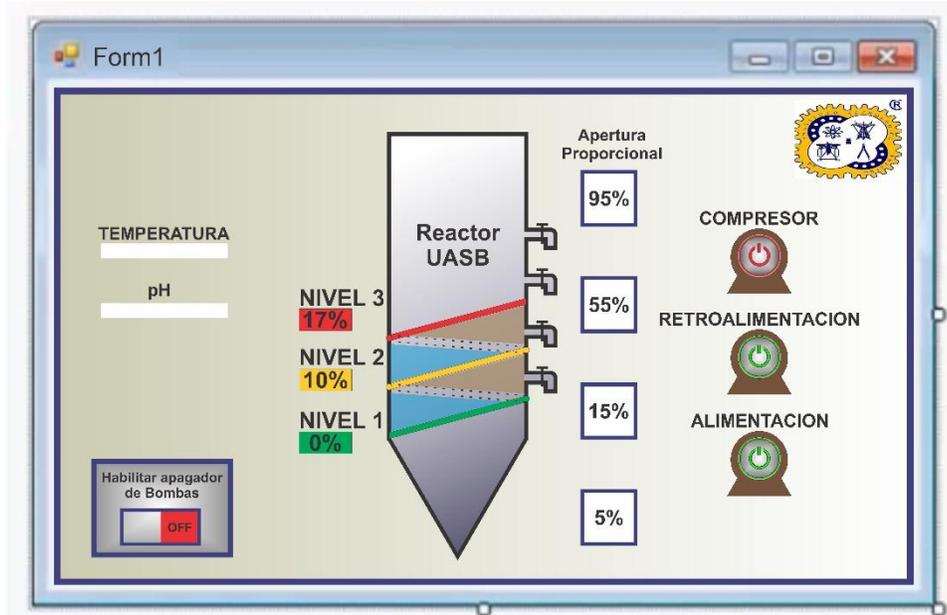


Ilustración 18. Nivel de Control

#### 2.2.4. Nivel de monitoreo, control y programación.

El ingreso a este último nivel, es posible solamente mediante el acceso desde la computadora principal a donde se encuentra alojada la programación de la interfaz gráfica.

Para el envío y recepción de datos entre el sistema y el usuario, es necesario utilizar una conversión entre caracteres de programación a código ASCII, esto para evitar conflictos a la hora de actualizar los estados. En este nivel, utilizando el código fuente se tendrá los privilegios de modificar los niveles anteriores, actuadores e incluso, adicionar actuadores al sistema, modificar el balance de la lectura de los sensores y también la capacidad de agregar más puertos serial para su lectura. Además, la anulación o asignación inmediata de nuevos usuarios en el sistema.

## 2.2.5. Conexión del convertidor de corriente a la electroválvula

Las electroválvulas de accionamiento directo son especialmente apropiadas para estas aplicaciones con alta presión y bajo caudal, el sistema electromagnético actúa directamente sobre un elemento de estancamiento.

El elemento de estancamiento actúa en contra de la presión de funcionamiento para separarse de su asiento y con la ayuda de la presión del fluido, un muelle mantiene cerrada la válvula. Esta función depende del tamaño del asiento, de la presión de funcionamiento y de la fuerza del solenoide. Este solenoide funciona con la inyección de corriente siendo su rango 4 a 20 m.A. Para poder accionarla.

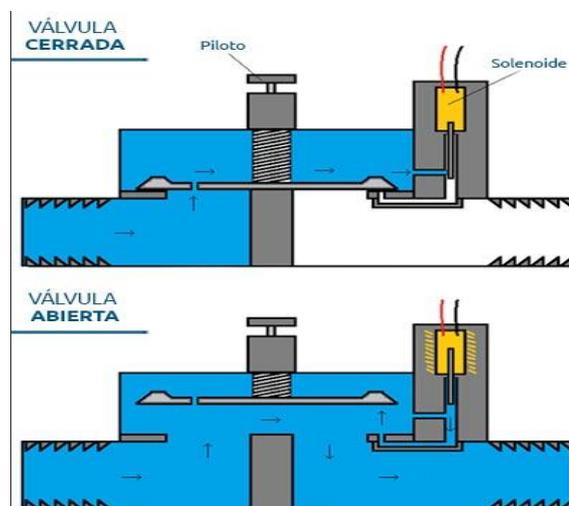


Ilustración 19. Funcionamiento de Válvulas

### 2.2.6. Acoplamiento de Software con Hardware

Para la realización del sistema fue necesario hacer varios acoplamientos con la finalidad de que todo el sistema trabaje en conjunto dependiendo del ensamblado del hardware para poder ser manipulado por el software.

El envío de datos y la recuperación de ellos es manipulada directamente por el microcontrolador, el cual contiene puertos analógicos y digitales.

Para la lectura de los sensores no habrá la necesidad de acoplamientos ya que se cuenta con puertos de lectura analógica permitiendo ser usados directamente. El microcontrolador será conectado mediante el puerto serial leído por la programación creada en la interfaz gracias al software Visual Studio, donde los datos serán enviados y separados para su lectura con el método Split, que nos sirve para separar datos de una cadena.

### 2.3. DIAGNÓSTICO Y AISLAMIENTO DE FALLAS

En la elaboración de un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas existen muchos factores que deben ser observados para lograr su correcto funcionamiento y de esta manera ser aplicado exitosamente al sistema, para ello, es primordial mantener en constante observación las variables del proceso de operación del sistema. La adecuación de distintos elementos de medición en el sistema es la mayor prioridad

### 2.3.1. Determinación del método a utilizar.

En los últimos años, la tecnología de digestión anaeróbica se ha convertido en una tecnología de creciente importancia, especialmente para aguas residuales. Aunque la digestión anaerobia ha sido considerada como uno de los procesos beneficiosos y ventajosos, en particular en el tratamiento de aguas residuales altamente contaminadas, sin embargo, se cree que el tipo de tratamiento es un sistema difícil debido a su inestabilidad y la complejidad en la solución de este problema en poco tiempo en una planta a escala real. El modelado es una herramienta valiosa tanto en el diseño como en la operación de plantas de tratamiento biológico, y puede ser utilizado para la optimización de procesos y pruebas de estrategias de control a un costo razonable.

Por lo tanto, el modelado ayuda a desarrollar una mejor comprensión de procesos de tratamiento y proporciona un potencial significativo para resolver problemas operativos, así como la reducción de los costos operativos en un proceso específico de tratamiento. Además, los resultados del modelo pueden ser evaluados para diferentes datos operativos antes de transferir los conceptos a una planta de escala completa. (Sibaja, 2013).

En la literatura, existen numerosos estudios como el modelado dinámico integral del reactor UASB, simulación matemática de la capa de lodos del reactor UASB, modelado dinámico de un reactor anaeróbico de alta velocidad de una sola etapa, y modelado matemático de digestión anaerobia discontinua, realizado sobre los modelos integrales y complejos para controlar y simular varios sistemas de tratamiento anaerobios.

En un reciente estudio, Pontes y Pinto realizaron estudios sobre el análisis de modelos cinéticos y de flujo (o hidráulicos) integrados para dos digestores anaeróbicos, UASB y EGSB (lecho de lodo granular expandido). En el estudio, se encontró que los modelos de flujo eran bastante diferentes para los reactores UASB y EGSB. Dado que muchos de los parámetros utilizados en el modelo de flujo del reactor UASB puede ser crítico para una simulación precisa, el estudio concluyó que las variaciones de volumen de secciones del reactor UASB fueron necesarias para describir con precisión el comportamiento de dicho digestor en estado no estacionario. (Turkdogan-Aydinol, 2010).

Porque los mecanismos asociados a los procesos anaeróbicos no son adecuados para formular de manera confiable, muchos de los modelos convencionales requieren simplificaciones de la representación del proceso para una mejor comprensión de los fenómenos subyacentes en digestores anaeróbicos. Por lo tanto, se requieren modelos más simples y útiles para superar la complejidad y aplicabilidad.

Las referencias de Biyikoglu han informado que los métodos numéricos convencionales requieren mucho tiempo para obtener resultados precisos, y en ocasiones no es posible alcanzar una solución debido a problemas de convergencia en cuanto al tipo de ecuaciones gobernantes y condiciones de contorno. (M., 2014).

El rendimiento de los procesos de digestión anaeróbica es complejo y altamente dependiente de las configuraciones de los diferentes reactores, y varía significativamente con diferentes características influyentes y condiciones operativas. Por lo tanto, el sistema debe ser continuamente monitoreado y controlado debido a su inestabilidad en circunstancias y condiciones, particularmente en términos de las tasas de producción de biogás o metano, lo que proporciona una indicación de la actividad global anaeróbica de la biomasa en el proceso, desde el proceso de digestión anaerobia.

Es muy susceptible a las fluctuaciones en los insumos del proceso, tales como tasas de carga orgánica, pH influente y compuestos orgánicos tóxicos, Las tasas de producción de biogás o metano dependen en gran medida de las condiciones del proceso aplicadas. Por lo tanto, las interrelaciones complicadas entre una serie de factores del sistema en el proceso se pueden explicar a través de una serie de intentos en el desarrollo un modelo representativo de predicción basado en el conocimiento que permite la Investigación de las variables clave con mayor detalle.

Debido a su velocidad y capacidad de aprendizaje, robustez, Capacidades predictivas y características no lineales, varias técnicas de modelado basadas en inteligencia artificial, como las redes neuronales, lógica difusa, neuro-difusa adaptativa a sistemas de inferencia, se han llevado a cabo recientemente en el Modelado de diversos procesos de la vida real en ingeniería ambiental. (Sibaja, 2013).

Entre estos métodos, la metodología de lógica difusa ha sido aplicada con éxito en una variedad de aplicaciones ecológicas y ambientales, que van desde la cartografía hasta el modelado, evaluación y Tareas de predicción. Los modelos basados en lógica difusa también han sido llevados a cabo por muchos investigadores como un establecido y prometedor Método para modelar diversos tipos de procesos anaeróbicos.

Sin embargo, no existen trabajos sistemáticos en la literatura específicamente dedicados a un estudio de una inteligencia artificial basada en Modelización de las tasas de producción de biogás y metano a escala piloto de un reactor UASB mesófililico que trata las aguas residuales utilizando la técnica de la lógica difusa.

Tal control basado en inteligencia artificial de las tasas de producción de gas en tiempo real puede proporcionar varias ventajas potenciales como la protección del sistema frente a posibles riesgos; asociado con fluctuaciones significativas en las características influyentes, optimización del proceso a un costo razonable, proporcionando una rápida evaluación y estimación de emisiones en base energética y el desarrollo de una estrategia continua de alerta temprana sin requerir una estructura de modelo compleja y procedimientos de estimación de parámetros. Por lo tanto, la aclaración del lugar de la presente materia en el esquema de la metodología de lógica difusa puede ser (Turkdogan-Aydinol, 2010).

Considerado como un campo particular de investigación para evaluar en tiempo real. Las tasas de producción de biogás e hidrógeno que son necesarias para controlar el proceso anaeróbico y establecer el diagnóstico de fallas. Teniendo en cuenta los hechos mencionados, se eligió el método de lógica difusa para el modelado del reactor en estudio y para verificar la validez del modelo MIMO fuzzy-logic se utilizarán varios conjuntos de datos de prueba adicionales que no se utilizaron en la formación del modelo.

## 2.3.2. Diseño del sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas.

Esquema de observadores dedicados; si quisiéramos ser capaces de identificar simultáneamente múltiples fallas, podemos extender el esquema de identificación de falla simple por medio de banco de observadores de la siguiente manera.

Para lograrlo diseñaremos diferentes observadores.

Para el observador  $i$ , agrupamos todas las fallas excepto la falla  $i$  con las perturbaciones, y las tratamos todas como entradas desconocidas. Específicamente, sea  $B_f^i$  la  $i$ -ésima columna de  $B_f$ , y sea  $B_{-i}$  todas las otras columnas. De manera similar,  $f_i$  denotan la  $i$ -ésima componente de  $f[k]$  y sean  $f_{-i}$  todos los demás componentes. Reordenando, podemos escribir:

$$x[k+1] = Ax[k] + B_f^i f_i[k] + \begin{bmatrix} B_d & B_f^{-i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d[k] \\ f_{-i}[k] \end{bmatrix}$$

$$y[k] = Cx[k] + D_f^i f_i[k] + \begin{bmatrix} D_d & D_f^{-i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d[k] \\ f_{-i}[k] \end{bmatrix}$$

Si el sistema  $A, \begin{bmatrix} B_d & B_f^{-i} \end{bmatrix}, C, \begin{bmatrix} D_d & D_f^{-i} \end{bmatrix}$  es fuertemente detectable, podemos crear un observador con entrada desconocida para este sistema, tratando el vector  $\begin{bmatrix} d[k] \\ f_{-i}[k] \end{bmatrix}$  como las entradas desconocidas. Además, podemos diseñar un residual  $r_i[k]$  para este sistema; Que el residual generado para el sistema sea dado por:

$$\hat{x}^i[k+1] = E^i \hat{x}^i[k] + F^i y[k:k+L]$$

$$r_i[k] = H_{i1} \hat{x}^i[k] + H_{i2} y[k:k+L]$$

Como en la última sección, si  $H_{i1}$  y  $H_{i2}$  son elegidos apropiadamente, tendremos  $r_i[k] = 0$  si  $f_i[k] = 0$ , y  $r_i[k] \neq 0$  en caso contrario. Por lo tanto, podemos determinar qué fallas están activas simplemente examinando cuáles de los residuos son distintos de cero.

Si el residuo  $r_i[k]$  es diferente a cero, entonces la falla  $i$  habrá ocurrido.

Es instructivo comparar el esquema en esta sección con el anterior. Obsérvese que, para identificar fallas múltiples, hemos tenido que agrupar todas las fallas, excepto una, en las entradas desconocidas, junto con las perturbaciones. Esto podría potencialmente añadir un gran número de entradas desconocidas al sistema, evitando que sea fuertemente detectable.

Por el contrario, el esquema de la sección anterior sólo añade un fallo único a las entradas desconocidas para cada observador. Por lo tanto, el primer esquema puede aplicarse a una clase de sistemas más grande que el esquema descrito en esta sección. (Sibaja, 2013).

2.3.3. ESQUEMA DEL MODELO

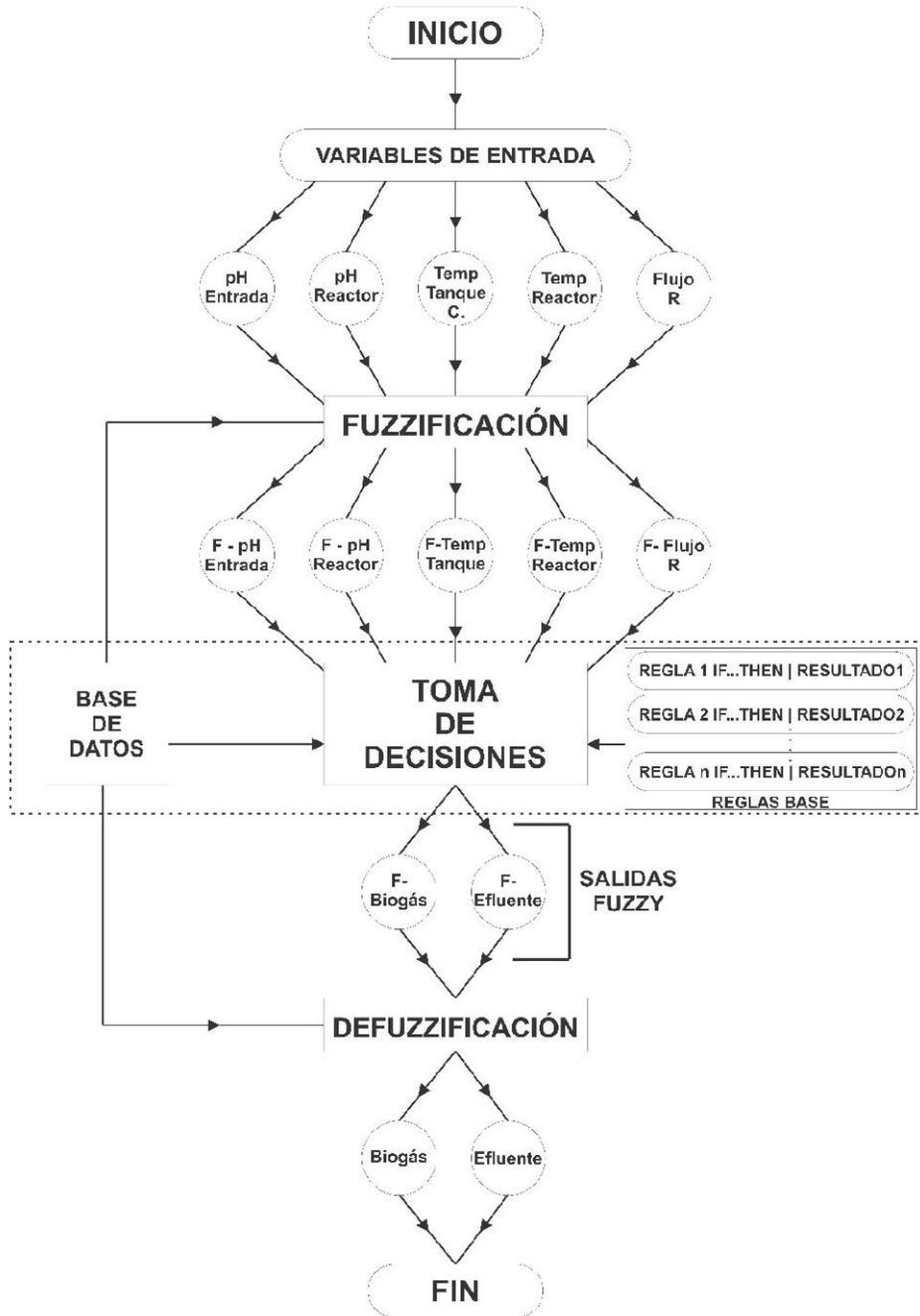


Ilustración 20. Diagrama Esquemático MIMO de la Lógica Difusa Aplicada.

2.3.4. MODELO MATEMATICO DEL REACTOR

Estableciendo el modelo matemático mediante observadores dedicados con lógica difusa; utilizando lógica difusa podemos estimar el valor de cada una de las variables de estado, teniendo en cuenta para cada componente  $i$  del estado del vector, el conjunto de puntos:

$$\left( P_{k+p}^{(s_k, \dots, s_{k+p})}, \tilde{X}_{ik+p}^{(s_k, \dots, s_{k+p})} \right)$$

Una función perteneciente se puede tomar como una escala de la interpolación polinómica  $a_{j_{k+p}}(x)$  de este conjunto de puntos

Cuando el estado actual del componente es tomado como la variable independiente (Véase la figura 1). Sólo la parte positiva de la Interpolación polinómica es retenida, esto asegura que su base que es el conjunto  $\tilde{B}_{j_{k+p}}^0$  convexo más pequeño que cubre a  $B_{j_{k+p}}^0 = \{x a_{j_{k+p}}(x) > 0\}$ , es finita:

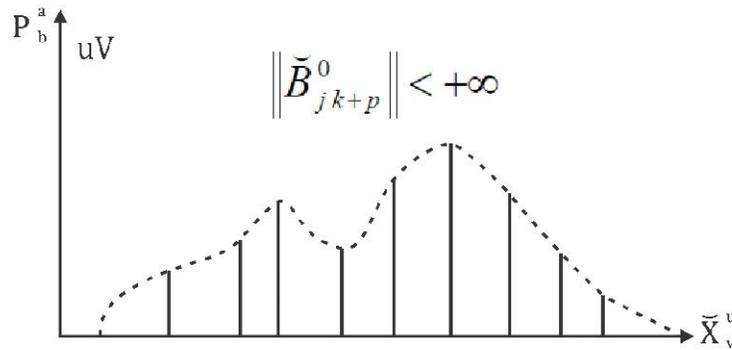


Ilustración 21. Función perteneciente generada.

Entonces la función perteneciente para  $x_j(k + p)$  está dada por:

$$\mu_{j k+p}(x) = \frac{a_{j k+p}(x)}{\max_{\gamma \in R} \{a_{j k+p}(y)\}} \text{ para } j = 1 \text{ a } r$$

También es posible considerar una distribución gaussiana para  $\tilde{x}_{j k+p}$  dada por:

$$\tilde{f}_{j k+p}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tilde{V}_{j k+p}}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{X}_{j k+p})^2}{2\tilde{V}_{j k+p}}\right)$$

Ahora podemos medir la diferencia entre las medidas gaussianas y las distribuciones estimadas para obtener una curva de diagnóstico de fallas:

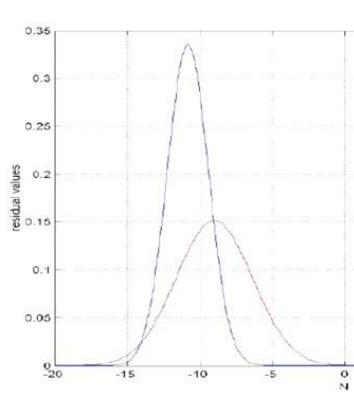


Ilustración 22. Comparación de medición Gaussiana y distribuciones estimadas.

Con lo que obtendríamos una discretización de error como la siguiente para un ejemplo práctico:

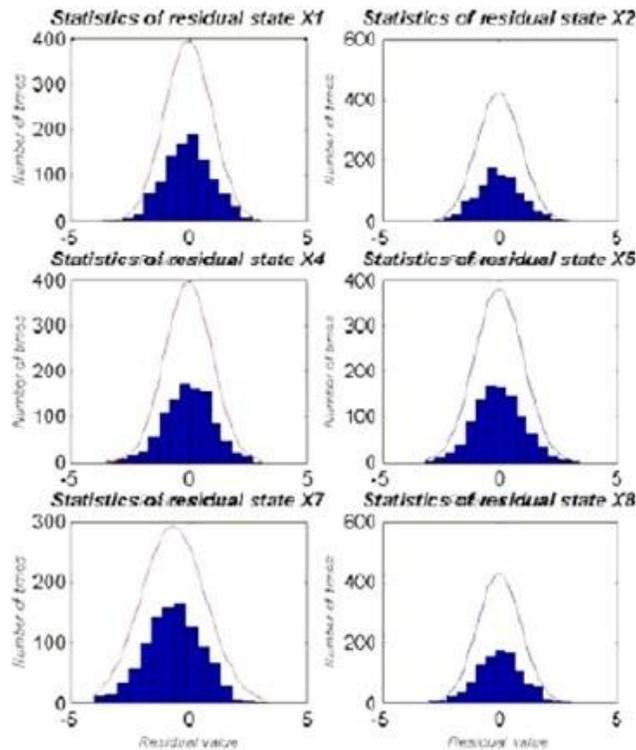


Ilustración 23. Histogramas de discretización de errores.

Finalmente aplicando dos veces la relación obtenemos en tiempo actual una distribución de estado de  $256 \times 2 = 512$  muestras. Estas 512 muestras son generadas en línea en cada instante discreto y permiten estimar las distribuciones probabilísticas para que una prueba de falla pueda realizarse por comparación con la medición directa de:

$$X_4(= p), X_5(= q) \text{ y } X_6(= r)$$

## CAPÍTULO III. EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

## 3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

## 3.1.2. Caracterización y acondicionamiento del sustrato.

Caracterización del sustrato:

Se realizó la caracterización de lactosuero que se empleó para preparar la dilución que serviría como sustrato para alimentar el reactor. El promedio de los resultados de la caracterización de 10 lotes se muestra en la Tabla 5. Caracterización del lactosuero.

pH	3.51 (Lactosuero ácido)
DQO total	82,181 mg/L
DQO soluble	70,568 mg/L
Agua	94.1 %
ST	58.72 g/L
SVT	53.28 g/L
SFT	5.44 g/L
% SVT	90.73 %
Grasas y aceites	5.51 g/L
% Grasas y aceites	0.55 %
Carbohidratos	39 g/L
% Carbohidratos	3.9%

Tabla 5. Caracterización del lactosuero.

En la Tabla 6. Comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero. Se realiza la comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero presentados en este proyecto y los obtenidos en trabajos anteriores.

	pH	DQO (mg/L)	Agua (%)	ST (%)	SVT (%)	SFT (%)	Grasas y aceites (%)	Carbohidratos (%)
Lactosuero bruto	3.51	82,181	94.1	5.94	5.39	0.55	0.55	3.9
Valencia-Denicia y Ramírez-Castillo, 2009	N. R.	N. R.	93.1	6.9	6.3	0.6	0.3	4.9
Teniza-García, 2008	6.33	N. R.	92.47	7.53	6.87	0.66	0.37	5.20
Gelegenis <i>et al.</i> , 2007	3.5	74,900	92.2	7.8	4.8	3	0.7	3.6
Cabrera <i>et al.</i> , 2013	N. R.	N. R.	92.94	7.06	5	2.06	N. R.	N. R.
Comino <i>et al.</i> , 2012	4.12	74,400	94.92	5.08	4.52	0.55	N. R.	N. R.
Hernández-Herrera, 2005	5	N. R.	93- 95	5-7	N. R.	0.5- 1.2	0.1-0.5	3.8-5.2

Tabla 6. Comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero.

Como se puede apreciar en la Tabla 6. Comparación de los resultados de la caracterización del lactosuero. Los resultados presentados en este trabajo muestran una mayor semejanza a los reportados por Comino et al. (2012) y la mayoría se encuentran dentro de los intervalos de composición teórica descritos por Hernández-Herrera (2005) para el lactosuero de tipo ácido, ya que el porcentaje de grasas y aceites de la muestra analizada está ligeramente fuera del intervalo superior, además es el segundo valor más alto reportado para ese parámetro por debajo del obtenido por Gelegenis et al. (2007). Lo anterior indica que el lactosuero bruto empleado para el desarrollo de este proyecto no presentó alguna anomalía significativa en sus composición.

### 3.1.3. Especialización del consorcio anaerobio para la producción de biohidrógeno.

Se tomaron en consideración los parámetros del artículo “Biohydrogen production and wastewater treatment from organic wastewater by anaerobic fermentation with UASB” el cual reporta una alta eficiencia en la producción de biohidrógeno con los siguientes parámetros: Temperatura: 35°C, volumen del reactor 15.7 L, alimentación continua a un ratio de 200:5:1 y un tiempo de residencia hidráulica de 8 h, la DQO se mantuvo entre 4000 y 6000 mgL<sup>-1</sup>.

Se encontró que un PH en el rango de 4 a 4.5 mejoro la producción de hidrógeno siendo los principales productos hidrógeno y CO<sub>2</sub>; después de 13 días la reacción paso a un estado estable cuando la máxima producción de hidrogeno y la máxima concentración del mismo se mantuvieron; sin embargo al intentar utilizar el reactor para el tratamiento de aguas residuales retirando el fertilizante sintético a la alimentación la remoción de DQO fue de 20% lo que implicó que no fue posible la producción de biohidrógeno y el tratamiento de aguas residuales simultáneamente. (L. Wang, 2010).

Considerando la conclusión del artículo anterior se realizó la experimentación de la influencia de la adición de nutrientes durante el arranque y la estabilización de un reactor anaerobio de biopelícula con un sustrato comercial estandarizado por medio de la observación de la formación de biomasa y la producción de biogás en un segundo reactor que consistió en un cuerpo cilíndrico de acrílico, dos piezas mecanizadas en Nylamid para cerrar los extremos superior e inferior y para proporcionar conexiones para la entrada, recirculación y el flujo de efluente así como para la recolección de biogás .

El reactor tiene un volumen total de 1,82 L y un volumen de trabajo de 1,67 L. para alimentar el líquido de recirculación se usaron bombas peristálticas (Masterflex).

La velocidad de fluidización a aplicar fue de 2,3 m / h y se colocó un difusor de líquido en la parte superior de la columna.

La temperatura del reactor se mantuvo a 35 ° C en una habitación con control de la temperatura y el pH del afluente se reguló en 7 por adición de 3 M de NaOH.

El reactor fue llenado con soporte Extendsphere hasta 30 % del volumen de trabajo. Un 10% de dicho soporte fue utilizado como fuente de inóculo, basado en una experiencia anterior. (Alvarado Lassman, 2010). El soporte colonizado se tomó de un reactor anaerobio de la planta piloto alimentado con la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales.

El sustrato utilizado en este estudio fue jugo de manzana comercial diluido que es un sustrato rico en carbohidratos con un contenido de materia orgánica medida como DQO de 110 g DQO / L. La ausencia de sólidos en el zumo de manzana permitió la formación de biopelícula homogénea.

El reactor se alimentó en modo continuo con un TRH de 24 h.

El volumen suministrado fue de 2200 ml / día, obtenido a través de la dilución de jugo de manzana con agua destilada con el fin de obtener la carga orgánica requerida de cambio. Inicialmente, el pH fue ajustado con bicarbonato de sodio en las etapas en que no se adicionaron los nutrientes y elementos de trazabilidad.

Los parámetros monitoreados fueron:

Demanda química de oxígeno soluble, sólidos totales, volumen total de sólidos totales, PH, volumen de gas producido y composición del biogás.

El método para la determinación de los parámetros utilizado fue el estándar APHA 1995.

La composición del biogás se determinó con el cromatógrafo marca Buck Scientific modelo 310 compuesto por una columna empacada All Tech CRT I, de 6 pulgadas de longitud y ¼ de pulgada de diámetro, la cual detecta CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.

La dosis de inyección y las condiciones de operación son las siguientes:

- Inyección directa de 2 mL
- Gas de acarreo: Helio (70 psi)
- Temperatura de la columna: 36°C
- Temperatura del detector: 121°C.

Los resultados se expresan en porcentaje.

Para calcular el rendimiento de metano se tomaron en cuenta los L de metano producidos y los gramos de DQO total o soluble removida por día, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Y_{Real} = \frac{V_{CH_4}}{DQO_{Removido}}$$

Donde:

$Y_{Real}$  = El rendimiento de metano alcanzado por la degradación, en L de  $CH_4 g^{-1} DQO_{Removido}$ .

$V_{CH_4}$  = El volumen de metano producido, en L de  $CH_4 d^{-1}$ .

$DQO_{Removido}$  = La cantidad de DQO removida, en  $g d^{-1}$ .

Para conocer si el rendimiento de metano es el adecuado, se compara la  $Y_{Real}$  con la  $Y_{Teórico}$ . Para conocer la  $Y_{Teórico}$  se determinó mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones.

$$DQO_{Entrante} = (V_{Alimentado})(DQO_t)$$

Donde:

$DQO_{Entrante}$  = es la cantidad de DQO que entra al sistema, en  $d.d^{-1}$

$V_{Alimentado}$  = es el volumen alimentado al reactor en  $L.d^{-1}$

$DQO_t$  = es la cantidad de DQO total (o soluble) que posee el influente, en  $g DQO.L^{-1}$

Cosme-Reyes (2005), cita que por cada gramo de DQO entrante a una temperatura de trabajo de 37°C se producen 394mL de metano, por lo tanto, dependiendo de la cantidad de DQO entrante se calculó el volumen teórico de metano que se produciría:

$$V_{TeóricoCH_4} = \frac{(DQO_{Entrante})(0.394L)}{1gDQO}$$

$$Y_{Teórica} = \frac{DQO_{Entrante}}{V_{TeóricoCH_4}}$$

Cuando los valores de la YReal y la YTeórico son muy próximos, se comprende que hay una estabilidad del proceso de digestión ya que se está produciendo la cantidad de metano teórico que proporciona la DQO entrante.

Estos cálculos son indistintos para aplicarse a rendimiento real total o real soluble; este depende si se evalúa la DQO total o soluble.

#### 3.1.4. pH de alimentación y salida del reactor

En la Ilustración 24. Gráfica de la variación del pH dentro del tanque de alimentación. se aprecia que el pH de entrada descendía dentro del tanque de alimentación, por lo que fue necesario ajustarlo entre valores de 7.3 – 7.5 para que transcurridas 24 h el valor de pH se encontrara generalmente entre 6.5 – 7. Con esto se logró mantener estabilidad en el pH del proceso a lo largo del proyecto.

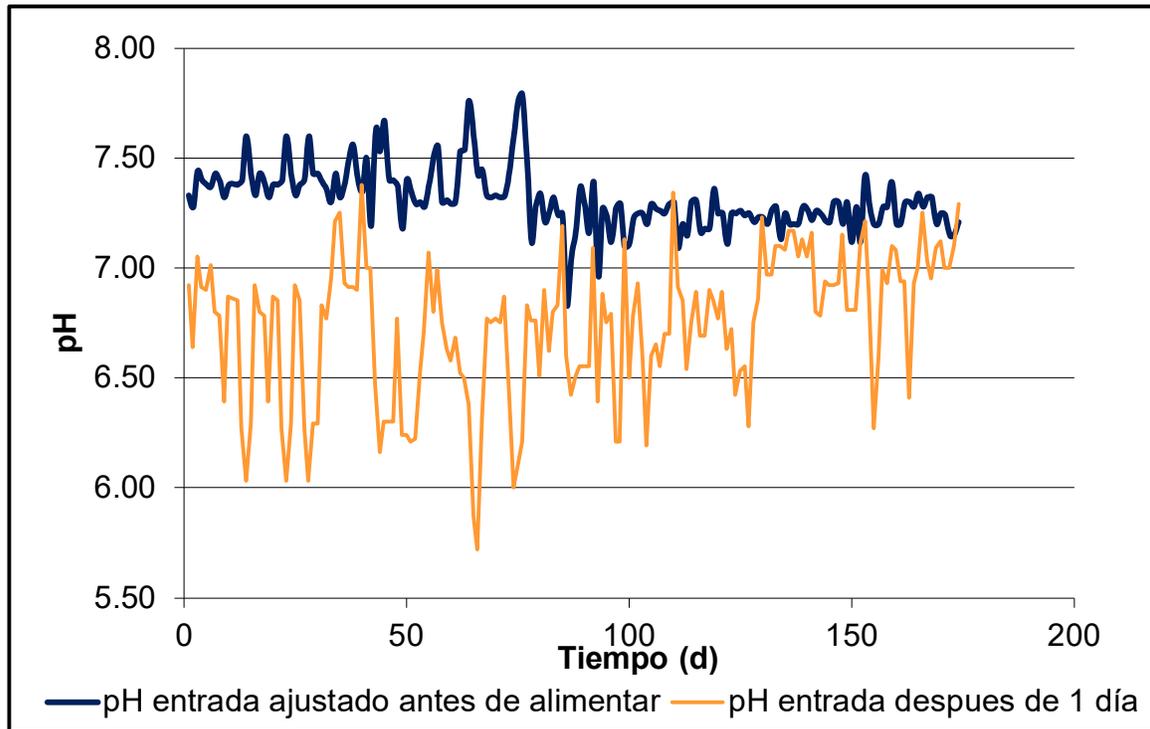


Ilustración 24. Gráfica de la variación del pH dentro del tanque de alimentación.

Como se puede apreciar en la Ilustración 25. Gráfica de comparación de pH de entrada y salida del reactor anaerobio. El pH de entrada a lo largo del proyecto se mantuvo constante y cercano a la neutralidad, mientras que los valores de pH en la salida eran inferiores a los de la alimentación durante los primeros 30 días, posteriormente el pH comenzó a estabilizarse hasta alcanzar valores similares o ligeramente superiores a los de la alimentación, situándose generalmente entre 7.5 – 8.0.

Lo anterior es de gran importancia debido a que diversos trabajos han reportado dificultades en el tratamiento del lactosuero ocasionadas por su rápida acidificación.

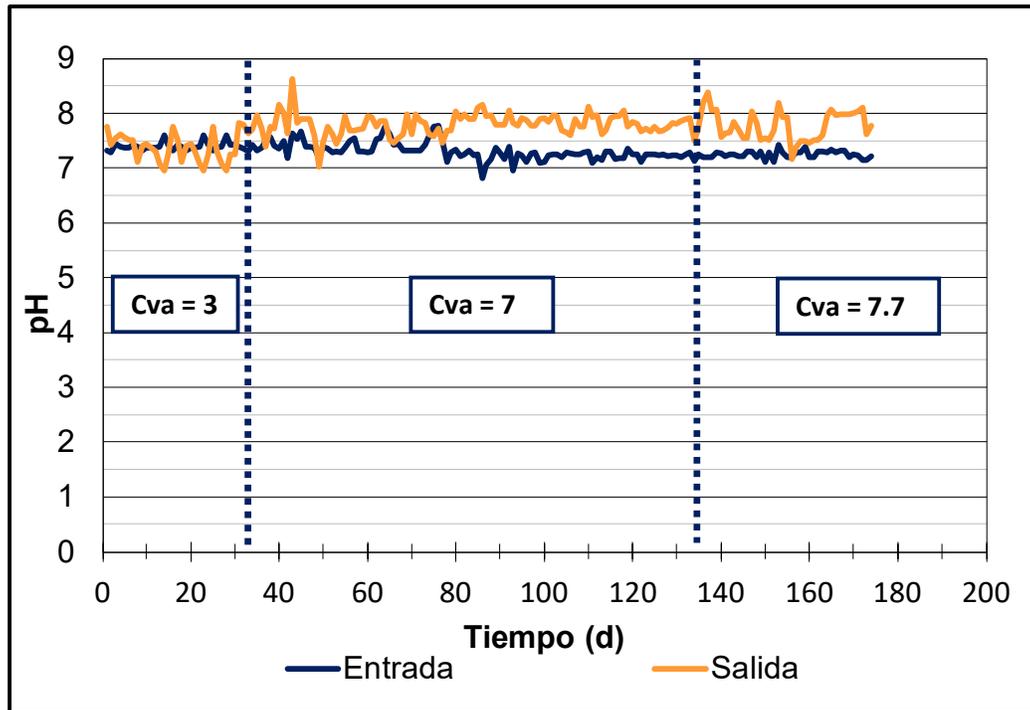


Ilustración 25. Gráfica de comparación de pH de entrada y salida del reactor anaerobio

### 3.1.5. Remoción de DQO y SVT.

La Ilustración 26. Gráfica de remoción de DQO en un reactor. Muestra que durante el proceso de arranque y estabilización del reactor se logró obtener remociones alrededor del 60% manteniendo una Cva de 3 gDQOs/L·d, posteriormente al incrementar la Cva a 7 gDQOs/L·d la remoción disminuyó a 40% desde el día 31 hasta el 40, volviendo a recuperarse a partir del día 41 hasta alcanzar valores de entre 50 – 70% de forma constante.

Después de haber incrementado la Cva a 7.7 gDQOs/L·d la remoción se mantuvo alrededor de 60%. El día 145 debido a un problema de operación parte del soporte situado en la zona inferior del reactor fue expulsado, lo que ocasionó que la remoción disminuyera hasta valores entre 30 - 35%, sin embargo, a partir del día 155 la remoción incrementó hasta alcanzar valores entre 50 – 60%.

La remoción de la DQO alcanzó valores de hasta 70% con una Cva de 7 gDQO/L·d y un TRH de 0.8 días, mientras que Malaspina et al. (1995) emplearon un reactor anaerobio de lecho fluidizado de flujo descendente-ascendente para el tratamiento de lactosuero obteniendo una remoción de la DQO del 98% con una Cva de alrededor de 10 gDQOs/L·d y un TRH de 1 día, por otro lado Kavacik y Topaloglu (2010) realizaron una recopilación bibliográfica de algunos reactores empleados para el tratamiento de lactosuero entre los que se incluye el reactor de lecho fluidizado con una Cva de 7.7 gDQOs/L·d y una remoción de DQO del 90% y un TRH de 0.4 días.

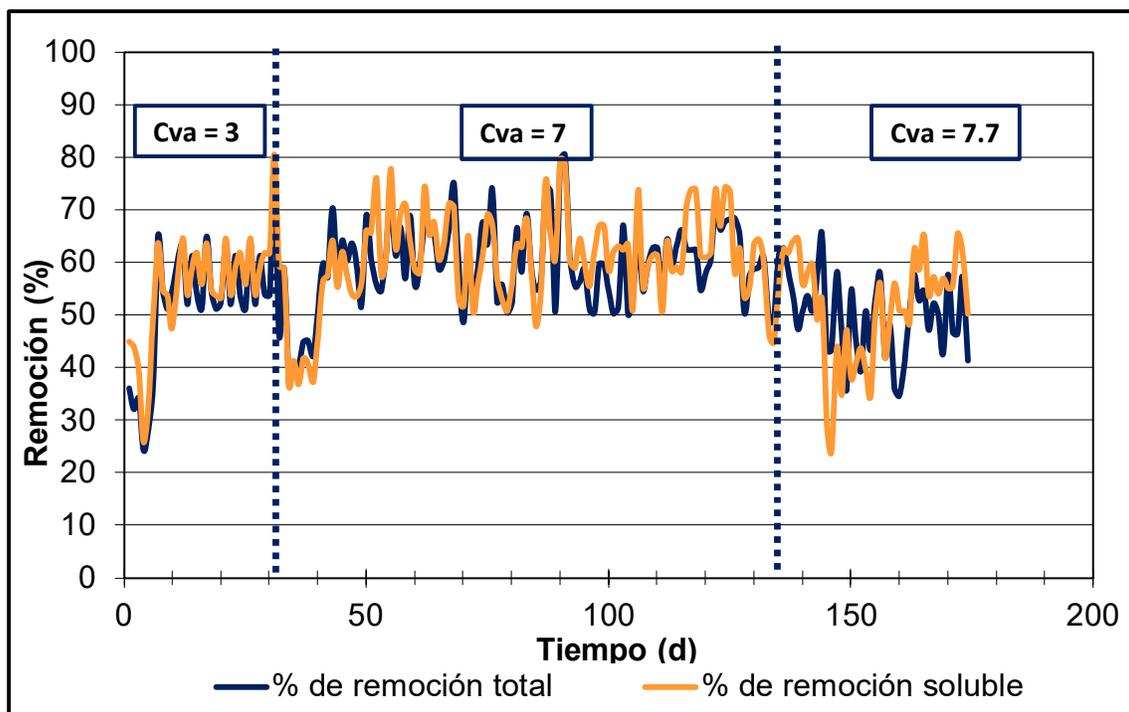


Ilustración 26. Gráfica de remoción de DQO en un reactor.

## 3.1.6. Remoción de SVT en el reactor anaerobio.

Durante el periodo de arranque ingresaban al reactor alrededor de 1,500 mg/L de SVT con remociones de 50%, al incrementar la Cva a 7 gDQOs/L·d la cantidad de SVT en la alimentación aumentó a 3,400 mg/L aproximadamente y la remoción disminuyó a valores de 40%, a través del tiempo el proceso alcanzó una remoción de hasta 70% con una entrada de SVT de 5,000 mg/L. La remoción se estabilizó en 60% después de incrementar a 7.7 gDQOs/L·d la Cva, obteniendo concentraciones de SVT alrededor de 5,600 mg/L en la alimentación y de 2,500 mg/L en la salida del reactor como se puede apreciar en la Ilustración 27. Gráfica de remoción de SVT en un reactor.

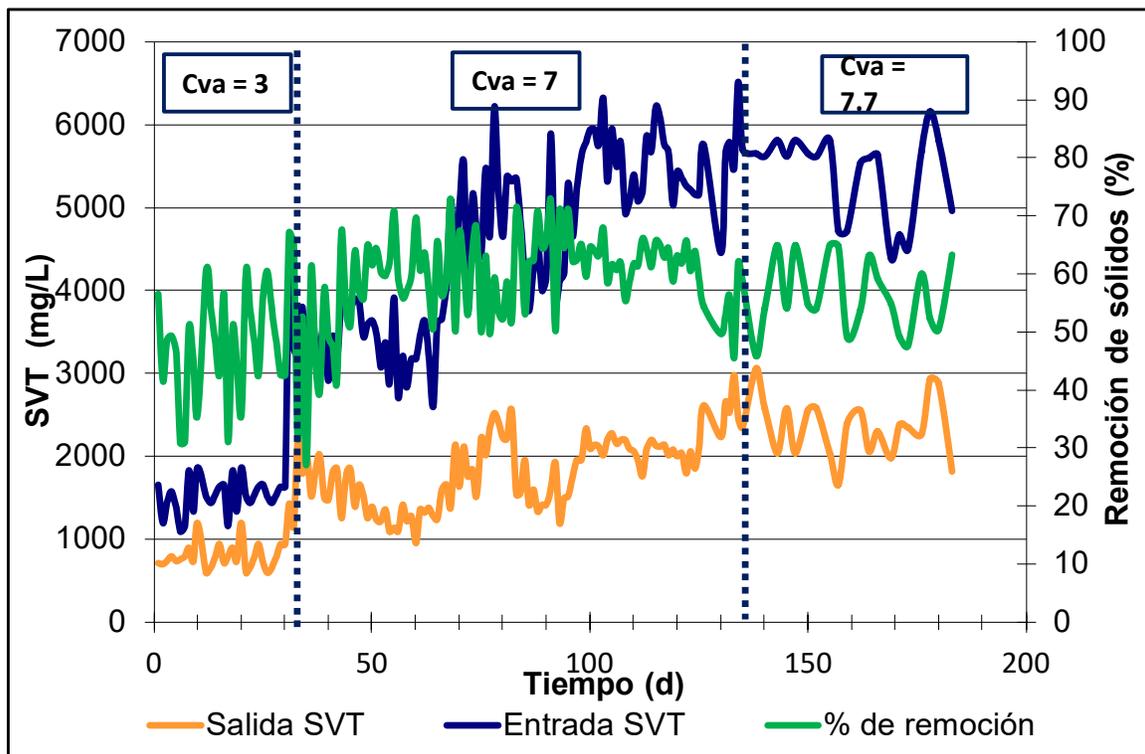


Ilustración 27. Gráfica de remoción de SVT en un reactor.

## 3.1.7. Producción y composición en modo metanogénico

## Producción

La Ilustración 28. Gráfica de producción de biogás. Muestra que la producción de biogás se comenzó a monitorear a partir del día 68 de operación obteniendo valores por encima de 100 L/d, también se aprecia en la gráfica que dichos valores se encuentran cercanos al estimado teóricamente. En el día 145 la producción de biogás se vio afectada debido a los problemas de operación mencionados anteriormente.

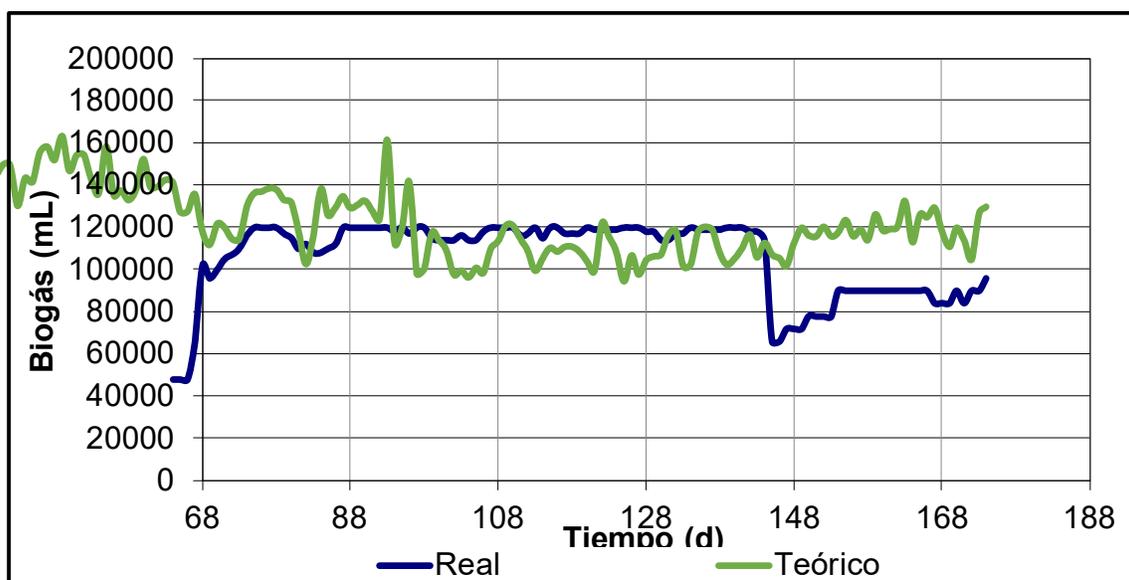


Ilustración 28. Gráfica de producción de biogás.

La producción de biogás entre 100 - 120 L/d representa una producción diaria de biogás por cada litro del reactor (L/LR·d) de aproximadamente 3.22 - 3.8 L/LR·d. Gelegenis et al. (2007) emplearon un CSTR alimentado en modo semi-continuo para la co-digestión de pollinaza diluida y lactosuero obteniendo para un TRH de 18 días, una Cva de 4.9 gDQOs/LR·d y una producción de biogás de 2.2 L/LR·d, mientras que Kavacik y Topaloglu (2010) emplearon un reactor anaerobio cilíndrico metálico para la co-digestión de lactosuero y excretas bovinas manteniendo como parámetro principal una concentración de 8% ST, dicho estudio presentó una producción de biogás de 1.510 L/LR·d con un TRH de 5 días y una temperatura de 34°C.

Como se puede observar la producción de biogás obtenida empleando el reactor anaerobio híbrido presentado en este proyecto, así como el TRH del mismo fueron mejores que los reportados en trabajos anteriores.

#### Composición

La Ilustración 29. Gráfica de composición de biogás. Muestra los resultados obtenidos durante el análisis de biogás realizado por cromatografía de gases, en dicho cromatograma se puede apreciar que se llegó a obtener valores de hasta 60% de CH<sub>4</sub> y 35% de CO<sub>2</sub>, sin embargo, después del día 141 los valores de biogás se vieron afectados debido a problemas de operación estableciéndose en valores de 50% de CH<sub>4</sub> y 50% de CO<sub>2</sub>.

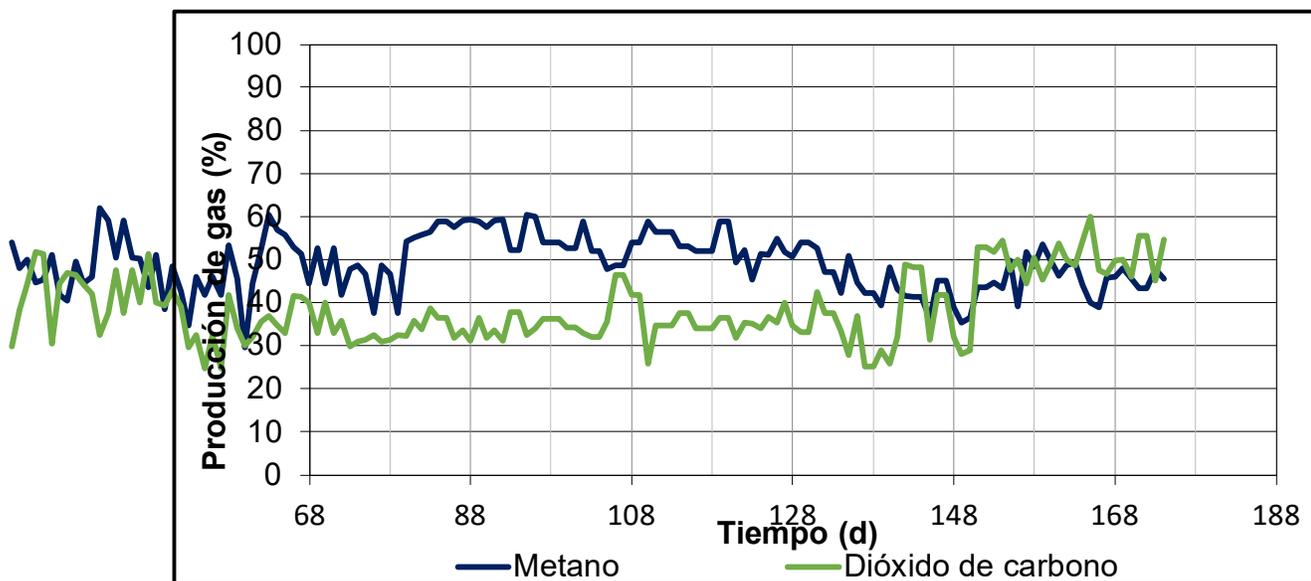


Ilustración 29. Gráfica de composición de biogás.

3.1.8. Producción y composición en modo biohidrógeno

Realización de cinéticas en reactores de mezcla completa en batch para evaluar el potencial de metanización del suero de queso y experimentación del tratamiento térmico para desactivación de los metanógenos Hidrogenotróficos.

Los resultados obtenidos para el sustrato (suero de queso) sin algún tratamiento especial ni control de pH y con inóculo extruido del reactor EGSB de la planta piloto.

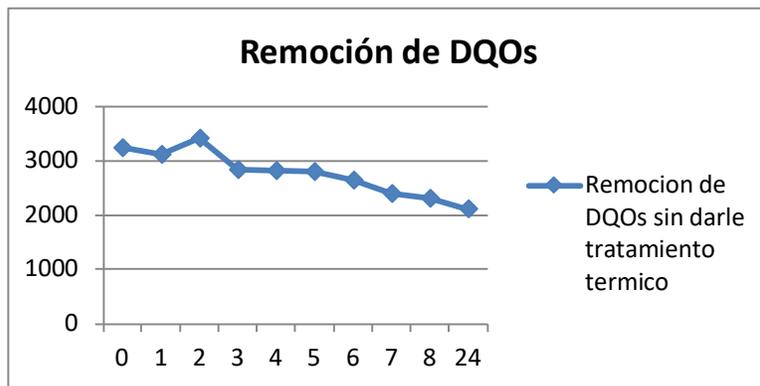


Ilustración 30. Remoción de DQO.

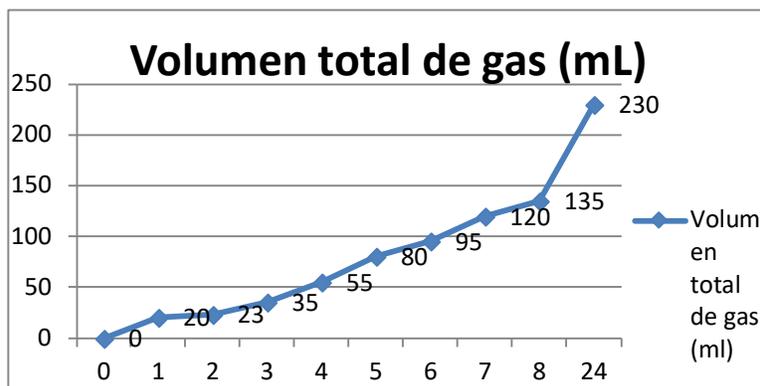


Ilustración 31. Producción de gas en 24 horas.

Debido a que el suero de queso es por características propias muy ácido se debe de acondicionar el medio para un mejor rendimiento. Por lo cual se estabilizó el pH a 7 neutro-básico.

La remoción de materia orgánica fue mejorando debido al control de pH, un valor alto afecta significativamente la remoción debido a la alta proliferación de las bacterias acidogénicas. Se entiende que el proceso se estancaría en esa etapa (ácido génesis). Controlando este parámetro el proceso de digestión será óptimo y se obtendrán altos porcentajes de remoción. El proceso de digestión anaerobia para este caso se puede mejorar adicionando una solución buffer la cual tenga una aportación extra de nutrientes para favorecer la actividad de los microorganismos; la solución buffer (solución mineral-  $MgSO_4$ ,  $NaHCO_3$ ,  $NH_4Cl$ ,  $K_2HPO_4$ ,  $KHPO_4$ ) además de proveer nutrientes favorecerá a mantener el PH estabilizado y así evitar la acidificación del medio.

Después de haber montado una serie de cinéticas, en las cuales se observó que la producción de gas pudo haber sido afectada por variación en el nivel de PH. La obtención de gas fue mejorando significativamente en un 34 % Ilustración 32. Volumen total de gas producido en 24 h. con pH controlado.

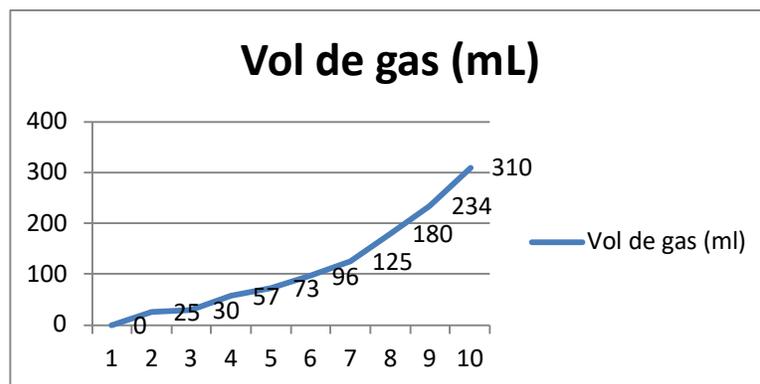


Ilustración 32. Volumen total de gas producido en 24 h. con pH controlado.

Se llevó a cabo el pretratamiento térmico por medio de baño maría a los reactores de las cinéticas con una temperatura de 100°C durante 30 minutos y se observó una disminución en la producción de biogás

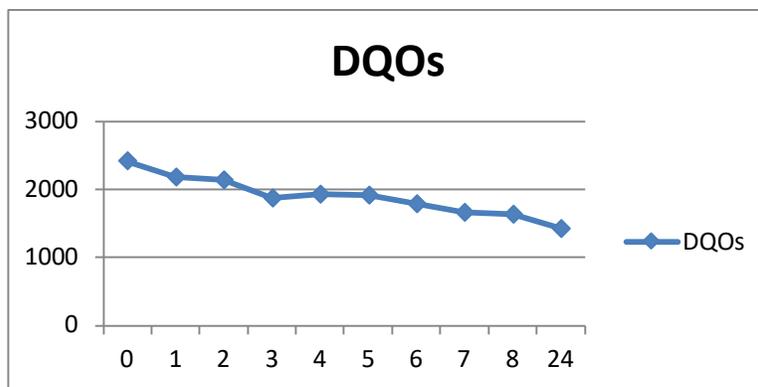


Ilustración 33. Remoción de DQOs después del tratamiento térmico.

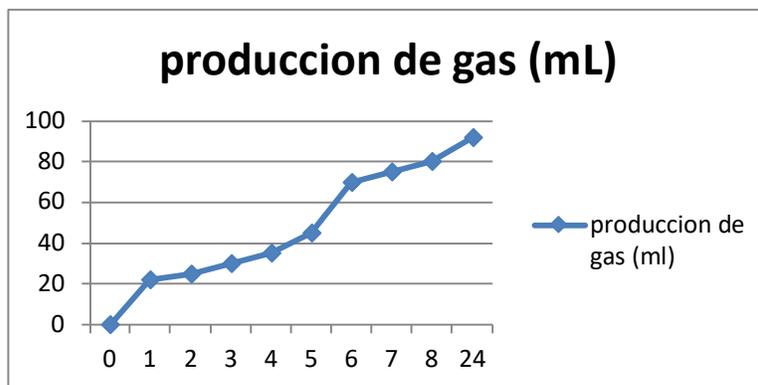


Ilustración 34. Producción de biogás en 24H después del tratamiento térmico.

### 3.2 RESULTADOS DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y AISLAMIENTO DE FALLAS

#### 3.2.1. Sistema de pH.

El sistema de pH se empezó a utilizar en línea, cuando el reactor presentaba una alcalinidad muy baja pues el valor de pH se encontraba fuera de los parámetros en los que trabaja el sistema de medición problema que se presentó pues el reactor apenas había sido puesto en marcha. Al mismo tiempo que el sistema realizaba una medición en línea, el pH del biorreactor fue medido de manera manual por el personal del laboratorio con un pHmetro Orion 250<sup>a</sup> el cual requería ser calibrado en cada medición.

En cuanto al control automático solo se calibro una vez cada tercer día. En la Ilustración 35. phmetro Orion 250<sup>a</sup> Vs Titulador Automático. .Se muestra una gráfica de ambas mediciones.

Como se puede apreciar la medición automática es muy similar a la realizada de manera manual. El máximo error fue 0.5 de pH el cual es mínimo .Lo anterior nos permite validar que el sistema entrega mediciones confiables.

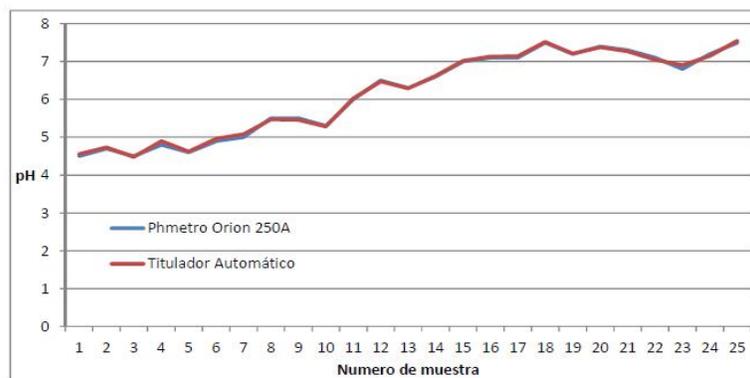


Ilustración 35. phmetro Orion 250<sup>a</sup> Vs Titulador Automático.

### 3.2.2. Sistema de temperatura.

El sistema de temperatura se utilizó con tres sensores; uno al interior del reactor, el segundo al tanque de alimentación y el tercero al cubículo del reactor. Debido a que se climatizó todo el cubículo del reactor los cambios en la temperatura fueron mínimos, ocasionados solo por la diferencia de temperatura del tanque de alimentación al agregar más sustrato.

### 3.2.3. Diagnóstico de fallas

Con el fin de probar el rendimiento del observador anterior, el modelo de proceso y el observador fueron simulados usando los parámetros dados en la Tabla 7. Rendimientos y parámetros cinéticos del modelo de biorreactor. Y usando:

$$D(t), X(t), S(t), S_{1in}(t), S_{2in}(t) \text{ and } S_{3in}(t) \text{ 0.1 to 0.2 h}^{-1}.$$

La Ilustración 37. Medición de la biomasa  $X(t)$  y del ácido acético  $S_3(t)$ . Muestra los resultados medidos y  $(t)$  del proceso: la biomasa

$$y_1(t) = X(t)$$

Y la concentración de ácido acético

$$y_2(t) = S_3(t).$$

Las entradas  $S_{1in}(t), S_{2in}(t) \text{ and } S_{3in}(t)$ .

Se consideraron constantes con un valor de 1.0 g/L, 0.03 g/L y 3.0 g/L respectivamente.

Parámetros	Valores	Unidades
$\mu_{1max}$	0.18	$h^{-1}$
$\mu_{2max}$	0.12	$h^{-1}$
$k_1$	0.05	$gN\ddot{U}_3L^{-1}$
$k_2$	0.07	$gN\ddot{U}_2L^{-1}$
$k_{3_1}$	0.05	$gS_3L^{-1}$
$k_{3_2}$	0.047	$gS_3L^{-1}$
$k_{11}$	0.96	$gN\ddot{U}_3L^{-1}$
$k_{12}$	0.05	$gN\ddot{U}_2L^{-1}$
$y_{11}$	4.773	
$y_{12}$	3.343	
$y_{22}$	1.214	
$y_{3_1}$	1.1	
$y_{3_2}$	1.6	
$k_d$	0.0	
$k_{m1}$	0.0	
$k_{m2}$	0.0	
$k_{m3}$	0.0	

Tabla 7. Rendimientos y parámetros cinéticos del modelo de biorreactor.

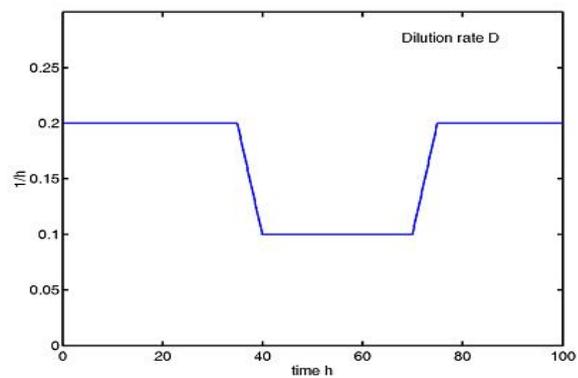


Ilustración 36. Taza de dilución.

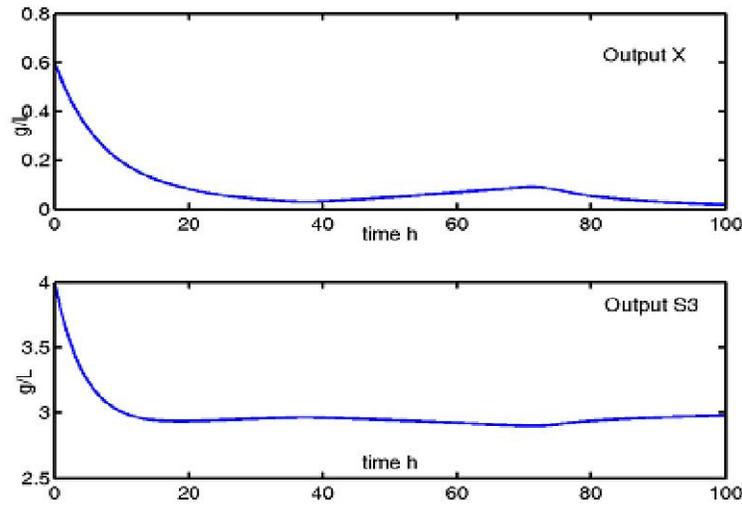


Ilustración 37. Medición de la biomasa  $X(t)$  y del ácido acético  $S3(t)$ .

La Ilustración 38. Estimación de la velocidad de reacción  $\alpha_1$ . e Ilustración 39. Estimación de la velocidad de reacción  $\alpha_2$ . Muestran los resultados de la estimación de las velocidades de reacción  $01(t)$  and  $02(t)$ . Las condiciones iniciales fueron  $01(0) = 0.02$ ,  $02(0) = 2.5 \times 10^{-3}$ ,  $01(0) = 0.1$  y  $02(0) = 0.2$ .

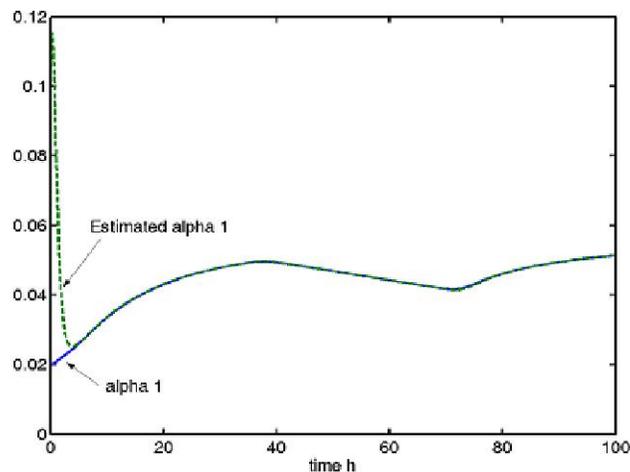


Ilustración 38. Estimación de la velocidad de reacción  $\alpha_1$ .

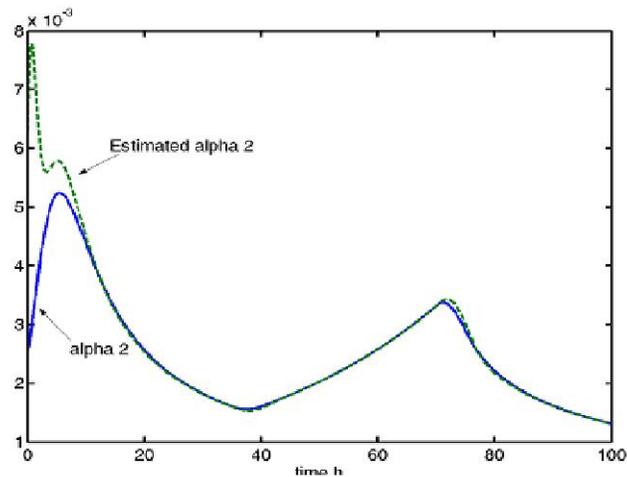


Ilustración 39. Estimación de la velocidad de reacción  $\alpha 2$ .

Las Ilustración 40. Concentración de nitratos  $S_1$  y su estimación. e Ilustración 41. Concentración de nitrito  $S_2$  y su estimación. Muestran los resultados de la estimación de los estados no medidos: la concentración de nitrato  $S_{1in}(t)$ . Y la concentración de nitrito  $S_{2in}(t)$ . En este caso, las condiciones iniciales fueron  $S_1(0) = 0.5, S_2(0) = 1, \hat{S}_1(0) = 2, \text{ and } \hat{S}_2(0) = 1.2$ .

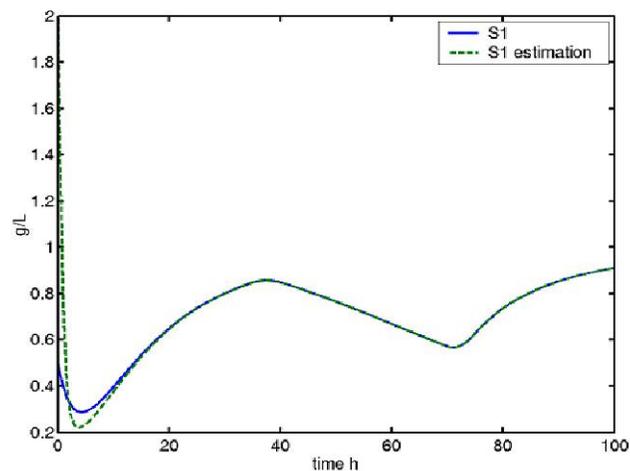


Ilustración 40. Concentración de nitratos  $S_1$  y su estimación.

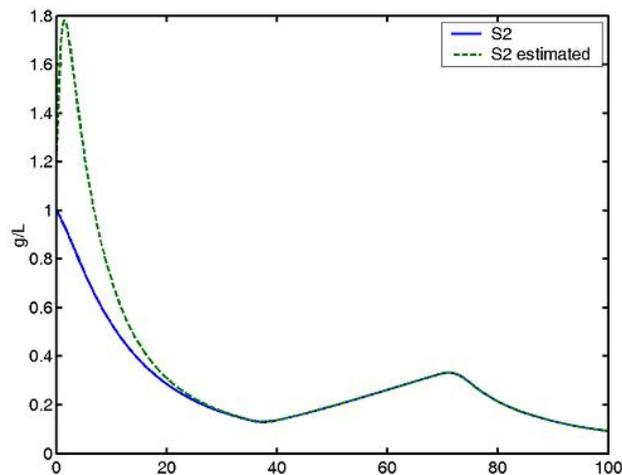


Ilustración 41. Concentración de nitrito S2 y su estimación.

En todos los casos, el observador obtuvo buenos resultados con un valor de ganancia de  $\theta = 1.5$ .

El tiempo de convergencia del observador fue alrededor de las 20h. Esto es aceptable para el proceso en cuestión.

Es importante señalar que el observador no tiene conocimiento del modelo simulado de  $\alpha_1(t)$  and  $\alpha_2(t)$ .

Los valores mayores de  $\theta$  causan una convergencia más rápida de los valores estimados, pero tales valores deben evitarse porque el observador se vuelve sensible al ruido.

### 3.3. PROBLEMAS DE OPERACIÓN

Eventualmente se presentó un problema en el reactor debido al cambio de ángulo de incidencia de la luz solar alcanzando los rayos al reactor promoviendo la formación de algas en la pared interior del reactor; ya que se trabaja con fermentación oscura fue necesario implementar una cubierta del reactor que impidiera el paso de la luz y posteriormente se cubrieron las ventanas para evitar el paso de la luz al interior del laboratorio; lamentablemente el reactor se cambió a modo metanogénico y se tuvo que vaciar el reactor y llevar a cabo la limpieza total del mismo para eliminar en su totalidad el moho siendo necesario nuevamente todo el proceso de arranque y estabilización. Sin embargo, el tiempo que operó fue suficiente para alcanzar la alimentación en modo continuo con producción de hidrógeno y tomar datos suficientes para el modelo de lógica difusa.

En cuanto al control del pH en el interior del reactor se presentaron variaciones que no fueron corregidas por el pH del sustrato a la entrada y no se contempló en el Sistema un control para pH del interior del reactor lo que ocasiono el cambio en el consorcio bacteriano y se redujo la producción de hidrógeno y se empezó a producir nuevamente metano.

## CONCLUSIONES Y ARTÍCULOS GENERADOS

Las investigaciones realizadas a lo largo de este proyecto permitieron recopilar información mediante la búsqueda de artículos científicos y fundamentar el trabajo de investigación desde el inicio de la propuesta presente en la hipótesis hasta las conclusiones de este trabajo, cumpliendo con los términos establecidos.

Para realizar el presente trabajo se trabajó conforme a las diferentes fases de la investigación delimitando los objetivos propuestos al inicio del trabajo.

Dentro del sistema de trabajo, el sistema en el que se trabajó la generación de biogás cumplió con todas las expectativas esperadas y señaladas por la recopilación en el estado del arte, se obtuvieron resultados de biogás con una alta concentración de biohidrógeno cumpliendo así los requisitos que permiten su utilización como combustible de origen natural siendo una alternativa de energía renovable reemplazando a los combustibles fósiles.

La implementación del sistema de monitoreo al reactor cumplió con todas las funciones necesarias facilitando el trabajo de los operadores y permitiendo un sistema con mayor capacidad de manejo gracias a su control a distancia, además, fue posible realizar la recopilación de datos que permitieron validar mediante las investigaciones previas con los resultados obtenidos, el ambiente gráfico utilizado cumplió con los estándares establecidos para mejorar el tiempo de control en el sistema.

La aplicación de observadores dentro del sistema de lógica difusa para la implementación del sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas cumplieron con el objetivo de estimar las variables a comparar con los sensores durante la evolución del proceso del reactor anaerobio, también gracias al sistema propuesto fue posible reducir los problemas para monitorizar el sistema

El sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas diseñado en la presente investigación cumple con los requisitos y características obtenidas durante la evaluación de los datos recopilados en la presente investigación. El sistema fue capaz de identificar fallas dentro del sistema permitiendo al operador realizar correcciones sin la necesidad de hacer una inspección manual. Se comprobó el sistema de alertas de la interfaz gráfica en conjunto con el sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas proporcionando al operador las herramientas necesarias para modificar el sistema previendo fallas letales del sistema.

Todos los puntos antes mencionados concluyeron en gran mejora en el sistema en la producción de biohidrógeno reduciendo considerablemente los tiempos de respuesta en la relación hombre – maquina concluyendo exitosamente el trabajo de tesis.

El artículo generados gracias a la presente investigación de tesis fue:

**Artículo:** “DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA DE CONTROL Y MONITOREO A DISTANCIA PARA UN BIODIGESTOR ANAEROBIO”.

Autores: A. Alvarado Elías, A. Martínez Sibaja, J.P. Rodríguez Jarquín, R. Posada Gómez, E. Peña Pérez.

Presentado en: Journal CIM Vol. 6 Núm. 1. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria 2018.

ISSN 2007-8102

## TRABAJO FUTURO

La presente investigación permite la futura posibilidad de continuar realizando numerosos cambios y mejoras al sistema de reactores anaerobios dedicados a la producción de biohidrógeno, se recomienda permanecer en el enfoque técnico del diagnóstico y aislamiento de fallas, además la implementación de diferentes soluciones a los problemas que se tuvieron durante la investigación, la generación de nuevos dispositivos de medición para las variables de la efluente de salida, y sobre todo, mayor eficiencia en el entorno de trabajo de las aplicaciones de control y monitoreo a distancia de los sistemas.

Además, se recomienda realizar utilizando un diferente enfoque técnico un sistema de análisis para la creación de un modelo que a su vez genere estimaciones para el sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas reduciendo enormemente el número de variables del sistema, permitiendo que exista la posibilidad de diagnosticar fallas simultáneas.

Gracias a la investigación realizada en el presente trabajo de tesis ahora existe la posibilidad de continuar desarrollando implementos de mejora a los reactores anaerobios dedicados a la producción de biohidrógeno, se pretende implementar de nuevas técnicas para futuros trabajos durante la continuación de estudios de doctorado.

## REFERENCIAS.

Alvarado Lassman, A. O. (2010). Strategies for the startup of methanogenic inverse fluidized-bed reactors using colonized particles. *Water Environ*, 387-391.

Castelló, E. (2012). Producción de Biohidrógeno a partir de residuos orgánicos. *Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable IIBCE*.

Chan, C. (2010). *Estudio de los parametros de operacion de un reactor anaerobio para la producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos*. CMX: Tesis de Maestria. Instituto Politécnico Nacional. .

D.J.Batstone. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model. *Water Science and Technology*, 65-73.

dania Valdez-Vazquez, H. M.-V. (2009). Hydrogen production by fermentative consortia.

Ferdoush, S. (2014). Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications. *The 9th International Conference on Future Networks and Communications* , 103-110.

García A.I., C. M. (2007). Digestión anaerobia en dos fases. *Instituto de Recursos Naturales Universidad de León*.

Idania Valdez-Vazquez, H. M.-V. (2009). Hydrogen production by fermentative consortia.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, I. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios Energías Renovables*. MADRID: BESEL SA.

- Kargi, F. (2011). Bio-Hydrogen production by different operational modes of dark and photo fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7443-7549.
- Khanal, S. (2008). Environmental Factors Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production Principles and Applications*, 43-63.
- L. Wang, Y.-F. (2010). *Biohydrogen Production and Wastewater treatment from Organic Wastewater by anaerobic fermentation with UASB*. AIP, Conference.
- Lay, C. (2011). Enhancement of anaerobic biohydrogen/metane production from cellulose using heat-treated activated sludge. *Water Science and Technology*, 1849-1854.
- M., Z. (2014). Fault tolerant control strategies for a high-rise building hot water heating system. *Building Services Engineering Research and Technology*, 653-670.
- Mata-Alvarez, J. M. (2000). Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of research achievements. . *Bioresource Technology Department of Chemical Engineering University of Barcelona*.
- R., D. V.-D. (2004). *Studies in Surface Science and Catalysis*.
- S., K. (2008). Anaerobic Reactor Configurations for Bioenergy production. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production Principles and Applications*, 93-114.
- Salcedo, J. . (2008). Design of bioreactors for biohydrogen production. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 941 - 949.
- Sibaja, A. M. (2013). Dedicated observer scheme for fault diagnosis and isolation in instruments. *Elsevier*, 173-180.

Toledo, P. V. (2013). Biohydrogen from waste solids in México. *Quehacer Científico en Chiapas*, 35-43.

Turkdogan-Aydinol, F. I. (2010). A fuzzy-logic-based model to predict biogas and methane production rates in a pilot-scale mesophilic UASB reactor treating molasses wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 460-471.