



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DISEÑO DE UN REACTOR PROTOTIPO DE FERMENTACIÓN
OSCURA PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES
DE TEXTILERAS**

EDDY SANTIAGO JAQUE CASTELLANO

**Trabajo de titulación modalidad: Proyecto de Investigación y Desarrollo
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH,
como requisito parcial para la obtención del Grado de:**

MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA APLICADA

RIOBAMBA - ECUADOR

Diciembre 2019



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El trabajo de titulación modalidad proyectos de investigación y desarrollo, titulado **“DISEÑO DE UN REACTOR PROTOTIPO DE FERMENTACIÓN OSCURA PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE TEXTILERAS”**, de responsabilidad del Sr. **Eddy Santiago Jaque Castellano**, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Segundo Hugo Calderón; Mag.
PRESIDENTE

FIRMA

Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno; PhD
TUTOR

FIRMA

Ing. Juan José Flores Fiallos; Mag.
MIEMBRO

FIRMA

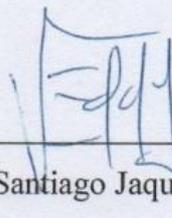
Ing. Tatiana Alexandra Calero Vacacela; Mag.
MIEMBRO

FIRMA

Riobamba, diciembre 2019

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, **Eddy Santiago Jaque Castellano**, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Eddy Santiago Jaque Castellano

C.I. 060452035-3

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Eddy Santiago Jaque Castellano, declaro que el presente Trabajo de Titulación modalidad proyectos de investigación y desarrollo, es de mi autoría y que los resultados del mismo proyecto son auténticos y originales los textos constan en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, diciembre 2019.



Eddy Santiago Jaque Castellano

C.I. 060452035-3

DEDICATORIA

Todo proyecto tiene un resultado final, este es el resultado de un proyecto que inicia desde una idea y plasmarlo significa mucho.

Entusiasmado y orgulloso dedico el presente trabajo:

A Dios por haberme dado salud y vida para lograr los objetivos en mi vida y llenarme de infinita bondad y amor.

A mis padres quienes me han apoyado todo el tiempo desde que tengo uso de razón, apoyándome en todo momento, dándome consejos y motivación permanente para seguir con todos mis objetivos.

A mis hermanas ellas con consejos siempre han estado presentes en los momentos más difíciles ellas con amor, respeto, amistad y compromiso de hermanos siempre me han demostrado su apoyo incondicional.

A mi novia quien con su paciencia y amor ha logrado, fomentar la pasión por aprender y ser mejor persona, fomentar valores en todo momento y lugar.

A mis maestros por su apoyo y motivación para terminar con mis estudios, en el templo del saber Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

A mi tutor Dr. Celso Recalde PhD., quien, con sus consejos, conocimientos, y apoyo técnico profesional no hubiera sido posible terminar este proyecto de investigación

Todos me hicieron ver, que sin importar cuanto tiempo me tome, todo se puede si de verdad se quiere.

Eddy

AGRADECIMIENTO

Dios les pague a todas las personas que hicieron posible esta investigación. Estuvieron presentes en momentos difíciles, de frustración, alegres y tristes.

Agradezco a mi padre por darme la vida, aunque no está conmigo siempre vive en mi corazón y en el corazón de todas las personas que lo conocieron Sr. Eddy Rosendo Jaque Valencia (+), sé que estas en los cielos y siempre estas presente en cada logro.

Gratitud a mi padre de corazón Gerardo Elías Martínez Badillo por todo su apoyo y sabios consejos. Todo mi reconocimiento especial a mi madre Consuelo Janneth Castellano Riera que siempre me ha guiado y con sus valores ha forjado el ser humano y profesional que soy hasta el día de hoy. Me quedo sin palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Lizbeth Jaque, Darlita Martínez, Patricio Martínez, Iván Martínez, Tatiana Martínez una satisfacción inmensa de conocer a lo largo de mi vida hermanos de sangre y de corazón que me han llenado de alegría, de consejos, siempre con palabras de apoyo recordando siempre la importancia de la familia.

Mil gracias Myriam Cudco quien ha sido un pilar fundamental en mi vida, apoyo incondicional, consejos para nunca desistir y ayudarme con un logro más en esta vida.

No puedo dejar de agradecer al Grupo de Energías Alternativas y Ambiente por darme la oportunidad de formar parte de su proyecto, por su apoyo y seguimiento en todo el proceso que duro la investigación.

La frase: “No nacimos para ser altos, pero si para ser grandes” demuestra una vez más que a lo largo de nuestra vida no paramos de aprender, usar el conocimiento para ser mejores profesionales y excelentes seres humanos. Gracias Tío Ángel Barbecho.

Eddy

CONTENIDO

RESUMEN	xv
ABSTRACT	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Situación problemática	2
1.3. Formulación del problema	7
1.3.1. Preguntas directrices	7
1.3.1.1. Pregunta principal	7
1.3.1.2. Preguntas secundarias	7
1.3.2. Justificación	7
1.3.2.1. Justificación Teórica	7
1.3.2.2. Justificación metodológica.....	9
1.3.3. Objetivos de la investigación	11
1.3.3.1. Objetivo General	11
1.3.3.2. Objetivos específicos	11
1.3.4. Hipótesis	11
1.3.4.1. Hipótesis General.....	11
1.3.5. Hipótesis Específica 1	12
1.3.5.1. Hipótesis específica 2	12
CAPÍTULO II	13
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes investigativos	13
2.1.1. Fermentación Oscura	20
2.1.2. Metabolismo de Enterobacter en los procesos fermentativos	21
2.1.3. Metabolismo de Bacillus en los procesos fermentativos	21
2.1.4. Metabolismo de Clostridium	21
2.1.5. Proceso biológico de Fermentación oscura	22
2.1.6. Energía libre de Gibbs de las principales reacciones químicas dentro de los procesos de fermentación que producen hidrógeno	23
2.2. Bases teóricas	24

2.2.1. Hidrógeno como combustible.....	24
2.2.1.1. Obtención de hidrógeno	25
2.2.1.2. Producción de biohidrógeno a través de biomasa.....	25
2.2.1.3. Producción de biohidrógeno por fermentación oscura	26
2.2.2. Potencial químico	29
2.2.2.1. Potencial químico en las mezclas	29
2.2.3. Energía libre de Gibbs.....	30
2.2.4. Nylon.....	31
2.2.5. Nylon en la construcción de prototipos	33
2.2.5.1. Condiciones para la construcción de equipos aplicando nylon como principal material	33
2.2.5.2. Condiciones de las herramientas a aplicar en la utilización de la construcción con materiales de nylon	33
2.2.6. Procedimiento de construcción con la aplicación de materiales a base de nylon.....	34
2.2.6.1. Fresado de materiales de nylon	34
2.2.6.2. Corte con sierra o disco de materiales de nylon	34
2.2.6.3. Perforación con sierra o disco de materiales de nylon.....	34
2.2.6.4. Limado o escariado de materiales de nylon.....	35
2.2.7. Sensor.....	36
2.3. Fundamentación teórica	36
2.3.1. Residuo.....	36
2.3.2. Reactor.....	36
2.3.3. Diseño de prototipos	36
CAPÍTULO III.....	39
3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	39
3.1. Tipos y diseño de investigación	39
3.2. Métodos de investigación	39
3.3. Enfoque de la investigación	39
3.4. Alcance de la investigación	39
3.5. Población y muestra de estudio.....	42
3.5.1. Población	42
3.5.2. Unidad de análisis	42
3.5.3. Construcción del prototipo	45
3.5.4. Selección de la geometría del reactor	45

3.5.5.	<i>Selección de los materiales para la construcción del prototipo</i>	46
3.5.6.	<i>Dimensionamiento del reactor prototipo</i>	46
3.5.7.	<i>Mecanizado</i>	48
3.5.8.	<i>Armado del reactor prototipo (hermeticidad)</i>	50
3.5.9.	<i>Recolección de los datos</i>	51
3.5.10.	<i>Irradiación del lodo como pretratamiento</i>	53
3.6.	Instrumentos para procesar los datos recopilados	53
3.7.	Procesamiento estadístico de los resultados	55
3.7.1.	<i>Curvas de calibración de los sensores tipo MQ</i>	55
3.7.2.	<i>Curva de calibración para la detección del metano del sensor comercial tipo MQ-4</i>	58
3.7.3.	<i>Curva de calibración para la detección del metano del sensor comercial tipo MQ-8</i>	59
3.7.4.	<i>Análisis de la energía libre de Gibbs</i>	62
CAPÍTULO IV		64
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1.	Diseño y mecanizado	64
4.1.1.	<i>Mecanizado</i>	65
4.1.2.	<i>Materiales de construcción</i>	65
4.1.3.	<i>Geometría del reactor prototipo</i>	66
4.1.4.	<i>Volumen del reactor</i>	66
4.2.	Valoración de la generación de gas	69
4.2.1.	<i>Cálculo del volumen total a tratar</i>	72
4.2.2.	<i>Generación de gas</i>	72
4.3.	Eficiencia del tratamiento de los lodos	74
4.4.	Balance de masa del proceso de tratamiento de los lodos provenientes de la industria textil	79
4.4.1.	<i>Estimación teórica de la generación de hidrógeno</i>	82
4.5.	Evaluación económica	83
CONCLUSIONES		87
RECOMENDACIONES		88
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1: Prototipos estudiados en la generación energética alternativa	4
Tabla 2-1: Resumen de patentes relacionadas con procesos o equipos de fermentación oscura como vía de tratamiento biológica	10
Tabla 1-2: Antecedentes investigativos referentes a la generación de biohidrógeno a través de la fermentación oscura y la relación con la factibilidad de la ejecución de la presente investigación.	15
Tabla 2-2: Principales reacciones estequiométricas con la energía libre de Gibbs presentes en la fermentación oscura.	22
Tabla 3-2: Principales reacciones estequiométricas en la fermentación oscura.	23
Tabla 4-2: Antecedentes investigativos referentes al tipo de reactor utilizado y los materiales aplicados en la construcción de este.	38
Tabla 1-3: Alternativas de diseño y materiales de construcción de reactores prototipo basados en fermentación oscura.	43
Tabla 2-3: Parámetros de operación de los sensores comerciales tipo MQ-4 y MQ-8 para la valoración de la concentración de los gases generados.	57
Tabla 3-3: Relación entre la resistencia determinada en los detectores de los sensores comerciales tipo MQ-4 y MQ-8 y la concentración de los gases analitos.	60
Tabla 4-3: Análisis del valor de la energía libre de Gibbs en las reacciones que se desarrollan durante el proceso de fermentación oscura.	62
Tabla 1-4: Evaluación del cumplimiento de los diferentes criterios de selección de los materiales constructivos del reactor prototipo de fermentación oscura de lodos residuales de la industria textil.	68
Tabla 2-4: Ventajas de la aplicación de sensores comerciales en la valoración de las concentraciones de los principales gases producto del tratamiento de los lodos.	71
Tabla 3-4: Estadísticos descriptivos de la concentración de metano e hidrógeno generado en el proceso de fermentación oscura.	74
Tabla 4-4: Resultados de la aplicación de la prueba de T de Student para muestras independientes a los resultados de la concentración de hidrógeno y metano en el gas generado en el tratamiento de las muestras de lodo provenientes de la industria textil.	76

Tabla 5-4:	Comparación de análisis fisicoquímicos de lodos residuales provenientes de la industria textil.	80
Tabla 6-4:	Comparación de análisis metales de lodos residuales provenientes de la industria textil.	81
Tabla 7-4:	Determinación teórica de la producción de biohidrógeno.	82
Tabla 8-4:	Costo de inversión del reactor prototipo.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-2: Secuencia de productos generados en la producción de hidrógeno por fermentación.	28
Figura 1-3: Esquema del proceso sistemático con el cual se ejecutó la investigación.	41
Figura 2-3: Sujeciones del reactor en posición vertical.	47
Figura 3-3: Carga de trabajo en la presión interior.	47
Figura 4-3: Información sobre el control de la malla.	48
Figura 5-3: Resultados del estudio.	48
Figura 6-3: Proceso de mecanizado del cuerpo principal del reactor prototipo.	49
Figura 7-3: Cuerpo del reactor posterior al mecanizado.	49
Figura 8-3: Conjunto de herramientas mecánicas aplicadas en la construcción del reactor.	50
Figura 9-3: Cuerpo del reactor con los accesorios para la hermeticidad de la cabeza del prototipo.	51
Figura 10-3: Instalación del sistema de recolección de datos (sensores) en la cabeza del reactor.	52
Figura 11-3: Sistema de comunicación de los datos recolectados.	52
Figura 12-3: Sistema de recolección de datos.	53
Figura 13-3: Esquema del circuito electrónico implementado en el reactor prototipo.	54
Figura 1-4: Diagrama del diseño del reactor prototipo para el tratamiento de lodos provenientes de la industria textil.	67

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1-3: Curvas de calibración de los sensores comerciales tipo MQ-4 y MQ-8 en la determinación de los gases analitos.	61
Gráfico 1-4: Concentración de hidrógeno generado en el tratamiento de las muestras de lodos de la industria textil.	77
Gráfico 2-4: Concentración de metano generado en el tratamiento de las muestras de lodos de la industria textil.	78

ÍNDICE DE ANEXOS

- A** Valoración de la concentración de hidrógeno en el gas generado producto del tratamiento de las muestras de lodo provenientes de la industria textil.
- B** Valoración de la concentración de metano en el gas generado producto del tratamiento de las muestras de lodo provenientes de la industria textil.
- C** Diagramas del diseño del reactor prototipo.
- D** Informe de caracterización de los lodos.
- E** Ficha técnica del material utilizado en la construcción de reactor prototipo.
- F** Memoria fotográfica de la construcción del equipo.
- G** Ficha técnica del sensor MQ-4 para la determinación de metano.
- H** Ficha técnica del sensor MQ-8 para la determinación de hidrógeno.
- I** Simulación del cuerpo del reactor prototipo.

RESUMEN

El objetivo fue el diseño, construcción y validación de un reactor prototipo para el tratamiento de lodos residuales, mediante fermentación oscura previamente irradiados con rayos gamma con una dosis de 350 Gy. La actividad industrial textil genera empleo y desarrollo; sin embargo, la mayoría de las empresas y PYMES no dan un tratamiento adecuado a los lodos residuales lo que genera afectaciones al entorno, principalmente por su contenido de metales pesados. Verificamos los materiales más apropiados en la construcción del reactor, las condiciones de operación, la proyección de los resultados obtenidos y los criterios tanto de diseño como de construcción. El diseño mecánico del prototipo fue validado a través de su simulación en el software Solid Works versión 2018. El material de construcción fue Nylon LAMIGAMID 100 PA 6 para el cuerpo cilíndrico; para garantizar la hermeticidad se usó arandelas planas, presión. En la cabeza del equipo se instaló un sistema para la adquisición de datos mediante los sensores MQ8, MQ4 sensibles al Hidrogeno y Metano respectivamente. Las pruebas de funcionamiento se ejecutaron con un volumen igual a 1 L de lodos residuales bajo condiciones de laboratorio con un tiempo de residencia de 123 días. Como resultado se obtuvo la concentración media del biohidrógeno 54,14 ppm con respecto a la del biometano 0.0034 ppm. Obtuvimos un reactor prototipo que cumple con las condiciones para el proceso de fermentación oscura, para tratar lodos residuales provenientes de textileras, se determinó su rentabilidad y puede ser utilizado en el área investigativa y docencia. Se recomienda utilizar distintos tipos de residuos orgánicos y microorganismo con alta especificidad para optimizar la producción de estos gases.

PALABRAS CLAVES: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA, FERMENTACIÓN OSCURA, BIOHIDRÓGENO, BIOMETANO PROTOTIPO REACTOR.

ESPOCH - DBRA
PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS
BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL



02 DIC 2019

REVISIÓN DE RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Por: VO Hora: 10:21

ABSTRACT

The objective was the design, construction, and validation of a prototype reactor for the treatment of residual sludge, through dark fermentation previously irradiated with gamma rays with a dose of 350Gy. Textile industrial activity generates employment and development; however, most companies and PYMES do not give adequate treatment to sewage sludge, which affects the environment, mainly because of its content of heavy metals. We verified the most appropriated materials in the construction of the reactor, the conditions of operation, and the projection of the results obtained and the criteria of both design and construction. The mechanical design from the prototype it was validated through its simulation in the Solid Works software 2018 version. The construction material was Nylon LAMIGAMID 100 PA 6 for the cylindrical body; flat washers were used to ensure tightness, pressure. On the head of the equipment was installed a system for the acquisition of data using sensors, MQ8, MQ4 sensitive to the Hydrogen and Methane respectively. Performance tests were taken with an equal volume to 1 L of residual sludge under laboratory conditions with a residency time of 123 days. As result it was obtained a medium concentration of the bio hydrogen of 54,14 ppm with respect to that of bio methane 0,0034 ppm. We obtained a prototype reactor that meets the conditions for the dark fermentation process, to treat residual sludge from textile factories, its profitability was determined and can be used in the research and teaching area. It is recommended to use different types of organic waste and microorganism with high specificity to optimize the production of these gases.

Keywords: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <DARK FERMENTATION>, <BIOHYDROGEN>, <BIOMETHANE>, <PROTOTYPE>, <REACTOR>.



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La gestión adecuada de los residuos representa uno de los retos ambientales de mayor importancia a nivel mundial, generándose la necesidad de la investigación e innovación en las tecnologías aplicables al tratamiento de lodos residuales. El adecuado manejo, estabilización y eliminación de los lodos residuales forma parte de dicha problemática ambiental, ya que deben asegurarse su eliminación segura al ambiente. (Oropeza García, 2006). Los lodos residuales presentan una compleja composición dependiendo del origen, además de tener un potencial contaminante muy alto, sus principales componentes son los metales pesados como el plomo, arsénico, mercurio, cadmio y cobalto. Generalmente, presentan materia orgánica no estabilizada, agentes patógenos, compuestos que no son biodegradables, sales de carácter tóxico o no y que requieren de un tratamiento que garantice su eliminación segura al punto de disposición final, sin generar afectaciones al ecosistema. (Ortiz Hernández, Gutiérrez Ruiz, & Sánchez Salinas, 1995)

En Ecuador, es notable la necesidad de promover la innovación, investigación y tecnología de forma que se garantice impacto positivo a la sociedad y al ambiente. Se dispone de estudios puramente exploratorios relacionados con la fermentación oscura hay muy pocos estudios aplicativos que orienten hacia una alternativa de tratamiento de los lodos, la experimentación en el diseño o construcción de prototipos. La optimización de los procesos y su aplicación a nivel industrial, es decir, dentro del entorno nacional, no se dispone del conocimiento derivado de la investigación que facilite la aplicación de dichas técnicas de tratamiento. La legislación de orden ambiental, cuyo ente regulador está conformado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador, es clara respecto a las características ambientales referenciado a la Tabla 9 Anexo 1 del Libro VI de Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental que deben disponer los lodos residuales previo a su eliminación directa al ambiente en el punto de disposición final, no obstante, la inexistencia de metodologías ambientalmente oportunas que garanticen el cumplimiento de dichos parámetros legislativos no facilita, tanto a las organizaciones que deben dar cumplimiento a la legislación como a los órganos reguladores.

La producción de hidrógeno presenta un enorme potencial como combustible alternativo a futuro. Se ha presentado un alto interés en la investigación de los procesos de obtención de hidrógeno, en vista a que dicho combustible presenta una alta conversión energética por unidad

de masa combustionada (cuyos valores oscilan entre 0,122-0,142 kJ/kg, en base a pureza del gas), y es un proceso de combustión muy limpio. Las vías que hoy en día se disponen para la obtención de biohidrógeno son diversas, se ha potenciado el estudio de los procesos biológicos para la obtención de este biogás. No obstante, actualmente se presentan dos grandes retos que superar en la comprensión de los procesos biológicos de obtención de biohidrógeno, la baja eficiencia de estos en la producción del gas y los altos costos de producción. (Gupta, Kumari, Reddy, & Bux, 2013).

1.2. Situación problemática

En los inicios (siglos previos al XVIII) de la industria textil, se procesaban únicamente fibras de origen natural, ya que su disponibilidad se ajustaba a las demandas requeridas. El desarrollo de la industria y de la sociedad hace que la demanda y exigencias de calidad de los textiles requiera la producción de textil sea de origen sintético, alcanzado en 1990 que el 45% de todos los textiles demandados a nivel mundial sean establecidos a partir de fibras sintéticas, esto generó las características de los vertidos contaminantes industriales, como los lodos, generados en dicha actividad industrial se vean también modificados y presenten componentes que requieran de tratamientos especializados para su estabilización y eliminación segura para el ecosistema. (Morales Corral, 2013).

A pesar de que se haya tecnificado los procesos de producción ampliamente, los tratamientos de las corrientes residuales de dicha industria no son tratados adecuadamente y son eliminados de forma directa al entorno, condición que se presenta en mayor escala dentro del contexto nacional, lo cual refleja que no se han realizado los estudios pertinentes para comprender las adecuadas vías de tratamiento de las corrientes residuales. (Tinoco, Medina, & Zapata, 2012). Se ha verificado que varios estudios referentes al diseño y construcción de prototipos de generación energética alternativa, los cuales se citan dentro de la tabla 1-1, donde se puede verificar que existe una gran variedad de experimentaciones referentes al aprovechamiento de los lodos residuales sin embargo respecto al diseño, construcción y validación de prototipos orientados a la estabilización de lodos residuales y la generación de biohidrógeno como alternativa de generación energética, en condiciones de laboratorio es poco documentada. Así como un mínimo número de estudios que analicen la idoneidad en el diseño y construcción de reactores prototipo por medio de experimentación presentada generalmente en forma de patentes.

Hoy en día se ha realizado numerosos estudios referentes a la utilización de la biomasa como fuente alternativa de energía, tanto en la generación de biometano como de biohidrógeno, como

se muestra dentro de la tabla 1-1, por diversos mecanismos biológicos, a pesar de comprender ampliamente que la producción de gases energéticamente aprovechables ricos en hidrógeno son más amigables con el ecosistema frente a aplicación de gases ricos en metano, no se disponen de estudios que permitan comprender, bajo un enfoque comercial, la aplicabilidad de la biomasa en la producción de hidrógeno a través de la fermentación oscura, en vista a que los procesos utilizados aun no registran el rendimiento y eficiencia suficiente como para ser aplicados como una alternativa comercial de generación energética. (Argun & Kargi., 2011).

En base a lo indicado por (Cata Saady N. M., 2013), los procesos biológicos que se presentan dentro de la fermentación oscura en los tratamientos de corrientes residuales y la producción de biohidrógeno no se encuentran conocidos completamente y algunas partes del comportamiento químico. Existe un vacío en los conocimientos relacionados con la fermentación oscura como medio biológico de estabilización de los residuos, debido principalmente a la falta de investigaciones y de medios de experimentación.

La producción textil dentro del contexto nacional está representada por la inexistencia de procesos tecnológicamente viables para el tratamiento de las corrientes residuales del proceso de producción textil, lo cual genera que las plantas dedicadas a dicha actividad industrial eliminen los flujos residuales, lodos residuales y contaminantes sin la pertinente estabilización previa, afectando al ambiente de manera considerable, generando la pérdida de la calidad afectaciones al entorno. (Cortazar Martínez, Coronel Olivares, Escalante Lozada, & González Ramírez, 2010).

Se han realizado varios estudios referentes a la utilización de prototipos en la experimentación de fuentes de energía alternativa en la producción de biohidrógeno, los cuales difieren principalmente en el tipo de reactor utilizado, la aplicación de procesos combinados de generación, las condiciones de operación y los materiales de construcción utilizados.

Las principales desventajas verificadas se enmarcan en el encarecimiento de los procesos a razón de la utilización de procesos combinados (varias vías biológicas de procesamiento de la biomasa) la aplicación de sistemas de reactores continuos, la aplicación de tratamientos previos y la utilización de condiciones termofílicas para el procesamiento, lo cual genera que el aprovechamiento de la biomasa de los residuos a través de la generación de biohidrógeno sea comercialmente inviable, es por ello que es necesario la investigación de prototipos de bajo costo de construcción, en base al proceso con el cual operen, los materiales utilizados y el consumo energético de los mismos.

Tabla 1-1: Prototipos estudiados en la generación energética alternativa.

TEMA DE INVESTIGACIÓN	AUTOR	DESVENTAJAS/ LIMITACIONES DE LOS PROTOTIPOS
Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: An overview	(Argun & Kargi, 2011)	Las más altas corrientes se reflejaron en aquellos experimentos en los cuales se realizó la secuencia del proceso de fermentación oscura y foto-fermentación, lo cual genera que el proceso se encarezca y la operación de este resulte compleja.
Modeling dark fermentation for biohydrogen production: ADM1-based model vs. Gompertz model	(Gadhamshetty, Johnson, Nirmalakhandan, & Arudchelvamb, 2010)	El modelado de los procesos de la fermentación implica que sean puramente aplicables a las condiciones de experimentación en las cuales se generaron las tomas de datos para el modelado, en el caso que no se repliquen dichas condiciones el modelo puede no reflejar la realidad del proceso, con lo cual es necesario realizar la experimentación desde las condiciones iniciales.
Comparison of bio-hydrogen production from hydrolyzed wheat starch by mesophilic and thermophilic dark fermentation	(Cakır, Ozmihci, & Kargi, 2010)	La producción de biohidrógeno en condiciones termofílicas representa un gasto energético alto en el proceso, lo cual encarece la producción del gas hasta condiciones en las cuales no resulta, comercial o técnicamente, viable la aplicación de dicha metodología.
Integrated hydrogen production process from cellulose by combining dark fermentation, microbial fuel cells, and a	(Wang, y otros, 2011)	La utilización de métodos combinados (fermentación oscura y celdas de combustible microbológicas y celdas de electrolisis microbiana) generan que los equipos presentan una alta

microbial electrolysis cell		complejidad en su construcción, operación y costes, lo cual no resulta aplicativo para los fines comerciales o industriales.
Enhanced bio-hydrogen production from corn cob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation	(Yang, Guo, & Liu, Enhanced bio-hydrogen production from corn cob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation, 2010)	La combinación de dos procesos biológicos genera complejidades en la construcción de los equipos.
States and challenges for high-value biohythane production from waste biomass by dark fermentation technology	(Liu, y otros, 2013)	La producción de biohythane (CH_4+H_2) presenta menores atributos funcionales y ambientales que los registrados en la generación de Biohidrógeno.
Anaerobic fluidized bed reactor with expanded clay as support for hydrogen production through dark fermentation of glucose	(Cavalcante, Rocha, Rissato, Silva, & Barros, 2009)	La fluidización del lecho genera que se presenten complejidades en la construcción de los reactores.
Bio-hythane production from food waste by dark fermentation coupled with anaerobic digestion process: A long-term pilot scale experience	(Cavinato, Giuliano, Bolzonella, Pavan, & Cecchi, 2012)	Mantener las condiciones termofílicas del proceso de fermentación oscura representa un consumo de energía muy elevado que encarece el tratamiento.
Enhanced bio-hydrogen production from corn cob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation.	(Yang, Guo, & Liu, Enhanced bio-hydrogen production from corn cob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation, 2010)	La combinación de los procesos de fermentación oscura y foto-fermentación representa una operación de gran complejidad.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Una alternativa para la gestión de las descargas residuales, incluyendo aquellas que provienen de la industria textil, está representada por lodos residuales para la estabilización de los componentes residuales a través de procesos biológicos y con la obtención de subproductos como es el hidrógeno, metano entre otros. Dentro del gran abanico de vías biológicas con las cuales se puede obtener biohidrógeno a partir del tratamiento de descargas residuales, los procesos fermentativos presentan amplias ventajas respecto a las restantes opciones biológicas. (Das & Veziroğlub, 2001)

Dentro del contexto de la legislación ambiental nacional, se han fijado los valores permisibles de las descargas a los alcantarillados de orden público para precautelar la conservación de las características naturales del entorno que recepta dichos efluentes, no obstante, los vertidos (tanto aguas como lodos residual) provenientes de las industria textil superan los parámetros establecidos en la legislación, por tal motivo, dichas corrientes deben ser tratadas y controladas previo a su eliminación definitiva. (Castro, 2013)

La legislación nacional exige que los vertidos residuales presenten, como máximo una Demanda Bioquímica de Oxígeno igual a 250 mg/l; un valor en la Demanda Química de Oxígeno igual que no supere a 500 mg/l, y de un contenido máximo metales pesados, plomo 0,5 mg/l, arsénico 0,1 mg/l, mercurio 0,01 mg/l, cadmio 0,02 mg/l y cobalto 0,5 mg/l, (Ministerio del Ambiente, 2015) con lo cual resulta necesario la implementación de un sistema de tratamiento biológico que permita la estabilización de los contaminantes presentes dentro de los lodos residuales y garantice el cumplimiento de los parámetros de calidad ambiental exigidos por las autoridades de control ambiental del contexto nacional, dentro del Ecuador, la gestión de los vertidos residuales es una problemática que afecta en gran medida a los ecosistemas, principalmente a la inadecuada disposición de dichas corrientes, como es el caso de la industria textil, cuyas plantas mayoritariamente eliminan sus vertidos residuales de manera directa a los cuerpos de agua cercanos. (Revelo, Proaño, & Banchon, 2015)

Dentro del entrono nacional, se ha establecido que el 70% de aguas residuales generadas son descargadas sin un control o tratamiento previo a cuerpos de agua naturales o al alcantarillado (UN-Water, 2014). Situación que se deriva principalmente de la falta de control y la no aplicación de la legislación ambiental existente, lo cual deriva en la eliminación indiscriminada de las corrientes residuales, tanto los efluentes líquidos como vertidos sólidos, acción que se ve también reflejada en la gestión ambiental de las industrias textiles, en las cuales se eliminan los vertidos residuales (como los lodos) de manera directa en los cuerpos de agua naturales o en el sistema de alcantarillado. (Revelo, Proaño, & Banchon, 2015)

1.3. Formulación del problema

- ¿Se puede desarrollar un prototipo de reactor para tratar lodos residuales provenientes de la industria textil para obtener subproductos energéticos y amigables con el ambiente?

1.3.1. Preguntas directrices

1.3.1.1. Pregunta principal

- ¿Es factible el tratamiento de los residuos industriales como los lodos textiles en un reactor de fermentación oscura?

1.3.1.2. Preguntas secundarias

- ¿Se podría aprovechar mediante fermentación oscura los componentes ricos en materia orgánica presentes dentro de las corrientes de los lodos provenientes de la industria de producción textil?
- ¿Se podrá modelar y simular el comportamiento mecánico del reactor en base al material con el cual será construido?
- ¿Resulta factible económicamente el diseño y construcción de un prototipo para el tratamiento de los lodos generados en la industria textil por vías de fermentación oscura, considerando los beneficios ambientales y académicos?

1.3.2. Justificación

1.3.2.1. Justificación Teórica

Los lodos residuales textiles actualmente representan una seria problemática ambiental que derivan en la contaminación considerable, por sus características fisicoquímicas y microbiológicas es factible la aplicación de fermentación oscura para ser ampliamente utilizados en procesos de obtención energética. (Narvaez Ortiz, Benavides Mendoza, Vazquez Badillo, & Cabrera de la Fuente, 2014) Sin embargo, debido a que la naturaleza de los lodos residuales está en función a las operaciones industriales de las cuales procede, es necesario la formulación de una metodología de tratamiento pertinente, realizar estudios que permitan comprender el

comportamiento de los lodos en cada una de las opciones de tratamiento, a través de los equipos (como reactores prototipos) y medios (como sistemas de tratamiento especializado) que permitan comprender los procesos de tratamiento aplicables.

Los lodos residuales provenientes de la industria textil presentan una gran variedad de componentes contaminantes, en especial las descargas de lodos residuales, los cuales presentan metales pesados plomo, arsénico, mercurio, cadmio, cobalto y materia orgánica, en vista a la gran variedad de operaciones unitarias aplicadas en el proceso productivo, la utilización de diversas materias primas y la aplicación de diversos insumos químicos (Mansilla, Lizama, Gutarra, & Rodríguez, 2001). La descarga directa al ecosistema de dichas corrientes residuales representa una afectación a las condiciones naturales del ambiente, en vista a que al ser descargadas de manera directa a un cuerpo de agua natural sin un proceso previo impactan y generan la pérdida de la calidad ambiental de los ecosistemas. (Naranjo & Eugenio Torres , 2012)

De entre todas las alternativas de tratamiento biológico disponibles actualmente, la fermentación oscura representa la vía más promisoría para la generación de biogás, no obstante, los estudios que se han generado sobre dicho tratamiento no son completamente concluyentes, presentándose aún puntos no determinados totalmente, como las condiciones de operación, la producción del gas y el control de los factores que influyen sobre las tasas de producción del biohidrógeno. (Juárez-Hernández & Castro-González, 2013).

Los procesos biológicos presentan una amplia ventaja frente a las diferentes alternativas de tratamiento, ya que permiten el aprovechamiento de los residuos en forma de fuentes de energía renovables. Los lodos residuales pueden estabilizarse por diversas vías de tratamiento biológico, las vías fermentativas representan una alternativa de tratamiento de gran relevancia en la gestión de los residuos, en vista a que, no únicamente permiten la estabilidad (estabilización de los contaminantes degradables y el encapsulamiento de los componentes no degradables), sino además que potencian la generación de biohidrógeno, el cual representa una alternativa de gran relevancia para ser utilizada como combustible alternativo, debido a su alto poder energético y su proceso de combustión amigable. (Linares Hurtado & Moratilla Soria, 2007).

Resulta pertinente la ejecución de investigaciones que aporte conocimientos de la fermentación oscura como tratamiento para residuos en casos específicos requeridos, lo cual respalda la ejecución de la presente investigación, donde se realizó la experimentación necesaria para establecer un prototipo que permita la investigación de los procesos de estabilización de lodos provenientes de la industria textil.

1.3.2.2. Justificación metodológica

En la actualidad, la energía representa uno de los mayores requerimientos para sustentar la vida en la tierra. De la demanda mundial de energía, el 80% de la misma es satisfecha a razón de fuentes convencionales y únicamente el 20% proviene de fuentes diferentes, como la energía solar, eólica, nuclear y el procesamiento de la biomasa. (Das & Vezirođlub, 2001). Los procesos biológicos de obtención de biohidrógeno presentan características promisorias como fuente de dicho combustible, en vista a que son más amigables con el ecosistema y requieren menor energía en comparación a procesos termoquímicos o electroquímicos. (Das & Vezirođlub, 2001).

La generación de biohidrógeno es una alternativa cuya potencialidad actualmente está plenamente aceptada, pero relativamente poco estudiada en su tecnificación y optimización, no puede ser aplicada de forma industrial o comercial, es por ello que surge la necesidad de generar los medios de investigación para la experimentación que oriente su comprensión del proceso de obtención de dicho biogás, como es el caso de la fermentación oscura de residuos, es por ello que la presente investigación, presenta el diseño y construcción de un prototipo reactor que favorezca la experimentación con dicho proceso de tratamiento biológico este abrirá la posibilidad de comprender profundamente el comportamiento de dicho proceso biológico, incluso el estudio de otros efluentes residuales como materia prima para la obtención del biohidrógeno.

En la actualidad, dentro de la gestión energética de mínimo impacto, se ha considerado al hidrógeno como un potencial sustituto de los combustibles convencionales, principalmente por la combustión amigable de dicho gas, ya que los únicos productos de la quema del biohidrógeno están representados por vapor de agua y energía. A dicha condición favorable del gas, se puede adjuntar el hecho que el biohidrógeno presenta un elevado poder energético por unidad de masa combustionada (cuyos valores oscilan entre 0,122-0,142 kJ/kg, en base a pureza del gas), en comparación a cualquier otro combustible de orden convencional. (Argun & Kargi., 2011).

Dentro de los diversos mecanismos biológicos de obtención de dicho combustible alternativo, la fermentación oscura representa una de las vías más promisorias en la obtención de biohidrógeno, ya que dicho proceso utiliza como materia prima residuos de diversa índole. (Blanco Londoño & Chaparro, 2012)

En la actualidad, únicamente se aplica en un 1% la biomasa (que incluyen los residuos) como fuente de obtención del biohidrógeno, a través de procesos biológicos. (Sinha & Pandey., 2011)

Dentro del estudio bibliográfico inicial, se ha verificado que no se han realizado investigaciones referentes al diseño de reactores prototipos que permitan la experimentación con el proceso de tratamiento de lodos residuales de la industria textil por medio de la fermentación oscura, pero existen patentes certificadas referentes a procesos y equipos de tratamiento por fermentación oscura, como se cita dentro de la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Resumen de patentes relacionadas con procesos o equipos de fermentación oscura como vía de tratamiento biológica.

TITULO DE LA PATENTE	INVENTORES	AÑO	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PATENTADO
PROCESS FOR SEQUENTIAL BIO-HYDROGEN PRODUCTION THROUGH INTEGRATION OF DARK FERMENTATION PROCESS WITH PHOTO FERMENTATION PROCESS	Lal, Banwari Subudhi, Sanjukta Velankar, Harshad Ravindra Tompala, Annaji Rajiv Kumar Rao, Peddy Venkata Chalapath	2015	Proceso de generación de biohidrógeno a través de la secuencia de un tratamiento integrado de fermentación oscura y foto fermentación. El proceso parte de la carga de la biomasa a ser tratada dentro de un bioreactor. Posteriormente se procede a la inocular el sustrato orgánico con un consorcio de bacterias. Se procede a la fermentación oscura. El efluente de la primera etapa alimenta al segundo biorreactor en el cual se produce la photo-fermentación, obteniéndose biohidrógeno en las dos etapas.
BIOHYDROGEN PRODUCTION METHOD AND REACTOR	Hisham Mohamed Hafez	2016	Método de producción de biohidrógeno, ácidos grasos volátiles y alcoholes a partir de biomasa. El método detalla las operaciones de carga de la biomasa y la inoculación de los microorganismos en un reactor completamente agitado. Producto del tratamiento se obtiene biohidrógeno (el cual es recuperado en la cabeza del reactor), dióxido de carbono (el cual es secuestrado en la cabeza del reactor y un efluente líquido que contiene una carga microbiana importante, ácidos grasos volátiles y alcoholes de interés. El reactor opera por mezcla completa y fermentación oscura.

Fuente: Google Patent, 2019

Como se puede apreciar dentro del cuadro anterior, existen patentes relacionadas con los procesos y equipos para la producción de biohidrógeno por medio de reactores especializados obteniéndose resultados importantes en el campo de los tratamientos biológicos de la biomasa presente en los residuos, dichas invenciones están relacionadas, en el primer caso, con la aplicación de un sistema integrado fermentación oscura y foto-fermentación a través de dos reactores secuenciales y, en el segundo caso, únicamente fermentación oscura a través de un reactor perfectamente mezclado, sin embargo, en ambos casos se requiere de una inoculación previa con microorganismos específicos para lograr los resultados esperados.

1.3.3. *Objetivos de la investigación*

1.3.3.1. Objetivo General

- Diseñar un reactor prototipo de fermentación oscura para el tratamiento de lodos residuales de textileras.

1.3.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las principales variables y parámetros de diseño de un reactor prototipo de fermentación oscura mediante la experimentación con lodos residuales provenientes de la industria textil.
- Generar la modelación y simulación del comportamiento mecánico del reactor prototipo de tratamiento de lodos residuales por fermentación oscura de la industria textil.
- Realizar un análisis económico de la operación del reactor prototipo de fermentación oscura para el tratamiento de los lodos residuales provenientes de la industria textil.

1.3.4. *Hipótesis*

1.3.4.1. Hipótesis General

- Es posible diseñar un reactor de fermentación oscura experimental para tratar lodos residuales de la industria textil, dentro del Grupo de Energías Alternativas y Ambiente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

1.3.5. *Hipótesis Específica 1*

Por medio del diseño, delimitación de las variables y parámetros de operación de un reactor prototipo para el tratamiento de lodos residuales de la industria textil, por fermentación oscura, se podrá aprovechar energéticamente la biomasa presente en el residuo.

1.3.5.1. Hipótesis específica 2

- La modelación y simulación del comportamiento mecánico del mismo, fue validada con los resultados obtenidos de la concentración de hidrógeno y metano.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes investigativos

La producción de biohidrógeno representa una alternativa, con gran potencial para la generación de energías alternativas, en vista a que se puede utilizar las abundantes corrientes residuales de diversas industrias, como los residuos ricos en celulosa, residuos de la industria láctea, de la palma destinada a la producción de aceite y residuos ricos en glicerol, a través de los procesos biológicos oportunos, alcanzando dos ventajas principales, el tratamiento de los efluentes residuales y la generación energética amigable con el ambiente (Chong, Sabaratnam, Shirai, & Hassan, 2009).

La investigación y generación de energías alternativas es una necesidad actual que requiere de gran atención, desde los inicios de las civilizaciones modernas, la humanidad ha utilizado fuentes convencionales de energía para complacer sus requerimientos energéticos. Diferentes tipos de combustibles han evolucionado siendo estos más eficientes y menos contaminantes al ambiente. Nuestro compromiso es el desarrollo de alternativas, y uso todos los residuales para satisfacer nuestra necesidad de energía. Las fuentes convencionales de energía (petróleo) han sido explotadas por más de un siglo, lo que ha conducido no solo a serios problemas ambientales sino también al agotamiento de las reservas limitadas de dichos combustibles, cuyos picos máximos está predicho se alcanzarán en 2023 y 2050 para el petróleo y gas natural respectivamente (Brentner et al., 2010).

Los procesos para la producción biológica de hidrógeno pueden ser divididos, en términos generales, en dos grupos distintos: uno dependiente de la luz y el otro independiente. Los procesos que se llevan a cabo mediante la luz son biofotólisis directa o indirecta y foto fermentación mientras que la fermentación oscura es un proceso independiente de la disponibilidad de la luz (Kotav & Das, 2008).

Al realizar la revisión bibliográfica inicial, se han identificado las falencias en el diseño y operación presentadas por las propuestas de reactor establecidas en la bibliografía referente a la generación de biogás a través de los procesos biológicos anaerobios, como se describe a continuación:

- **Producción de biogás:** los procesos de tratamiento anaerobio biológico, diferente a la fermentación oscura, generan biogás con una concentración mayoritariamente de metano, el cual es energéticamente como ecológicamente, menos eficiente que el biohidrógeno.
- **Factibilidad de la aplicación de la fermentación oscura:** actualmente no se ha alcanzado a comprender y controlar el proceso de fermentación oscura al punto tal que sea factible su aplicación a nivel comercial, como fuente de energía renovable a través de la generación de biohidrógeno, o a nivel tecnológico, ya que el rendimiento alcanzado actualmente no compensa la inversión aplicada en la implementación de dicho sistema de tratamiento.
- **Geometría de los reactores.** En vista a la geometría de los reactores (principalmente cilíndricos para evitar zonas no tratadas o la estratificación de los componentes de los lodos en tratamiento), resulta compleja la construcción de los mismos en materiales metálicos, en tanto que la utilización de materiales cerámicos resulta no factible en vista a que la fabricación de elementos en dichos materiales solo puede ser realizada por plantas especializadas, es por ello que, en base a los antecedentes estudiados, la utilización de polímeros y la fabricación de los elementos de los reactores a partir del mecanizado o por impresión 3D es la alternativa constructiva más oportuna en la construcción de prototipos destinados a la experimentación.
- **Presurización del reactor.** La aplicación de materiales cerámicos en la construcción de reactores prototipos (como por ejemplo vidrio) no permite la correcta hermeticidad en el reactor, lo cual genera pérdidas del biogás, siendo dicho producto de vital interés para los tratamientos biológicos, es por ello que únicamente se puede construir los prototipos en materiales metálicos o poliméricos, siendo los últimos las alternativas de menor costo.

Tabla 1-2: Antecedentes investigativos referentes a la generación de biohidrógeno a través de la fermentación oscura y la relación con la factibilidad de la ejecución de la presente investigación.

AUTOR	INVESTIGACIÓN	CONTEXTO	PRINCIPALES CONCLUSIONES	FACTIBILIDAD REFERENTE A LA INVESTIGACIÓN
(Yanan & Jianlong , 2015)	Biohydrogen production using waste activated sludge disintegrated by gamma irradiation	Contexto macro (mundial)	La producción de biohidrógeno se ve favorecida por el pretratamiento de los residuos con radiación gamma y la aplicación de un medio alcali (los mejores resultados se obtuvieron con 20 kGy y pH=12), debido a la desintegración y disolución de los principales componentes de los residuos.	En la presente investigación para favorecer la generación de hidrogeno frente a la generación de metano producto de la fermentación, resultado pertinente la aplicación de radiación a la muestra de lodo que posteriormente sería tratada dentro del prototipo.
(Yoshihito , Mei-Ling, Vikineswary , & Mohd , 2009)	Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation	Contexto macro (mundial)	El hidrogeno representa una alternativa limpia a la producción de energía, y puede ser obtenido a partir de biomasa proveniente de diversas industrias. La producción de hidrogeno a partir de procesos biológicos	Para la producción de biohidrógeno por fermentación oscura se aplicó el tratamiento de lodos, en base a su alto contenido de materia orgánica.

			representa una alternativa de obtención económica de dicho gas, en comparación a las demás vías de obtención.	
(Salub. Manish, 2008)	Comparison of biohydrogen production processes	Contexto macro (mundial)	Para generar que el hidrógeno sea una alternativa viable en la producción energética limpia, se debe potenciar los estudios referentes a la producción de dicho gas por vías fermentativas (incluyendo la fermentación oscura) para de esta manera generar que dicha práctica pueda ser aplicada de forma comercial, ya que en la actualidad no se dispone de información en bibliografía sobre dicho tema.	Se estableció que el reactor prototipo opere a través de fermentación oscura en vista a que el gas producido principalmente contiene hidrogeno, lo cual representa ambientalmente una mejor fuente de energía renovable frente a la generación mayoritaria de metano.
(Blanco, A. 2013)	Producción de biohidrógeno a través de la fermentación oscura de residuos – Revisión crítica	Contexto meso (Latinoamérica)	Debido a las características del biohidrógeno, dicho gas representa una alternativa promisoría como sustituto de combustibles convencionales. No	Se estableció como principal criterio de diseño que el reactor prototipo favorezca las condiciones de tratamiento para la generación principal de hidrogeno frente a

			obstante, debido a que no se ha aun el rendimiento de la producción de gas está muy alejado del esperado teóricamente, se debe profundizar en el estudio de los procesos de obtención biológica del mismo.	metano, en base a lo especificado en dicha publicación.
(Arias González & Rodríguez Bohórquez, 2012)	Estudio de la producción de hidrógeno en régimen batch con agua residual proveniente de la industria cervecera	Contexto meso (Latinoamérica)	La aplicación de procesos fermentativos (por vías oscuras o lumínicas) en la producción de biohidrógeno genera un mayor rendimiento respecto a la aplicación de los restantes métodos biológicos.	En base a que los procesos fermentativos por vía oscura presentan un mayor rendimiento de biohidrógeno frente a los restantes proceso de tratamiento fermentativo, se estableció que el reactor prototipo operare bajo dichas condiciones.
(Buitrón Méndez & Carvajal Monroy, 2009)	Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales	Contexto meso (Latinoamérica)	Resulta factible la producción de biohidrógeno a partir de vertidos residuales, a través de la aplicación de procesos fermentativos. La presencia de bacterias metanogénicas afecta la producción del biohidrógeno.	En vista a que la presencia de bacterias metanogénicas afecta la producción de biohidrógeno, se estableció que como principal pretratamiento se irradien las muestras de lodos para su posterior tratamiento dentro del prototipo.

(Sotelo Navarro, 2017)	Producción de bioH ₂ por fermentación oscura a partir de pañales desechables usados	Contexto meso (Latinoamérica)	El procesamiento de los residuos generó una mayor cantidad de hidrogeno dentro del gas obtenido en condiciones termofílico frente al régimen mesofílico.	En vista a que las condiciones termoflicas favorecen a la generación de biohidrógeno se utilizó un material térmicamente aislante para la conformación del reactor, como lo es el nylon.
(Castillo Hernández, 2015)	Efecto de la carga orgánica sobre la producción biológica de hidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos en un reactor continuo	Contexto meso (Latinoamérica)	La carga orgánica de los residuos tratados dentro de un reactor que opera por fermentación oscura influye sobre la producción del biohidrógeno.	En vista a que la carga orgánica favorece a la producción del biogás se utilizó como fuente de biomasa para el tratamiento dentro del reactor muestras de lodos provenientes de la industria textil.

(Litardo López, 2014)	<p>Estudio de la viabilidad socioambiental del hidrógeno como vector energético producido a partir de energías renovables en el Ecuador.</p>	<p>Contexto micro (Ecuador)</p>	<p>La implementación del biohidrógeno como energía alternativa resulta ampliamente viable dentro del contexto nacional, tanto bajo una perspectiva ambiental como económica. Existe alrededor de 90 vías de producción de hidrogeno como combustible, no obstante, de entre todo ese grupo existen únicamente un pequeño grupo que es viable, debido a utiliza recursos renovables, como la biomasa.</p>	<p>Se estableció la principal aplicación del prototipo la experimentación posterior del proceso de fermentación oscura de biomasa para la generación de biohidrógeno, con lo cual se potencia las fuentes de energía renovables.</p>
-----------------------	--	---------------------------------	--	--

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

En base a los antecedentes investigativos presentados en el cuadro anterior Tabla 1-2, se pudo identificar los siguientes criterios de diseño y construcción de reactores prototipo que permitan el aprovechamiento de la biomasa de los residuos para la generación de biohidrógeno, en base a la factibilidad constructiva y operativa de los mismos:

- Los reactores tipo batch presentan una mayor facilidad de operación y menores costos de construcción.
- La utilización de materiales poliméricos permite la construcción de unidades de compleja geometría, ya sea por mecanizado o por impresión 3D.
- La aplicación de un solo tipo de procesamiento biológico factibiliza la construcción de los equipos a escala de laboratorio.
- La aplicación de radiación como pretratamiento favorece la producción de hidrógeno frente a la generación de metano.

2.1.1. Fermentación Oscura

La producción de hidrógeno por este método está dada por bacterias anaeróbicas que crecen en oscuridad y usan sustratos ricos en carbohidratos. Los subproductos de la fermentación lo constituyen los ácidos acéticos (máximo teórico de 4 mol H₂/mol glucosa) y butírico (máximo teórico de 3.4 mol H₂/mol glucosa), con lo que los rendimientos prácticos de hidrógeno en la fermentación oscura están alrededor de 2 mol H₂/mol glucosa (Levin y otros, 2004).

La generación de biohidrógeno a través de la fermentación oscura se logra principalmente por bacterias estrictamente anaerobias o anaerobias facultativas (Londoño y Chaparro, 2012). Las fermentaciones se llevan a cabo a diferentes temperaturas, desde mesófilas (25- 40°C), hasta termófilas (> 50°C) (Zhang y otros, 2003; Lin y Chang, 2004), produciéndose biogás que contiene H₂, CO₂, CO, H₂S y, en algunos casos, CH₄. Las especies bacterianas que producen hidrógeno por este sistema, y que son más conocidas, son las que corresponden a los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium* (Reith y otros, 2003; Levin y otros, 2004).

2.1.2. *Metabolismo de Enterobacter en los procesos fermentativos*

En base a lo indicado por (Converti & Perego, 2002) , quien analizó el metabolismo anaeróbico de *Enterobacter*, a través de en cultivo discontinuo a niveles de glucosa iniciales crecientes, determinando las concentraciones finales de los productos de fermentación para verificar un análisis de flujo metabólico basado en balances simples de masa de carbono y energía, se pone de manifiesto que, en base a los coeficientes estequiométricos de los productos recolectados al aumentar las concentraciones iniciales de glucosa:

- Poca influencia del nivel inicial de glucosa en la formación de los principales productos de fermentación (2,3-butanodiol y etanol).
- Posible inhibición de las formaciones de 2,3-butanodiol y lactato por el aumento de la concentración de etanol.
- Aumento consiguiente del flujo de carbono a través de las vías metabólicas restantes con producciones molares aumentadas de succinato, acetato e hidrógeno.
- La constancia relativa de la producción molar de ATP y CO₂.

Cabe recalcar que los resultados presentados por el autor (Converti & Perego, 2002), fueron establecidos para la comprensión del metabolismo de dicho microorganismo dentro de la fermentación.

2.1.3. *Metabolismo de Bacillus en los procesos fermentativos*

Los *Bacillus* crecen en ausencia de oxígeno utilizando amonificación de nitrato y diversos procesos de fermentación. Los *Bacillus* durante mucho tiempo se consideraron incapaces de crecer en la ausencia de oxígeno molecular como un receptor de electrones terminal. Sin embargo, la capacidad de la mayoría de los *Bacillus* autores. Durante el proceso de amonificación de nitrato anaeróbico, el nitrato se reduce por un nitrato reductasa respiratoria (NarGHI) a nitrito, que posteriormente se reduce aún más a amoníaco por una reductasa de nitrito celular general (NasDE). (Cruz Ramos, y otros, 2000).

2.1.4. *Metabolismo de Clostridium*

En base a lo indicado por (O'Brien & Morris, 1971), quienes estudiaron el metabolismo de *Clostridium*, señalan que en dichas bacterias, la exposición a corto plazo (4 a 6 h.) al oxígeno no fue letal, aunque a concentraciones suficientemente altas el oxígeno disminuyó la tasa de consumo de glucosa, detuvo el crecimiento y evitó la síntesis neta de ADN, ARN y proteínas.

En dichas condiciones aeróbicas, el organismo se drenó de "poder reductor" y careció de energía, como lo demuestra el cese de la formación de butirato (pero no de la producción de acetato), y una marcada caída en el ATP intracelular. Estas consecuencias de la oxigenación se revirtieron rápidamente cuando se restablecieron las condiciones anaeróbicas; El crecimiento "normal" y el metabolismo de la glucosa se reanudaron. No hubo evidencia de producción de H₂O₂, ni los efectos de la oxigenación podrían atribuirse simplemente a su elevación del cultivo. Por lo tanto, el oxígeno (40 μM) inhibió el crecimiento incluso en un medio preparado con ditiotreitol a - 50 mV, mientras que el crecimiento y el metabolismo de la glucosa continuaron sin control cuando la E h de un cultivo anaeróbico se mantuvo a +370 mV mediante la adición de ferricianuro de potasio.

2.1.5. *Proceso biológico de Fermentación oscura*

Dentro de la tabla 2-2, se describen las principales ecuaciones químicas referentes a la fermentación de la biomasa con la subsecuente generación de hidrógeno.

Tabla 2-2: Principales reacciones estequiométricas con la energía libre de Gibbs presentes en la fermentación oscura.

ECUACIÓN QUÍMICA	DESCRIPCIÓN
$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$ $\Delta G^\circ = -206kj \cdot mol^{-1}$	Biotransformación de la glucosa a ácido acético, H ₂ y CO ₂
$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + 2HCOO^- + 4H^+ + 2H_2$ $\Delta G^\circ = -209,1kj \cdot mol^{-1}$	Fermentación de la glucosa a acetato y formiato
$2HCOOH \rightarrow 2CO_2 + 2H_2$ $\Delta G^\circ = -6kj \cdot mol^{-1}$	Fermentación de la glucosa a acetato y formiato

Referencia: (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011), 2012).

Como se puede verificar en el cuadro anterior, las reacciones correspondientes a los procesos de fermentación oscura de la biomasa generan como principales productos biohidrógeno, estas concentraciones dependerán de las vías biológicas por las cuales se realice el tratamiento de los residuos.

Para la estimación de la producción de biohidrógeno a través de la aplicación de la fermentación oscura, los autores (Montoya-Pérez & Durán-Herrera, 2017) propone la aplicación de la relación matemática descrita a continuación:

$$H = P_m \cdot e^{\left\{-e^{\left[\frac{R_m \cdot e}{P_m}(\lambda - t) + 1\right]}\right\}}$$

Dónde:

- H : acumulación de producción de hidrógeno
- P_m : cantidad del potencial máximo
- λ : tiempo de retardo
- R_m : tasa de producción máxima
- t : tiempo de residencia

2.1.6. *Energía libre de Gibbs de las principales reacciones químicas dentro de los procesos de fermentación que producen hidrógeno*

Dentro de la tabla 3-2, se muestran las principales reacciones que intervienen en la producción de hidrógeno dentro de los procesos fermentativos de materia orgánica.

Tabla 3-2: Principales reacciones estequiométricas en la fermentación oscura.

PRODUCTO GENERADO
Acetato: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$
Butirato: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$
Propionato: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
Lactato: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH + H^+$
Etanol: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
Butirato: $2CH_3CHOHCOOH + 2H_2O \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2HCO_3^- + H^+ + 2H_2$
Valerato: $CH_3CH_2COO^- + 2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3(CH_2)_3COO^- + 4H_2O$
Capronato: $CH_3(CH_2)_2COO^- + 2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3(CH_2)_4COO^- + 4H_2O$
Propionato: $CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
Butirato: $CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$
Lactato: $CH_3CHOHCOOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + HCO_3^- + 2H_2$
Etanol: $CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$
Homoacetogenesis: $4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$
Hidrógeno: $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
Acetato: $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$
Formiato: $4HCOOH \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$
Metanol: $4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$



Fuente: (Cata, 2013)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. *Hidrógeno como combustible*

La reducción en las fuentes de los combustibles fósiles, siendo actualmente las principales fuentes de energía, así como un impacto negativo de sus productos de combustión en el medio ambiente, han resultado en un mayor interés en el hidrógeno como una de las fuentes de energía más prometedoras en el futuro. El hidrógeno, llamado el combustible del futuro, puede convertirse en una fuente de energía, no solo aplicado en motores de combustión interna o turbinas de gas sino también en celdas de combustible. La ventaja del hidrógeno como combustible se atribuye a su alto poder calorífico neto en comparación con otros combustibles. (Graboski & McCormick, 1998)

Un kilogramo de hidrógeno es equivalente a 2,75 kg de gasolina y 6 kg de metanol con respecto a su valor calorífico neto. El hidrógeno, debido a su alta eficiencia energética, también resulta superior a otras fuentes de energía alternativas como la energía eólica, solar, de mareas y geotérmica. En vista al inminente deterioro ambiental que se está generando en la actualidad, el hecho de que el hidrógeno sea una fuente de energía ecológicamente limpia resulta relevante para el desarrollo sostenible y sustentable. La combustión de hidrógeno no produce dióxido de carbono, el cual representa a uno de los gases de efecto invernadero que mayoritariamente afectan al entorno. Un factor limitante serio en el uso de hidrógeno como fuente de energía es su explosividad al encontrarse en contacto con el oxígeno. Además, el almacenamiento del hidrógeno como combustible resulta complejo en comparación con otros combustibles. Debido a su bajo punto de ebullición, el hidrógeno debe almacenarse en recipientes a presión prestando precauciones específicas. A pesar de dichas limitaciones técnicas, el almacenamiento de hidrógeno como combustible es más factible que el almacenamiento de la energía de otras fuentes alternativas. (Grimes, Varghese, & Ranjan, 2008)

Aunque el hidrógeno se utiliza como combustible o fuente de energía, en la actualidad sus principales aplicaciones son como materia prima e insumo para las industrias químicas, de refinería y farmacéutica. Se utiliza en la síntesis de amoníaco, metanol y para la hidrogenación de aceites líquidos. Entre otros procesos que utilizan hidrógeno, se debe mencionar la síntesis de anilina a partir de nitrobenzeno, la síntesis de hexametildiamina y la eliminación de trazas de oxígeno en la protección contra la corrosión. En los procesos de refinería, como el

hidrocraqueo, el hidrógeno se usa para eliminar compuestos de azufre y nitrógeno. (Grimes, Varghese, & Ranjan, 2008)

2.2.1.1. Obtención de hidrógeno

El hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en su forma elemental, sino combinado con otros elementos dentro de compuestos químicos. Por lo tanto, a pesar de ser un elemento muy abundante en la Tierra, para producir hidrógeno es necesario convertir los compuestos que lo contienen en el gas aprovechable como combustible. En la actualidad, las fuentes más comunes de hidrógeno son los combustibles fósiles no renovables, como el petróleo crudo (aproximadamente 30%), el gas natural (aproximadamente 48%), el carbón (aproximadamente 18%) y la electrólisis del agua (aproximadamente 4%). (Pandey & Sinha, 2011).

Las principales tecnologías de producción de hidrógeno que utilizan fuentes de energía convencionales incluyen el reformado con vapor de gas natural y petróleo, la descomposición catalítica del gas natural, la oxidación parcial de la fracción de hidrocarburos pesados del petróleo y la gasificación de carbón o coque. Estos métodos requieren mucha energía y operan a altas temperaturas (> 700 ° C). Además, todos los procesos mencionados anteriormente contaminan el ambiente emitiendo grandes cantidades de óxidos de carbono, azufre y nitrógeno, así como cenizas que contienen sustancias radiactivas y metales pesados a la atmósfera. (Kargi & Kapdan, 2006)

Otro proceso importante que genera hidrógeno es la electrólisis del agua; sin embargo, requiere energía eléctrica proveniente de centrales eléctricas de carbón, gas natural o de centrales nucleares. La ventaja de la electrólisis es la falta de emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. (Logan, 2004).

Se están desarrollando nuevos métodos de producción de hidrógeno, como los procesos relacionados con la fotocatalítica, plasmalítica, magnetolítica o radiolítica del agua, así como la gasificación de hidrocarburos por plasma a alta temperatura. La descomposición del agua y para la producción de hidrógeno y oxígeno también puede tener lugar a través de la mecanocatalítica. (Charanpahari, Umare, & Sasikala, 2014)

2.2.1.2. Producción de biohidrógeno a través de biomasa

La producción de hidrógeno a partir del aprovechamiento de biomasa produce una disminución de la dependencia energética de los países que tienen acceso limitado a los combustibles fósiles.

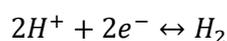
La conversión de biomasa a hidrógeno puede realizarse a través de varios procesos, entre los cuales se citan: gasificación, pirólisis, reformado catalítico con vapor, fotofermentación, fermentación oscura y biofotólisis. Cabe recalcar que, a más de la generación de combustible, la biomasa puede convertirse simultáneamente en varios compuestos químicos útiles. Dichos productos se obtienen a través de las biorefinerías. (Sarma, Pachapur, Brar, Bihan, & Buelna, 2015).

La producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables, incluida la biomasa contenida en los residuos, es una alternativa de gran relevancia frente a los métodos tradicionales de generación de hidrógeno. Los desechos de la industria agroalimentaria, que contienen un alto porcentaje de almidón y celulosa (paja, estiércol, suero, aguas residuales de destilería, melaza), desechos de la industria de pulpa y papel, desechos de la producción de biocombustibles (glicerina de grado técnico) y lodos residuales pueden ser aprovechados como materia prima para la obtención de biohidrógeno a través de procesos metabólicos de microorganismos. (Liu, Zheng, Wu, & Chu, 2016)

2.2.1.3. Producción de biohidrógeno por fermentación oscura

La fermentación oscura, actualmente, se considera el método más prometedor de producción de biohidrógeno a través del aprovechamiento de la biomasa, para lo cual la relación de energía neta es igual a 1,9. A modo de comparación, en el proceso de reformado de metano con vapor, esta relación es menor a 0,64. La fermentación oscura también es el proceso mejor comprendido entre los métodos biotecnológicos de producción de hidrógeno, a razón de su eficiencia. (Manish & Banerjee, 2008)

En la fermentación oscura, los sustratos son convertidos por bacterias anaerobias en ausencia de luz. El hidrógeno es el sustrato clave en el metabolismo de muchos microorganismos anaerobios. Dichos microorganismos son capaces de aprovechar moléculas de hidrógeno ricas en energía, en base a su disponibilidad, y utilizan los electrones de la oxidación del hidrógeno para producir energía. En ausencia de aceptores externos de electrones, los organismos tienen un exceso de electrones generados en los procesos metabólicos como resultado de la reducción de protones que generan moléculas de hidrógeno. Las principales enzimas que regulan el metabolismo del hidrógeno son las hidrogenasas. Dichas enzimas generan la catálisis de la siguiente reacción química. (Kumar, y otros, 2016)



Las dos hidrogenasas básicas que catalizan la reacción descrita, presentan diferentes zonas activas, y se clasifican en los siguientes grupos: [FeFe]-hidrogenasas y [NiFe]-hidrogenasas. El grupo de las [FeFe]-hidrogenasas son más activas en la producción de hidrógeno molecular que presentes dentro del grupo de las [NiFe]-hidrogenasas, que catalizan principalmente la oxidación del hidrógeno molecular. Cabe señalar que las [FeFe]-hidrogenasas suelen ser sensibles al oxígeno. (Hallenbeck, 2009).

Dentro de la figura 1-2, se muestra la secuencia de reacciones químicas generadas en la producción del biohidrógeno por medio de fermentación oscura de materia de carácter orgánico.

En la actualidad, el mecanismo de fermentaciones a través de la glucólisis, en el que los procesos metabólicos dan como resultado la producción de hidrógeno a partir de glucosa, se comprenden ampliamente. El primer paso de este tipo de fermentación es la glucólisis, en la que la glucosa se convierte en piruvato, el intermediario clave con la formación de una forma reducida de nicotinamida adenina dinucleótido (NADH). En condiciones anaeróbicas, el piruvato se puede convertir en acetil-CoA en la reacción catalizada por piruvato ferredoxina oxidorreductasa (PFOR). (Hallenbeck, 2009)

Los productos de la reacción, además de acetil-CoA y CO₂, también incluyen ferredoxina reducida, la cual participa en la reducción de la [FeFe]-hidrogenasas, que posteriormente reducen los protones que producen hidrógeno. Otra posible vía para la conversión de piruvato en acetil-CoA con la formación de formiato es la reacción catalizada por el piruvato formiato liasa (PFL). El formiato puede convertirse fácilmente en hidrógeno y dióxido de carbono en presencia de las [NiFe]-hidrogenasas o [FeFe]-hidrogenasas. La acetil-coenzima A puede convertirse en varios compuestos orgánicos que son productos de fermentación aprovechables, como el etanol, butanol, acetona, ácido butírico o ácido acético, con la oxidación simultánea de NADH y/o la formación de ATP. (Hawkes, Hussy, Kyazze, Dinsdale, & Hawkes, 2007)

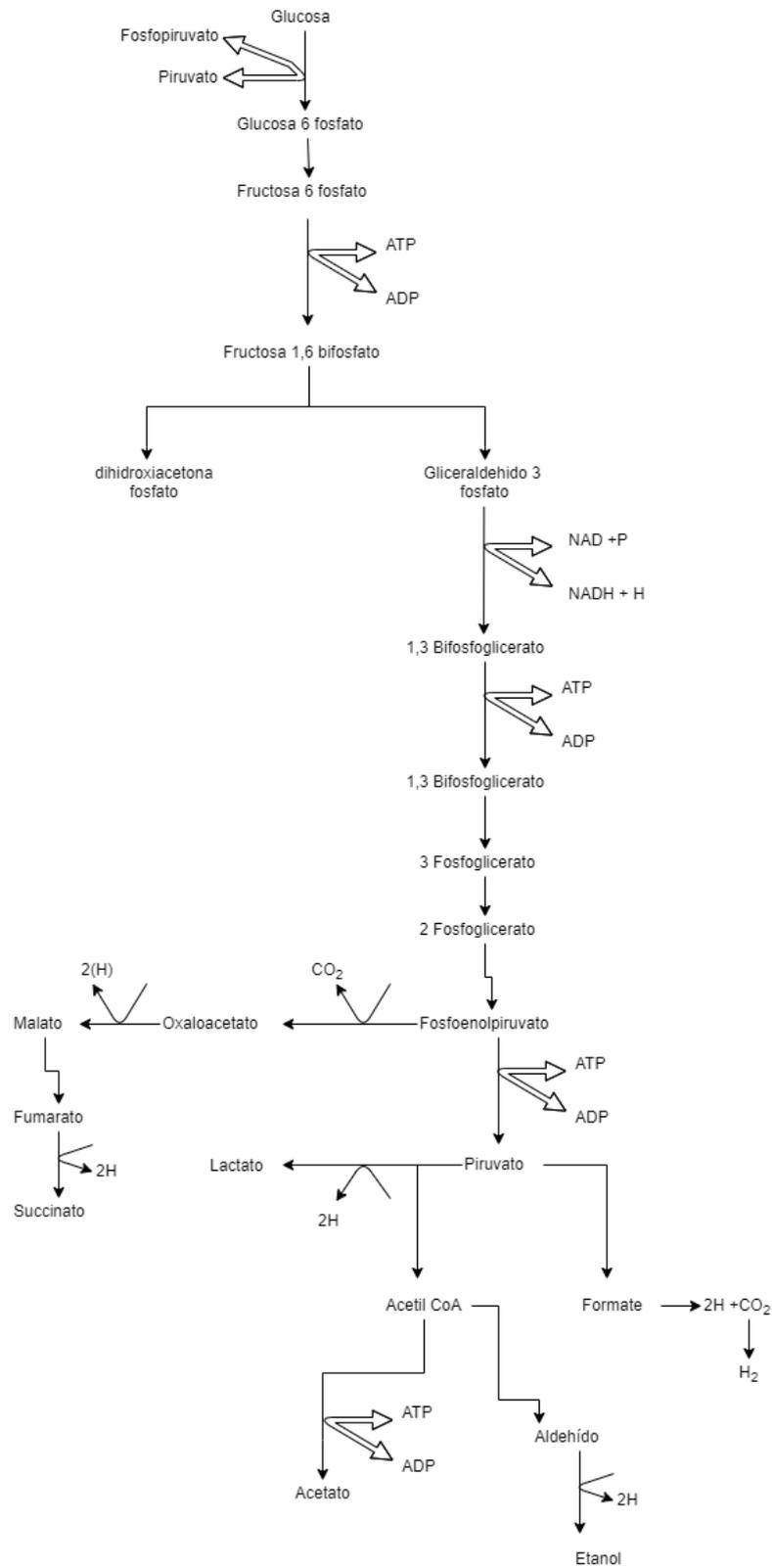


Figura 1-2 Secuencia de productos generados en la producción de hidrógeno por fermentación.

Fuente:(Converti & Perego, 2002)

2.2.2. Potencial químico

El potencial químico μ_i de la sustancia i en un sistema de una fase está dado por la siguiente relación matemática: (Levine, 2014)

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_{j \neq i}}$$

Como G es una función de T, P, n_1, n_2, \dots , su derivada parcial $\frac{\partial G}{\partial n_i} = \mu_i$ también es función de las siguientes variables, para un sistema de una fase: (Levine, 2014)

$$\mu_i = \mu_i(T, P, n_1, n_2, \dots)$$

El potencial químico de la sustancia i en la fase es una función de estado que depende de la temperatura, presión y composición de la fase. Como μ_i es la razón de cambios infinitesimales en dos propiedades extensivas, es una propiedad intensiva. De $\mu_i = \mu_i(T, P, n_1, n_2, \dots)$, el potencial químico de la sustancia i produce la tasa de cambio de la energía de Gibbs G de la fase respecto de los moles de i agregados a T, P y el resto de los números de moles constantes. Gibbs introdujo la función de estado μ_i a la termodinámica.

De forma resumida, se puede indicar que el potencial químico de una especie química está definido por la siguiente relación matemática, para un sistema de una fase:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_{j \neq i}}$$

Dónde G es la energía de Gibbs del sistema de una fase y define la cercanía de un sistema termodinámico respecto al equilibrio y las descompensaciones que impulsan al sistema a adaptarse a un nuevo equilibrio. (Levine, 2014)

2.2.2.1. Potencial químico en las mezclas

Cuando dos gases o dos líquidos miscibles se ponen en contacto, se mezclan y forman una solución o mezcla homogénea sin que se requiera ninguna entrada de trabajo. Es decir, la tendencia natural de las sustancias miscibles que se ponen en contacto es mezclarse entre sí. Éstos son procesos irreversibles y, en consecuencia, es imposible que ocurra de manera

espontánea el proceso de separación. Por ejemplo, los gases puros nitrógeno y oxígeno fácilmente se mezclan cuando se ponen en contacto, pero una mezcla de nitrógeno y oxígeno (como el aire) nunca se separa en nitrógeno u oxígeno puros cuando se les deja solos. (Çengel & Boles, 2012)

2.2.3. *Energía libre de Gibbs*

Podríamos utilizar la expresión matemática $\Delta S_{univ} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{altrd} > 0$ como criterio básico de espontaneidad (cambio espontáneo), pero encontraríamos que es muy difícil de aplicar. (Petrucci, Geoffrey, Madura, & Bissonnette, 2011)

Para evaluar una variación de entropía total ΔS_{univ} , siempre tenemos que evaluar ΔS para los alrededores. En el mejor de los casos este proceso es tedioso, y en muchos casos ni siquiera es posible porque no podemos describir todas las interacciones entre un sistema y sus alrededores. Seguramente sería preferible tener un criterio que se pudiera aplicar al mismo sistema, sin tener que preocuparse de los cambios que se producen en los alrededores. (Petrucci, Geoffrey, Madura, & Bissonnette, 2011)

Para desarrollar este nuevo criterio vamos a examinar un proceso hipotético que se produce a temperatura y presión constante y con el trabajo limitado a trabajo presión volumen.

Este proceso va acompañado de un efecto calorífico, q_p , que es igual a ΔH para el sistema (ΔH_{sis}). El efecto calorífico experimentado por los alrededores es el opuesto al del sistema: $q_{altr} = -q_p = -\Delta H_{sist}$. Además, si los alrededores hipotéticos son suficientemente grandes, el proceso por el que el calor entra o sale de los alrededores puede hacerse reversible. Es decir, puede hacerse que la cantidad de calor produzca solo un cambio infinitesimal en la temperatura de los alrededores. En este caso, de acuerdo con la ecuación: (Petrucci, Geoffrey, Madura, & Bissonnette, 2011)

$$\Delta S = \frac{q_{rev}}{T}$$

La variación de entropía en los alrededores es:

$$\Delta S_{arl} = -\frac{\Delta H_{sis}}{T}$$

Ahora sustituimos este valor de ΔS_{arl} en la Ecuación.

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores}$$

A continuación, multiplicamos por T para obtener:

$$T\Delta S_{univ} = T\Delta S_{sist} - \Delta H_{sis} = -(\Delta H_{sis} - T\Delta S_{sist})$$

y después multiplicar por -1 (cambio de signo).

$$-T\Delta S_{univ} = \Delta H_{sis} - T\Delta S_{sist}$$

El significado de la ecuación descrita es el siguiente: los términos del lado derecho de la ecuación implican únicamente al sistema. En el lado izquierdo aparece el término

$$\Delta S_{univ},$$

que engloba el criterio de cambio espontáneo: para que un proceso sea espontáneo,

$$\Delta S_{univ} > 0. \text{ (Petrucci, Geoffrey, Madura, \& Bissonnette, 2011).}$$

La Ecuación descrita generalmente se expresa en una forma algo diferente, que requiere introducir una nueva función termodinámica denominada energía Gibbs, G (también denominada energía libre). La energía Gibbs para un sistema se define mediante la ecuación: (Petrucci, Geoffrey, Madura, & Bissonnette, 2011)

$$G = H - TS$$

2.2.4. Nylon

Las poliamidas sintéticas alifáticas (nylon) se forman como productos de la condensación de monómeros lineales bifuncionales, y se obtienen básicamente por condensación de aminoácidos (nylons N) o por condensación de diaminas y diácidos (nylons N,M). En la industria, la síntesis de estos compuestos se realiza, en lo posible, mediante policondensación térmica en masa fundida. Sin embargo, este método requiere de condiciones especiales para obtener pesos moleculares elevados: los componentes deben encontrarse en una relación estequiométrica rigurosa, no deben producirse reacciones secundarias y el equilibrio debe desplazarse, por eliminación del agua formada, hasta lograr elevadas conversiones. Todo ello hace que en el laboratorio se opte por la policondensación en disolución o interfacial a

temperaturas moderadas, más simples en cuanto a técnica se refiere, aunque más caras por los grupos funcionales que son necesarios para lograr la amidación a baja temperatura. (Argun & Kargi., 2011)

La producción biológica de hidrógeno a partir de residuos orgánicos es una alternativa interesante ya que presenta bajos costos de operación y materia prima, ya que se está utilizando un residuo que de cualquier manera deberíamos tratar previo a su disposición final. (Blanco Londoño & Rodríguez Chaparro, Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011), 2012).

Existen varios de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, los más conocidos tenemos:

- **Reactor discontinuo.** Es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido.
- **Reactor continuo.** Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- **Reactor semicontinuo.** Es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continuo.
- **Reactor tubular.** En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. (Valero, y otros, 2005)

Las siguientes consideraciones son condiciones de suma importancia al seleccionar o diseñar fermentadores para procesos controlados:

- El envase o contenedor en donde se realizará la fermentación debe ser capaz de ser operado asépticamente durante el tiempo en que la operación se realice.

- Las condiciones anaerobias deben realizarse de forma que se cumplan con los requerimientos metabólicos del microorganismo utilizado.
- El consumo de energía debe ser tan bajo como sea posible.
- El diseño del envase debe considerar un fácil manejo para las operaciones de limpieza y mantenimiento. Las paredes del envase deben ser pulidas, es decir, no deben tener porosidad que dificulte la limpieza y sanitación.
- Los materiales de construcción deben ser resistentes a los compuestos que se generen durante el proceso y a la materia prima, sales, ácidos o bases que se añadan. (Sotelo Navarro, 2017)

2.2.5. Nylon en la construcción de prototipos

2.2.5.1. Condiciones para la construcción de equipos aplicando nylon como principal material

Los materiales de construcción de equipos a base de nylon, en el proceso de mecanizado, deben ser girados igual que un material de corte libre, usando altas velocidades de 600 a 1000 pies superficiales por minuto, con cortes de desbaste pesados a velocidades de alimentación de 0,010” a 0,020” (0,025 mm a 0,50 mm) por revolución para grandes diámetros y de 0,003” a 0,007” (0,08 a 0,18 mm) para diámetros más pequeños, debido a la deflexión y la expansión durante el proceso de eliminación del material. (Cast Nylons, LTD, 2019). En el paso final, se recomiendan cortes ligeros de 1/16” a 1/8” de profundidad y alimentaciones ligeras de 0,003 a 0,007 pulgadas por revolución, recomendando que si es posible el paso de acabado se realice con un período de relajación de 24 horas si es posible. Sin embargo, se pueden lograr resultados de giro satisfactorios usando cortes de desbaste hasta 3/8” de profundidad y alimentaciones de 0,015” por revolución. (Cast Nylons, LTD, 2019)

2.2.5.2. Condiciones de las herramientas a aplicar en la utilización de la construcción con materiales de nylon

Se sugieren herramientas afiladas y/o afiladas con altos ángulos de rastrillo y altos ángulos para minimizar las fuerzas de corte, torneado, taladrado, revestimiento o fresado. Las herramientas

hechas de acero para herramientas de alta velocidad son generalmente adecuadas para girar materiales de construcción a base de nylon; las herramientas con punta de carburo pueden usarse para carreras de producción más largas si las herramientas están afiladas a un borde muy afilado ($<.010$ “). (Cast Nylons, LTD, 2019)

2.2.6. Procedimiento de construcción con la aplicación de materiales a base de nylon

2.2.6.1. Fresado de materiales de nylon

Las velocidades de corte de 1000-4000 pies superficiales por minuto, con velocidades de alimentación rápidas de $0,010$ “a $0,020$ ” por diente de corte combinado con profundidades pesadas de corte se usan comúnmente en materiales de nylon. Las fresas de inserto intercambiables diseñadas para metales no ferrosos son recomendadas en general, los cortadores de mosca pueden usarse y funcionar bien, pero son significativamente más lentos debido a la tasa de eliminación de material. (PFERD, 2010)

Las fresas deben ser afiladas y tener ángulos de corte positivos altos y ángulos de rastrillo altos. Para las operaciones de fresado, la pieza de trabajo debe estar completamente apoyada durante todas las operaciones en la fresadora. Cuando se requiere sujeción es importante tener cuidado para evitar la deformación de la pieza de trabajo. (Márquez Orozco)

2.2.6.2. Corte con sierra o disco de materiales de nylon

Los materiales formados por nylon se pueden cortar en máquinas de corte de madera estándar usados en carpintería o en máquinas de trabajo de metal y sierras circulares. Las hojas o discos usados deben tener dientes muy espaciados que estén desplazados (izquierda, derecha y centro) y deben contar con un esófago profundo. Esto asegurará que el diente de la pala salga más lejos que el cuerpo de la sierra y brinda a las virutas un lugar para sentarse mientras que es forzado a salir. La evacuación del chip inmediatamente ayudará a evitar el pinzamiento/unión del material en la cuchilla debido a la acumulación de calor del material. Esto se hace comúnmente mediante el uso de una manguera de refrigerante de aire o semisintético. (Cast Nylons, LTD, 2019)

2.2.6.3. Perforación con sierra o disco de materiales de nylon

La perforación es la más difícil de todas las operaciones de maquinado de Nylon debido al espacio confinado en que operan los taladros y la mala conducción de calor del Nylon. Los

herramientales y procedimientos adecuados, sin embargo, eliminarán problemas tales como la encía, la superficie del orificio derretido, el agrietamiento y la posible fractura de la pieza.

Los taladros estándar de torsión se pueden utilizar satisfactoriamente, los taladros espirales lentos con áreas más grandes en las ranuras proporcionan una trayectoria más clara para el flujo de la viruta (canal para el desalojo del material perforado). Para obtener mejores resultados, utilice un taladro nuevo y modifique la punta para adelgazar el área de la banda y proporcione un ángulo de inclinación positivo de 0 a 5 grados en el labio de corte. (PFERD, 2010)

Un ángulo de punto de perforación de 90-110 grados es mejor para brocas pequeñas (menos de $\frac{1}{2}$ “), mientras que un ángulo de punto de 118-120 grados es mejor para brocas más grandes (más de $\frac{1}{2}$ ”). Todas las brocas deben tener un ángulo de alivio del labio de 10 a 15 grados. Los taladros estándar usados anteriormente para metales nunca deben ser usados para Nylon. El uso de refrigerantes, como los semi-sintéticos mediante inundación o rocío de niebla, junto con la retirada frecuente del taladro (perforación de 35ioh) son esenciales para las operaciones de perforación acertadas. (Cast Nylons, LTD, 2019). Una buena guía para la perforación de 35ioh es tirar de la broca fuera del agujero después de perforar a una profundidad no más de $\frac{1}{2}$ veces el diámetro del taladro. Al perforar orificios grandes o profundos comience con un taladro pequeño (máximo $\frac{1}{2}$ “de diámetro) perforado a una velocidad de 800 a 900 rpm y una velocidad de alimentación de 0,005”. (Cast Nylons, LTD, 2019). El área de la banda y el labio de corte deben ser triturados para evitar el “agarre” y el agrietamiento por tensión. Abrir el orificio a 1” siguiendo los mismos procedimientos, pero usando una velocidad de perforación de 400-500 rpm. Y utilizar cantidades generosas de refrigerante para cada operación. (Cast Nylons, LTD, 2019)

2.2.6.4. Limado o escariado de materiales de nylon

Siempre que sea posible, deben usarse escariadores del tipo de expansión, y las velocidades del escariador deben aproximarse a las usadas para la perforación (250 a 450 pies por minuto). Las velocidades de alimentación deben estar entre 10 y 20 mils por revolución. Puesto que es difícil de quitar menos de 0,002 pulgadas durante el fresado, es mejor dejar al menos 0,005 pulgadas para el fresado final. Esto proporcionará una “mordida” para el escariador y asegurará el corte exacto. (PFERD, 2010)

2.2.7. Sensor

Es un dispositivo que está capacitado para detectar estímulos externos o acciones. Son capaces de transformar magnitudes físicas y químicas en señales eléctricas para que puedan ser cuantificables. (HANWEI ELETRONICS CO.,LTD, 2019)

2.3. Fundamentación teórica

2.3.1. Residuo

Es un material proveniente de procesos industriales o domésticos, este puede estar en distintos estados; sólido, líquido y en forma de gas. Para la producción este utiliza como sustrato lodos residuales de textileras que es óptimo para la producción de biohidrógeno. Los azúcares simples como glucosa, lactosa y sacarosa están presentes en muchos efluentes industriales y también pueden ser obtenidos a partir de desechos agrícolas. Se pueden encontrar grandes contenidos de almidón y celulosa en desechos agroindustriales. (Litardo López, 2014). Los desechos de las industrias de alimentos poseen gran contenido de carbohidratos en forma de azúcares simples, almidón y celulosa que pueden ser utilizados en la producción de biohidrógeno (Bedoya, et al. 2008).

2.3.2. Reactor

Es el equipo capaz de desarrollar una reacción química en su interior. Son un sistema complejo de operaciones unitarias, también en su interior ocurre un cambio debido a la reacción química entre dos o más reactivos. Están diseñados para maximizar la conversión y selectividad de la reacción con el menor costo, tiempo, y mayor eficiencia posibles. Entre las variables que deben de controlarse son las presión, temperatura, volumen y tiempo. (Buitrón Méndez & Carvajal Monroy, 2009). Dentro del tabla 4-2. podemos establecer un resumen de los antecedentes existentes en la bibliografía.

2.3.3. Diseño de prototipos

Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse.

El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo. También es un proceso de toma de decisiones. Fases e interacciones del proceso de diseño ¿Qué es el proceso de diseño? ¿Cómo comienza? ¿El ingeniero simplemente se sienta en la silla de su escritorio con una hoja de papel en blanco y anota algunas ideas? ¿Qué sucede después? ¿Qué factores influyen o controlan las decisiones que deben tomarse? Por último, ¿Cómo termina el proceso de diseño? El diseño conlleva la ejecución de diversas etapas integradas, buscando satisfacer un objetivo inicial. (Gutiérrez, 2003).

Como se puede verificar en el cuadro siguiente, la utilización de materiales metálicos garantiza una alta resistencia al desgaste y a las cargas dentro de los equipos. Pero su construcción está limitada a geometrías no complejas y el costo de los materiales utilizados es relativamente alto. La aplicación de envases cerámicos o de vidrio en la construcción de los equipos de experimentación genera que sean ampliamente resistentes al desgaste e inertes a los componentes que albergan dentro de los procesos de tratamiento biológico, por su naturaleza resultan frágiles y de compleja construcción.

El aplicar materiales plásticos en la construcción de los reactores facilita el diseño de partes complejas, en vista a que se dispone de impresiones 3D que facilitan la construcción de los equipos y favorecen a la economía de estos, siendo los materiales más pertinentes para la investigación.

Tabla 4-2: Antecedentes investigativos referentes al tipo de reactor utilizado y los materiales aplicados en la construcción de este.

TIPO DE REACTOR/ TIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	PUBLICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Reactor Continuo. Metal.	Producción de biohidrógeno en un reactor continuo. (Morales Hernandez, Rizo Acosta, & Hernandez Rojas, 2015)	Generación continua de biogás. Gran resistencia al desgaste y a las cargas producto de la operación.	Costo de construcción muy elevado. Requiere de 60 días para establecer las condiciones adecuadas de operación.
Reactor Continuo. Polímeros.	Efecto de la configuración de reactores anaerobios de alta tasa en la producción de hidrógeno: biomasa fija y UASB-híbrido. (Hernández Avilés, Grisales Penagos, & Rodríguez Chaparro, 2016)	Gran capacidad de variabilidad de las condiciones de operación y de la modificación de las variables de tratamiento.	Complejidad en el sellado de cada una de las partes del equipo para evitar fugas del gas generado. Construcción muy poco resistente en vista a que el ensamblaje de esta resultó muy empírico.
Reactor de tanque agitado. Metal	Producción de hidrógeno en sistemas continuos a partir de hidrolizados enzimáticos de bagazo de Agave tequilana Weber (Contreras Dávila, 2015)	Alta producción de hidrogeno con una tasa de alimentación continua de las corrientes de materia prima e insumos enzimáticos.	Altos costes de producción. Complejidad en el sellado del equipo para la recolección del hidrógeno.
Reactores UASB. Metal	Estudio de la producción de hidrógeno en reactores UASB a partir de lodo granular. (Jasso Salcedo, 2010)	Producción de hidrógeno continua. Alta capacidad de tratamiento.	Complejidad en la construcción del banco de reactores. Costes de construcción muy elevados.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipos y diseño de investigación

A razón de la naturaleza del problema de investigación (poca información de reactores prototipo para la investigación del tratamiento biológico de los lodos residuales de la industria textil por fermentación oscura), se estableció que la presente investigación sea una tipología experimental con un alcance exploratorio, con lo cual se pudo establecer el proceso sistemático que permitió el cumplimiento de los objetivos planteados, el diseñar un reactor prototipo para el tratamiento de lodos residuales provenientes de industrias y generar subproductos energéticos.

3.2. Métodos de investigación

Se aplicó el método Cuantitativo – Científico para la ejecución de la presente investigación, a razón que la validación del equipo (comprobación de la idoneidad del diseño en la función deseada, es decir, en el tratamiento de los lodos residuales por vías de fermentación oscura) requirió de una adecuada recolección y procesamiento de datos del proceso de tratamiento de la muestra de lodos residuales, para la posterior comprobación de las hipótesis del diseño, simulación y experimentación del reactor prototipo.

3.3. Enfoque de la investigación

El enfoque con que se desarrolló la presente investigación fue de carácter cuantitativo, ya que, en las etapas de diseño, construcción y la validación del reactor prototipo fueron ejecutadas mediante operaciones de recolección de datos cuantitativos mediante una placa de arduino y su información fue almacenada en un procesador de escritorio. Para su procesamiento e interpretación, en la etapa de validación del equipo, se utilizaron los datos registrados a través de los sensores aplicados en el equipo, los cuales valoraron las concentraciones del gas producido en los procesos de fermentación oscura, esencialmente la generación de metano e hidrógeno.

3.4. Alcance de la investigación

En vista a la profundidad de la investigación, el alcance de esta fue de carácter Exploratorio – Descriptivo, ya que dentro de los objetivos planteados se buscó la generación de conocimiento

referente al problema de investigación, es decir, la determinación del dimensionamiento del reactor prototipo, las condiciones de operación y el comportamiento del tratamiento de los lodos por medio de la fermentación oscura en la estabilización de lodos residuales de la industria textil en el laboratorio de Grupo de Energías Alternativas y Ambiente.

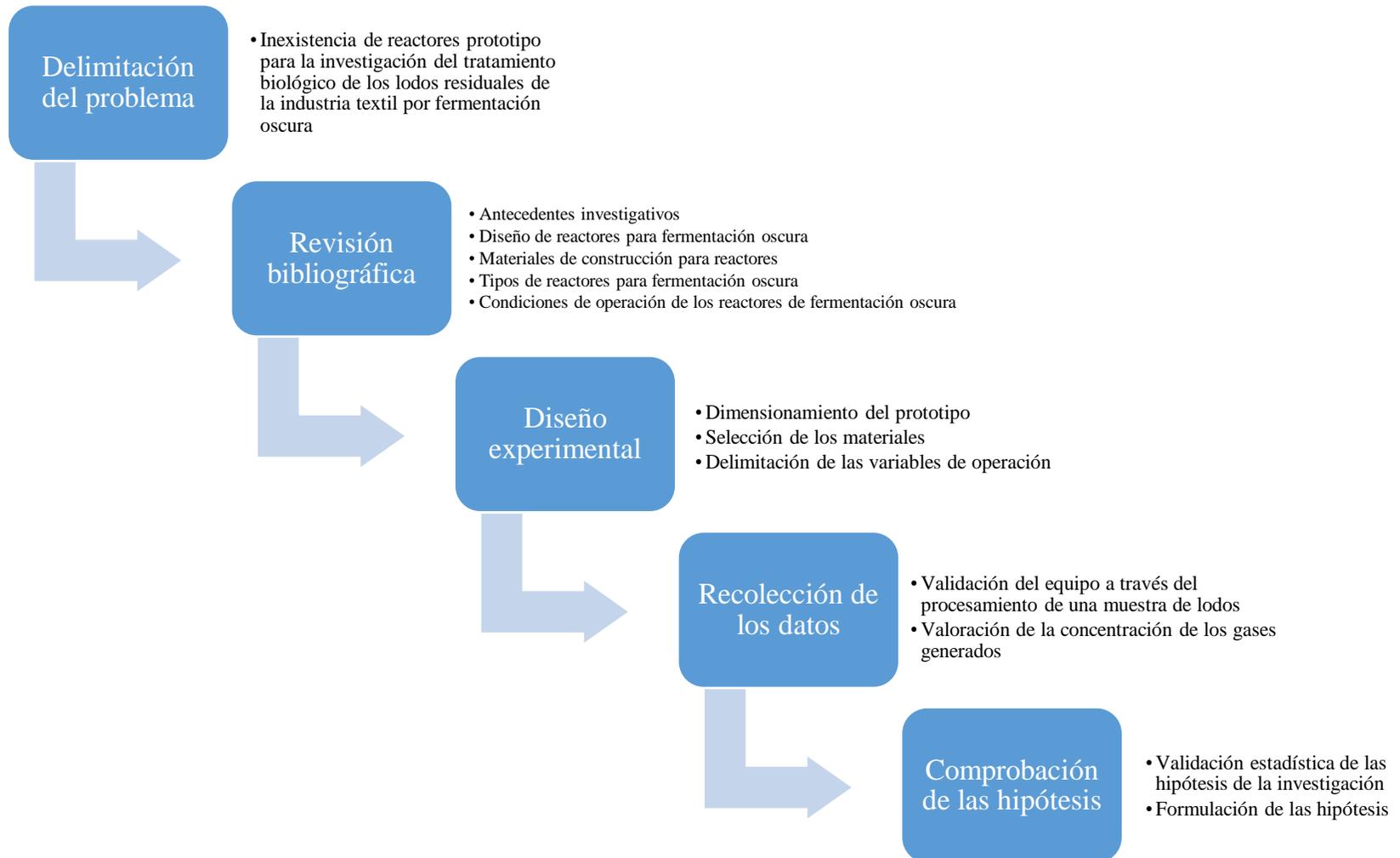


Figura 1-3 Esquema del proceso sistemático con el cual se ejecutó la investigación.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.5. Población y muestra de estudio

3.5.1. Población

En vista a que la presente investigación se basó en el diseño de un reactor prototipo para la experimentación en los tratamientos de lodos por fermentación oscura, resultó pertinente el análisis bibliográfico de los estudios relacionados con el problema de investigación, es por ello que se determinó como población de estudio las diversas alternativas de diseño de reactores prototipo para el tratamiento de los lodos provenientes de la industria textil por medio de la fermentación oscura, logrando la obtención de biohidrógeno que registra una concentración alta con relación a la del metano. Dentro de la tabla 1-3., se pone de manifiesto un resumen de las diferentes alternativas de diseño de reactores basados en fermentación oscura y los principales materiales de construcción.

3.5.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis para la ejecución de la presente investigación estuvo conformada por las muestras de los lodos residuales generados en una industria textil utilizadas en el laboratorio del Grupo de Energías Alternativas y Ambiente, las cuales fueron posteriormente caracterizadas y tratadas dentro del prototipo reactor de fermentación oscura.

Tabla 1-3: Alternativas de diseño y materiales de construcción de reactores prototipo basados en fermentación oscura.

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	CRITERIOS DE DISEÑO SELECCIONADOS PARA LA INVESTIGACIÓN
Tipo de reactor			
Continuo	Genera las mayores tasas de producción de biogás	Se requiere de grandes dimensiones para alcanzar los tiempos de residencia requeridos para iniciar la producción del biogás	No se ha seleccionado un reactor de tipo continuo en vista a que para los procesos de experimentación su operación resulta compleja, lo cual se contradice con lo establecido inicialmente como criterio de diseño principal para el prototipo objeto de la presente investigación.
Semicontinuo	Genera tasas de producción aceptables	Requiere de equipamiento e instalaciones complejas	No se ha establecido el reactor de tipo semicontinuo en vista a que las instalaciones donde fue establecido no presentaban las condiciones requeridas para dicho tipo de reactor.
Intermitente	Favorece la experimentación y el mayor control de las condiciones de operación. Equipos compactos.	Genera tasas de producción bajas	Se estableció como tipo de reactor el correspondiente a intermitente, en vista a que favorece los procesos de investigación, principal finalidad con la que fue diseñado.

Tipos de material

Metálicos (acero inoxidable)	Presentan una alta resistencia al desgaste y a cargas extremas y a las condiciones de operación extremas (temperaturas y presiones altas).	La construcción de equipos con dicho material resulta costosa y requiere de procesos complejos de manufactura.	No se seleccionó metal como principal elemento de construcción en vista a que no se disponían de los medios para la construcción del reactor. Las condiciones de operación y volumen del reactor no representaban cargas que requieran la utilización de un material de alta resistencia.
Cerámicos (vidrio)	Presentan una alta estabilidad respecto de los componentes generados durante el tratamiento.	Baja resistencia a cargas extremas, presentan cierta fragilidad. No favorecen a las condiciones de la fermentación oscura	En vista a que la principal finalidad del reactor prototipo estuvo establecida en base a la ejecución de experimentación no resultó pertinente la utilización de cerámicos como principal material de construcción, debido a la fragilidad de sus componentes y además, que no favorecen los procesos de fermentación oscura.
Plásticos (nylon)	Facilitan la construcción de diseños complejos por medio de la impresión a través de filamentos plásticos o el mecanizado en nylon.	Baja resistencia a condiciones extremas de operación (altas temperaturas o presiones)	Se seleccionó como principal material de construcción un polímero a base de nylon, por las dimensiones del prototipo, su construcción resultaba factible frente a los restantes materiales citados.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.5.3. Construcción del prototipo

La construcción del prototipo se realizó en el taller de mecanizado de la Facultad de Mecánica en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Para el proceso de mecanizado, impresión y armado del equipo se cumplieron las siguientes normas de laboratorio:

- Conocer la ruta de evaluación en caso de emergencia.
- Utilizar ropa adecuada y equipo de protección necesario.
- Respetar las señales de seguridad.
- No activar las máquinas sin presencia del docente.
- No asentar herramientas sobre elementos rotatorios
- Utilizar herramientas adecuadamente
- Verificar las conexiones de energía eléctrica
- Mantener el orden y el aseo dentro del taller

Como se puede verificar dentro del cuadro anterior, dentro de las diferentes alternativas de diseño y construcción para los reactores prototipito, las consideraciones de diseño más pertinentes están representadas por las siguientes, las cuales fueron establecidas para la ejecución de la experimentación:

- Reactor por batch
- Material de construcción en polímero (nylon)
- Construcción por mecanizado e impresión 3D
- Pretratamiento de los lodos con radiación
- Proceso únicamente por fermentación oscura

Se procedió al dimensionamiento de este con el software Solid Works 2018, la selección de la geometría del cuerpo principal del reactor fue cilíndrico ya que trabaja de forma vertical, el material que se va a utilizar es el Grillon Nylon y los sensores a ser aplicados para la recolección de los datos son MQ4 y MQ8 para metano e hidrógeno respectivamente.

3.5.4. Selección de la geometría del reactor

La geometría seleccionada para la construcción del reactor fue de tipo cilíndrica, ya que dicha forma permite la eliminación de zonas con cortocircuitos, zonas muertas y la estratificación de la concentración de los componentes. Además al correcto mezclado de los reactantes, la

distribución homogénea de la presión de los gases generados, la adecuada hermeticidad del reactor y su mecanización.

3.5.5. Selección de los materiales para la construcción del prototipo

En vista a que el reactor prototipo debía cumplir como principal criterio de construcción que sea químicamente resistente a los principales componentes que albergaría en el tratamiento de los lodos y que su construcción sea relativamente económica para poder ser replicada en diferentes medios para la experimentación con la fermentación oscura, se seleccionó como material de construcción un polímero, específicamente Nylon LAMIGAMID 100 PA 6; en vista a que dicho material favorece ampliamente a los procesos de construcción por mecanizado y por impresión 3D con que posteriormente sería conformado el prototipo.

El material seleccionado (Nylon LAMIGAMID 100 PA 6) para la construcción del reactor prototipo presentó (en base a la ficha técnica del mismo) una densidad de 1,14 g/cm³, su rango de temperatura de operación fue de -40 a 100 grados centígrados, lo cual favorece su utilización dentro de autoclaves para el proceso de esterilización del reactor previo a la ejecución de cada investigación o tratamiento de los lodos.

3.5.6. Dimensionamiento del reactor prototipo

Mediante el software de diseño mecánico para el proceso de fermentación oscura, previo a la construcción del mismo, se procedió al cálculo de las resistencias mecánicas, específicamente con la aplicación de Solid Works versión 2018, teniendo las siguientes propiedades, estableciéndose como las principales características del material a utilizar dentro de los parámetros de dimensionamiento, las cuales fueron Masa: 0.65857 kg; Volumen: 0,000572669 m³; Densidad: 1150 kg/ m³; Peso: 6,45399 N; Detalles de carga: 220 psi.

Se procedió a la realización de un análisis estático tipo malla sólida, con un modelo isotrópico elástico líneas (correspondiente al tipo d Nylon aplicado en la construcción del equipo, el cual presento un límite elástico de $6 \cdot 10^7 \frac{N}{m^2}$, un límite de tracción igual a $7,92897 \cdot 10^7 \frac{N}{m^2}$; un módulo elástico igual a $1 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$; un coeficiente de Poisson igual a 0.3; con una densidad igual a $1150 \frac{Kg}{m^3}$ y un coeficiente de dilatación térmica de $1 \cdot 10^{-6} /K$), considerando el efecto térmico (en vista a que se ha diseñado el equipo bajo un esquema modular, es decir, que puedan incorporarse unidades de experimentación como calefactores para modificar las temperaturas del tratamiento).

Para la determinación de las cargas y sujeción se consideró que el reactor operaría de manera vertical soportado por la base de este, registrándose los resultados descritos dentro de la figura 2-3.

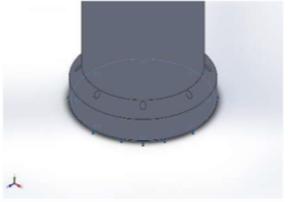
Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.0264364	0.0940971	-0.0330488	0.103176
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Figura 2-3 Sujeciones del reactor en posición vertical.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

En vista a que producto del tratamiento de los lodos residuales se obtiene como principal producto biohidrógeno y metano, los cuales serán acumulados durante el tiempo de residencia total, generando que la presión del interior del reactor incremente es por ello que se establecieron los datos descritos dentro de la figura 3-3.

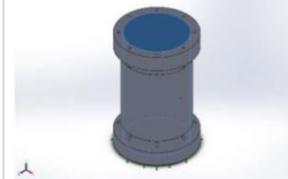
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
Presión-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: 220 Unidades: psi Ángulo de fase: 0 Unidades: deg		

Figura 3-3 Carga de trabajo en la presión interior.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Para la simulación del comportamiento mecánico del cuerpo principal del reactor se utilizó una malla solida de tipo estándar con 4 puntos jacobianos, un tamaño de elementos igual a 6,4335 mm (en base al dimensionamiento del reactor) y una tolerancia igual a 0,321675 mm con una calidad de malla relacionada con elementos cuadráticos de alto orden, reportándose un total de 252786 nodos y 160765 elementos, un coeficiente de aspecto igual a 8,1349, como se ilustra en la figura 4-3.

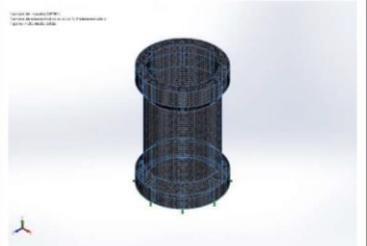
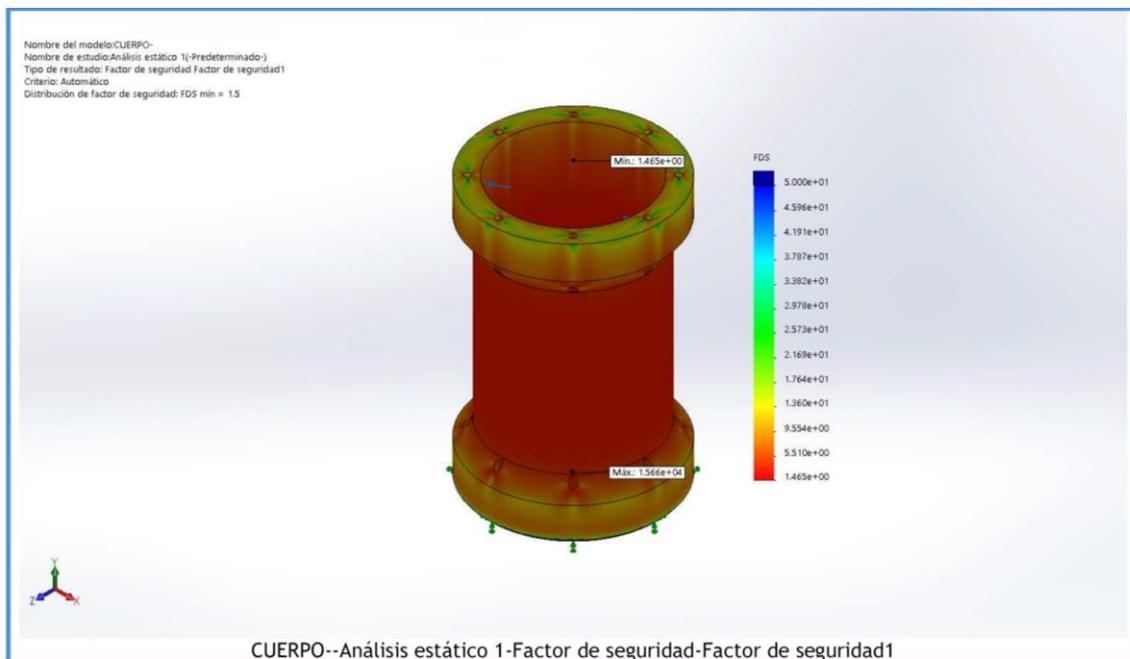
Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 Sólido(s) Unidades: mm Tamaño: 2.9782 Coficiente: 1.5

Figura 4-3 Información sobre el control de la malla.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

A continuación se muestra el factor de seguridad que se debe tomar en cuenta, mediante la simulación en el software Solid Works 2018.



Nombre	Tipo
Desplazamientos1{1}	Deformada

Figura 5-3 Resultados del estudio.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.5.7. Mecanizado

La barra sólida cilíndrica, de la cual se partió para el mecanizado del cuerpo principal del reactor, presentó un diámetro externo igual a 130 mm; principalmente a razón de que comercialmente dicha barra se ajustaba en mayor medida a las dimensiones esperadas del reactor en base al diseño propuesto.

El mecanizado del cuerpo tipo cilíndrico se realizó en el torno hasta alcanzar un diámetro exterior igual a 90mm. Para sellar el cuerpo de reactor se utilizó un sistema de cierre tipo brida (el cual favorece a la hermeticidad del reactor y a la recolección adecuada de los gases generados), con 8 perforaciones para asegurar el sellado apropiado. Se aplicó un ajuste con juego móvil para favorecer la apertura y cierre del reactor al finalizar e iniciar la carga de este, incorporando un sistema de apoyo de oring plástico de 2mm, como se muestra dentro de la figura 6-3.



Figura 6-3 Proceso de mecanizado del cuerpo principal del reactor prototipo.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Se procedió el corte por desbaste de las partes principal de la tapa y cuerpo cilíndrico, aplicando un vaciado con acabado superficial del tipo N6, como se muestra dentro de la figura 7-3.



Figura 7-3. Cuerpo del reactor posterior al mecanizado.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Posteriormente se procedió al desbastado con calidad tipo N4 para los elementos exteriores, además se realizó el perfil angular de la tapa a 45 grados e implementado una abertura para el paso de los cables de los sensores para la recolección de los datos. Para el mecanizado de los principales componentes del prototipo se utilizaron las siguientes herramientas, como se muestra en la figura 8-3:

- Contrapunto
- Porta cuchilla con llave
- Porta broca con llave
- Llave de torreta
- Llave de mandril
- Calibrador
- Broca de centro
- Llave de hexagonal de ½

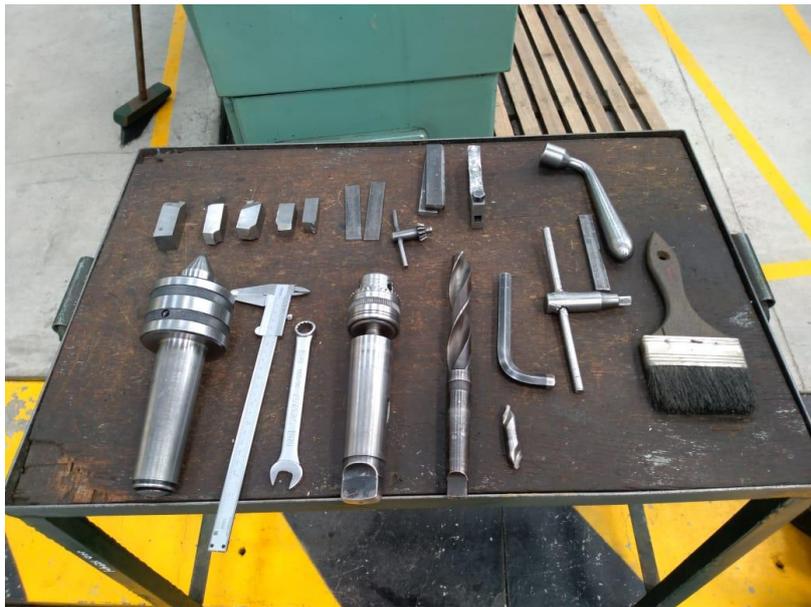


Figura 8-3 Conjunto de herramientas mecánicas aplicadas en la construcción del reactor.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.5.8. Armado del reactor prototipo (hermeticidad)

Para generar las perforaciones necesarias para los diferentes componentes del reactor se utilizó una fresadora convencional. Para el ajuste de la tapa se utilizó espárragos de ¼ de pulgada y

alojamientos donde se sientan los pernos $\frac{1}{4}$ de pulgada, sellando la tapa con arandelas planas y de presión $\frac{1}{4}$ de pulgadas. En la tapa se realizó 2 perforaciones enroscadas y machueladas para la conexión de acoples de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro para la salida y purga del gas, en vista a que, para cada carga del reactor se debe proceder al purgado con nitrógeno, garantizando que los procesos de degradación microbiológica fueran principalmente de carácter anaerobio.

Los pernos de anclaje (espárragos de seguridad) fueron asegurados con rodela planas y arandelas de seguridad de roscas de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro. Los accesorios utilizados usados en la construcción del equipo fueron de acero inoxidable, garantizando de esta manera la resistencia de este dispositivo como se muestra en la figura 9-3.



Figura 9-3 Cuerpo del reactor con los accesorios para la hermeticidad de la cabeza del prototipo.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.5.9. *Recolección de los datos*

Para la fase experimental referente a la validación del equipo (la cual representó la determinación de la idoneidad del diseño en función a los criterios y objetivos establecidos) se procedió a la valoración de las concentraciones de los gases en diferentes fases del tratamiento a lo largo del procesamiento de una carga (muestra de lodo residual) proveniente de la industria textil. El adecuado diseño del equipo permitió el traslado y manipulación adecuada para la experimentación, función principal del mismo. Al proceder a la carga del equipo se realizó la purga de los gases con nitrógeno para generar las condiciones anaerobias requeridas en los procesos de fermentación oscura, como se muestra en la figura 10-3.



Figura 10-3 Instalación del sistema de recolección de datos (sensores) en la cabeza del reactor.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

El monitoreo de la concentración de los gases se realizó mediante sensores acoplados en la tapa del reactor y conectados a una placa tipo Microcontroladora Arduino (UNO), conectada a puertos analógicos que transformaron la señal hacia un tipo que pudiera ser interpretada por el software Arduino (IDE) para el almacenamiento y procesamiento de la información. Los datos recolectados por los sensores fueron enviados a una computadora portátil a través de un conector USB desde la placa Arduino. Por medio de la aplicación SCRIB en python se procedió al almacenamiento de los datos y tabulación de estos en base a la fecha y hora.

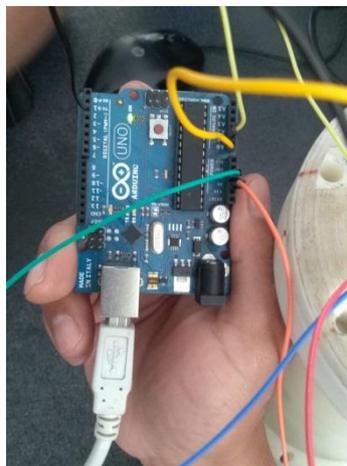


Figura 11-3 Sistema de comunicación de los datos recolectados.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.5.10. Irradiación del lodo como pretratamiento

En vista a que el proceso de tratamiento de los lodos residuales provenientes de la industria textil estuvo establecido, en la fase de diseño, para que genere principalmente hidrogeno frente a la del metano, se estableció que las corrientes a alimentar al prototipo sean previamente tratadas con radiación de una intensidad de 350 Gy, la cual fue realizada en la dirección de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares, con la Cooperación Técnica del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables.

3.6. Instrumentos para procesar los datos recopilados

Los datos recolectados fueron tabulados a través de MS Excel. Además, recolectados por los sensores del equipo ya que fueron directamente almacenados y procesados a través de la aplicación de una placa Arduino, la cual gestionó la recolección de los datos y su posterior procesamiento a un PC, a través del software de comunicación diseñado de manera específica para dicha operación, como se muestra dentro de la figura 12-3.



Figura 12-3 Sistema de recolección de datos.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

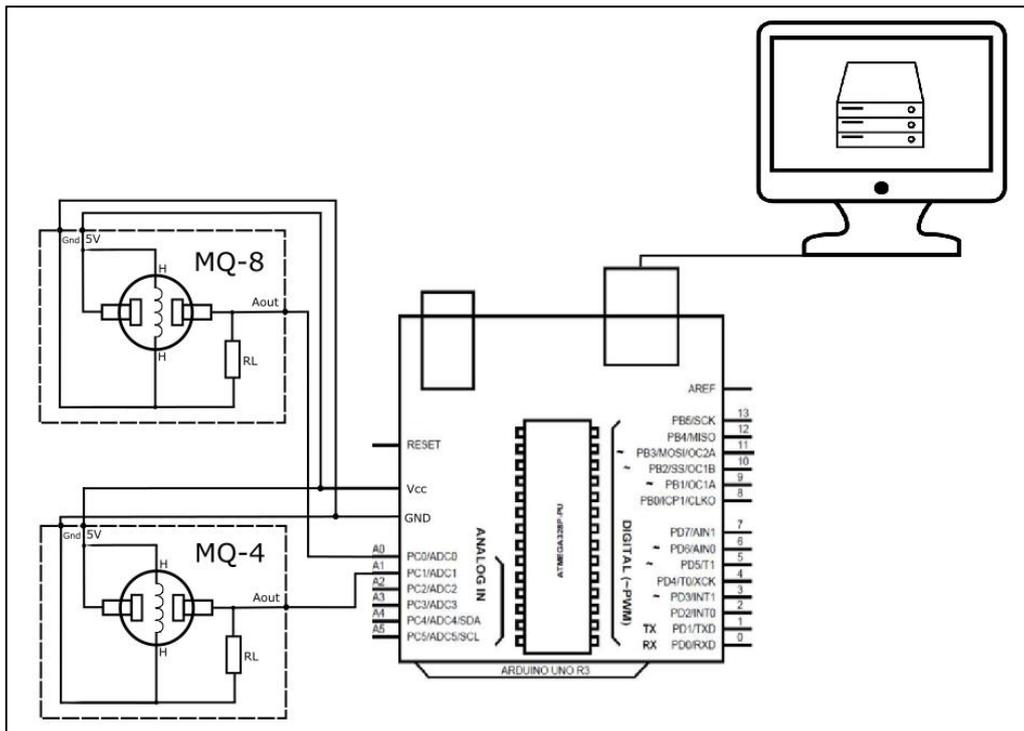


Figura 13-3 Esquema del circuito electrónico implementado en el reactor prototipo.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Se muestra en la figura 13-3 el diagrama de conexiones del sistema de adquisición de medición de presencia de gases de hidrogeno y metano. Cada sensor bajo la presencia de su respectivo gas genera una señal de voltaje medido a través de las entradas analógicas ADC0 y ADC1 de Arduino, mismo que convierte estas señales continuas a valores digitales bajo una resolución de 10 bits.

Los valores digitales comprendidos entre 0 y 1023, son enviados de Arduino uno, a través de comunicación USB, a una computadora que corre un script de Python el cual, recibe los valores medidos y los almacena en un archivo de texto anexando fecha y hora de adquisición.

Se detalla cada uno de los elementos presentes en el diagrama:

- Arduino UNO: placa de desarrollo y prototipado diseñada bajo el microcontrolador ATmega328P; dispone de 14 pines de entrada/salida digital, 6 entradas analógicas de 10 bits de resolución, un cristal de 16Mhz, conexión USB, conector jack de alimentación, terminales para conexión ICSP y un botón de reinicio. Gracias a su conexión USB y entradas analógicas, el dispositivo puede ser utilizado para el monitoreo de señales de sensores con señal continua.

- Sensor MQ-8, MQ-4: sensores con la capacidad de medir gas Hidrógeno y Metano respectivamente, contruidos a partir de SnO₂ que, bajo aire limpio, posee una baja conductividad.
- Ante la presencia de hidrógeno o metano en su respectivo sensor, la conductividad se incrementa con la concentración de gas en aumento que, con la ayuda de un circuito sencillo, convierte esta variación, en una señal de voltaje medible por instrumentos de adquisición de señales.
- Los sensores tienen una alta sensibilidad a la presencia de su respectivo gas, además, de poseer anti-interferencia a otros gases. Su bajo costo lo hace útil para varios tipos de aplicaciones.
- Arduino IDE: entorno de desarrollo integrado de software, para la programación de las placas de desarrollo de la familia Arduino, basado en el popular lenguaje de programación Processing y multiplataforma, brinda las herramientas básicas de edición, depuración y compilación requeridos para trabajar eficazmente con la familia de placas de la familia Arduino.
- Python es un lenguaje de programación interpretado que favorece e impulsa la sintaxis de un código legible y ordenado. Lenguaje de programación multiparadigma, soportando paradigmas como orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, dinámico y multiplataforma.

3.7. Procesamiento estadístico de los resultados

El procesamiento de los datos, para la correspondiente comprobación de las hipótesis, fue ejecutado mediante la aplicación del Software especializado SPSS 12.

3.7.1. *Curvas de calibración de los sensores tipo MQ*

Previo a la instalación de los sensores MQ en el prototipo generado en la presente investigación, se requirió, a través del oportuno análisis de la bibliográfico, comprender el comportamiento teórico de los mismos en la cuantificación de los gases de interés, revisando los parámetros operativos de mayor relevancia para los fines analíticos esperados, donde se puede verificar que la sensibilidad y umbral de operación se ajustó a las necesidades de análisis requeridas.

Los sensores aplicados en el equipo operan bajo la determinación de las variaciones de la resistencia de detección entre los detectores a razón del incremento de la concentración de los gases, transmitiendo la señal detectada a través de una corriente cuyo voltaje está en función de la concentración de los gases hasta la placa Arduino, en la cual, se procede a la transformación de esa señal a un dominio referente a la concentración de los gases (en ppm).

Para la correcta determinación de la concentración fue necesario realizar la calibración del sistema de detección, es decir, establecer la relación entre la concentración del gas y la variación de la resistencia en los detectores, para de esta manera, a través de la programación de la interfaz de comunicación entre la placa Arduino y la PC que permite la visualización de los datos, disponer de los valores de la concentración con la mayor exactitud y precisión posible.

Para realizar dicha operación referente a la calibración de los sensores se partió de datos experimentales disponibles en bibliografía revisada, donde se puede verificar las respuestas generadas en los detectores del sensor (expresadas en bajo la relación R_s/R_o , es decir, la relación entre la resistencia establecida en el sensor a razón de la diferencia de las concentraciones de los gases y la resistencia determinada en el sensor en aire sin los gases analitos) y la concentración de los gases, con lo cual se pudo determinar las curvas de calibración de cada gas y, a través de regresión, las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada uno de los sensores frente a la concentración conocida de los gases, obteniéndose las siguientes relaciones matemáticas.

Tabla 2-3 Parámetros de operación de los sensores comerciales tipo MQ-4 y MQ-8 para la valoración de la concentración de los gases generados.

SENSOR	SIMBOLOGÍA	PARÁMETRO	VALOR DE OPERACIÓN	OBSERVACIONES
MQ-4 Para valoración de CH ₄	Vc	Voltaje del circuito	5V±0.1	AC o DC
	Vh	Voltaje de calentamiento	5V±0.1	AC o DC
	Pl	Resistencia de operación	20KΩ	
	Rh	Resistencia de calentamiento	33 Ω ±5%	Temperatura ambiental
	pH	Consumo para el calentamiento	inferior a 750mw	
	Rs	Sensibilidad de la resistencia	10KΩ-60KΩ (1000 ppm CH ₄)	
	a (1000ppm/5000ppm CH ₄) Condiciones estándar de detección Tiempo de precalentamiento	Tasa de dependencia de la concentración	Temperatura: 20°C ±2°C Vc:5V±0.1 Humedad: 65%±5% Vh: 5V±0.1 Sobre las 24 h	≤0.6
MQ-8 Para valoración de H ₂	Ve	Voltaje del circuito	5V±0.1	AC o DC
	Vh	Voltaje de calentamiento	5V±0.1	AC o DC
	Pl	Resistencia de operación	10K-Ω	
	Rh	Resistencia de calentamiento	31 Ω ±5%	Temperatura ambiental
	Ph	Consumo para el calentamiento	inferior a 800mW	
	Rs	Sensibilidad de la resistencia	10KΩ-60KΩ (1000 ppm H ₂)	
	(1000ppm/500ppmH ₂) Condiciones estándar de detección Tiempo de precalentamiento	Tasa de dependencia de la concentración	Temperatura: 20°C +2°C Vc:5V±0.1 Humedad: 65%±5% Vh: 5V±0.1 Sobre las 24 h	≤0.6

Fuente: (HANWEI ELETRONICS CO.,LTD, 2019)

3.7.2. Curva de calibración para la detección del metano del sensor comercial tipo MQ-4

Se pudo establecer, a través de una regresión exponencial cuyo coeficiente de correlación fue igual a $R^2 = 0,999$, la siguiente relación matemática entre la concentración del metano y la señal generada en el sensor:

$$R_s/R_o = 12.695 \cdot [\text{CH}_4]^{-0.364}$$

Dónde:

- $[\text{CH}_4]$ = concentración de metano, en ppm
- R_s/R_o = señal generada en el sensor.

De la relación matemática anterior, a base de un procesamiento matemático oportuno, se estableció una relación que permitiese conocer la concentración del metano en base a la señal generada por el sensor, la cual se describe a continuación

$$[\text{CH}_4] = \left(\frac{12.695}{R_s/R_o} \right)^{2.747}$$

En base a lo establecido dentro de la información técnica de los sensores, se establece la siguiente relación matemática:

$$R_s = \frac{V_c - V_{out}}{V_{out}} \cdot R_l$$

Dónde:

- V_c = Voltaje del circuito del sensor.
- V_{out} = voltaje de salida del sensor al sistema de adquisición de datos.
- R_l = resistencia de la carga.
- R_s = resistencia del sensor.

Y en base a la relación matemática generada entre la concentración del gas analito y la resistencia registrada en el sensor, se estableció una ecuación que relacione la concentración del

gas y el voltaje generado como señal de salida en el sensor hacia el sistema de adquisición de datos, en vista a que, dicho sistema transforma el voltaje entregado por el sensor en la concentración del gas analito, la cual se describe a continuación:

$$[\text{CH}_4] = \left(\frac{12.695 \cdot V_{out} \cdot R_o}{(V_c - V_{out}) \cdot R_l} \right)^{2.747}$$

3.7.3. Curva de calibración para la detección del metano del sensor comercial tipo MQ-8

Se pudo establecer, a través de una regresión exponencial cuyo coeficiente de correlación fue igual a $R^2 = 0,9949$, la siguiente relación matemática entre la concentración del metano y la señal generada en el sensor:

$$\frac{R_s}{R_o} = 967,52 \cdot [\text{H}_2]^{-0.67}$$

De manera análoga a los procesos establecidos en el epígrafe anterior, se logró determinar una relación matemática que permita la determinación de la concentración del gas analito en base al voltaje de la señal generada por el sensor y entregada al sistema de adquisición de datos, la cual se detalla a continuación.

$$[\text{H}_2] = \left(\frac{967.52 \cdot V_{out} \cdot R_o}{(V_c - V_{out}) \cdot R_l} \right)^{1.493}$$

Tabla 3-3: Relación entre la resistencia determinada en los detectores de los sensores comerciales tipo MQ-4 y MQ-8 y la concentración de los gases analitos.

NUMERO DE ENSAYO	RELACIÓN RS/RO VS PPM DE METANO		RELACIÓN RS/RO VS PPM DE HIDROGENO	
	R_s/R_o	Concentración, (ppm)	R_s/R_o	Concentración, (ppm)
1	1,8	200	8,5	200
2	1,6	300	5	300
3	1,46	400	3,5	400
4	1,33	500	2,66	500
5	1,26	600	2	600
6	1,2	700	1,7	700
7	1,13	800	1,5	800
8	1,06	900	1,3	900
9	1	1000	1	1000
10	0,79	2000	0,37	2000
11	0,69	3000	0,2	3000
12	0,63	4000	0,15	4000
13	0,58	5000	0,095	5000
14	0,54	6000	0,07	6000
15	0,5	7000	0,05	7000
16	0,48	8000	0,04	8000
17	0,46	9000	0,025	9000
18	0,45	10000	0,03	10000

Fuente: (HANWEI ELETRONICS CO.,LTD, 2019).

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

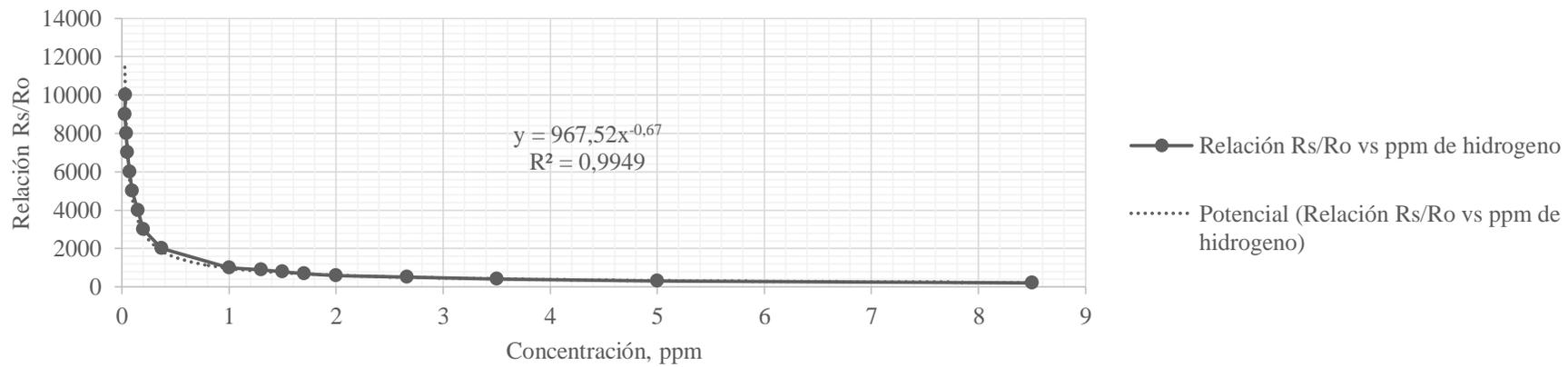
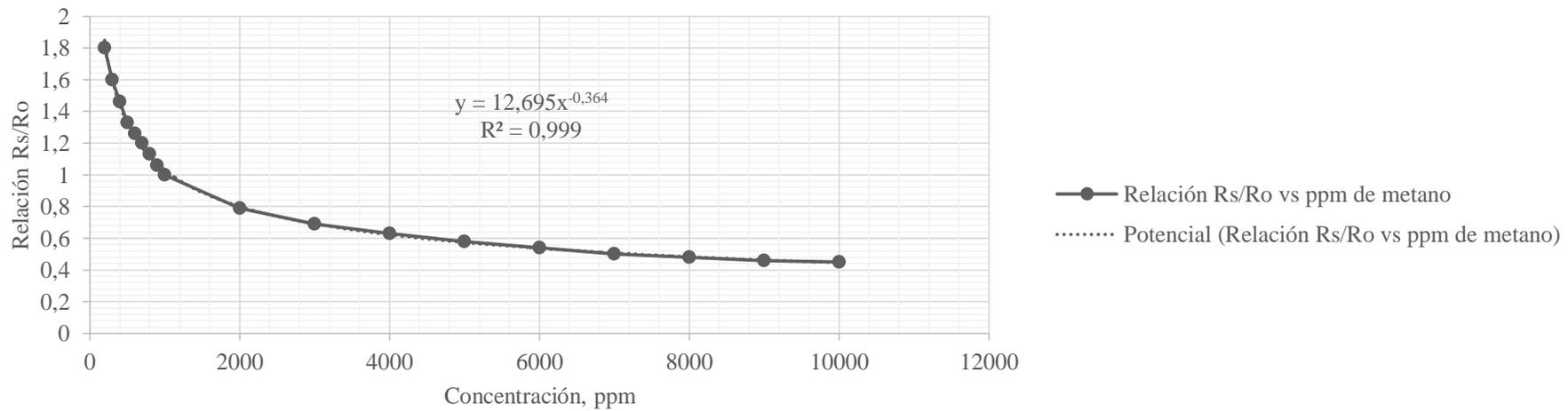


Gráfico 1-3: Curvas de calibración de los sensores comerciales tipo MQ-4 y MQ-8 en la determinación de los gases analitos.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

3.7.4. Análisis de la energía libre de Gibbs

Para poder establecer la espontaneidad de las reacciones involucradas dentro del tratamiento de los lodos por fermentación oscura, se analizó el valor de la energía libre de Gibbs de cada una de ellas, comprendiendo que los criterios para la interpretación de los valores de dicha variable son los siguientes:

- Si $\Delta G < 0$ (negativo), el proceso es espontáneo.
- Si $\Delta G > 0$ (positivo), el proceso es no espontáneo.
- Si $\Delta G = 0$ (cero), el proceso está en equilibrio.

Dentro de la tabla 4-3., se describen las reacciones que intervienen en la fermentación oscura la correspondiente evaluación de la espontaneidad, donde se puede constatar, en base a los resultados del valor de la energía libre de Gibbs y la obtención de biohidrógeno en las investigaciones revisadas, se puede indicar que los procesos de generación de biohidrógeno son posibles.

Tabla 4-3: Análisis del valor de la energía libre de Gibbs en las reacciones que se desarrollan durante el proceso de fermentación oscura.

PRODUCTO GENERADO	ΔG°	Espontaneidad
Acetato: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$	-206.0	Si
Butirato: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$	-254.0	Si
Propionato: $C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$	-279.4	Si
Lactato: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH + H^+$	-225.4	Si
Etanol: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$	-164.8	Si
Butirato: $2CH_3CHOHCOOH + 2H_2O \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2HCO_3^- + H^+ + 2H_2$	-56.3	Si
Valerato: $CH_3CH_2COO^- + 2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3(CH_2)_3COO^- + 4H_2O$	-143.3	Si
Capronato: $CH_3(CH_2)_2COO^- + 2CO_2 + 6H_2 \rightarrow CH_3(CH_2)_4COO^- + 4H_2O$	-143.3	Si
Propionato: $CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$	+76.2	No
Butirato: $CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$	+48.4	No
Lactato: $CH_3CHOHCOOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + HCO_3^- + 2H_2$	-4.2	Si
Etanol: $CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$	+9.6	No
Homoacetogenesis: $4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$	-104.0	Si
Hidrogeno: $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-135.0	Si

Acetato: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-31.0	Si
Formiato: $4\text{HCOOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-304.2	Si
Metanol: $4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-312.8	Si
Etanol: $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{CH}_3\text{COOH}$	-31.6	Si

Fuente: (Cruz Ramos, y otros, 2000)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diseño y mecanizado

Mediante el software de diseño mecánico para el reactor proceso a emplearse en fermentación oscura. Se procedió al cálculo de las resistencias mecánicas, específicamente con la aplicación de Solid Works versión 2018, teniendo los siguientes resultados, a utilizar dentro de los parámetros de dimensionamiento, las cuales fueron Masa: 0,65857 kg; Volumen: 0,000572669 m³; estableciéndose como las principales características del material Densidad: 1150 kg/ m³; Detalles de carga: 220 psi, valores de la ficha técnica del Nylon LAMIGAMID 100 PA 6.

Se procedió a la realización de un análisis estático tipo malla sólida, con un modelo isotrópico elástico líneas (correspondiente al tipo d Nylon aplicado en la construcción del equipo, el cual presento un límite elástico de $6 \cdot 10^7 \frac{N}{m^2}$, un límite de tracción igual a $7,92897 \cdot 10^7 \frac{N}{m^2}$; un módulo elástico igual a $1 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$; un coeficiente de Poisson igual a 0.3; con una densidad igual a $1150 \frac{Kg}{m^3}$ y un coeficiente de dilatación térmica de $1 \cdot 10^{-6} /K$), considerando el efecto térmico (en vista a que se ha diseñado el equipo bajo un esquema modular, es decir, que puedan incorporarse unidades de experimentación como calefactores para modificar las temperaturas del tratamiento). En vista a que producto del tratamiento de los lodos residuales se obtiene como principal producto biohidrógeno y metano, los cuales serán acumulados durante el tiempo de residencia total, generando que la presión del interior del reactor de 220 psi.

Espesor se estableció un espesor de 4 mm dado que el tipo de material utilizado en este caso Nylon LAMIGAMID 100 PA 6 para ser sometido a autoclave para su esterilización con una temperatura de 120 grados Celsius y presión de 103 kPa, se asegura que no exista deformación térmica causada por el contacto de materiales. De igual manera en el proceso de mecanizado no exista deformación del material utilizado.

Para la simulación del comportamiento mecánico del cuerpo principal del reactor se utilizó una malla solida de tipo estándar con 4 puntos jacobianos, un tamaño de elementos igual a 6,4335 mm (en base al dimensionamiento del reactor) y una tolerancia igual a 0,321675 mm con una calidad de malla relacionada con elementos cuadráticos.

4.1.1. Mecanizado

La barra sólida cilíndrica, de la cual se partió para el mecanizado del cuerpo principal del reactor, presentó un diámetro igual a 130 mm; principalmente a razón de que comercialmente dicha barra se ajustaba en mayor medida a las dimensiones esperadas del reactor en base al dimensionamiento. El mecanizado del cuerpo tipo cilíndrico se realizó en el torno hasta alcanzar un diámetro exterior 130mm y un diámetro interior 90mm. Para sellar el cuerpo de reactor se utilizó un sistema de cierre tipo brida (el cual favorece a la hermeticidad del reactor y a la recolección adecuada de los gases generados), con 8 perforaciones para asegurar el sellado apropiado. Se aplicó un ajuste con juego móvil para favorecer la apertura y cierre del reactor al finalizar e iniciar la carga de este, incorporando un sistema de apoyo de oring plástico de 2mm.

4.1.2. Materiales de construcción

Dentro de la construcción de los reactores, en base a la revisión se ha establecido tres grupos principales de materiales con que se han construido reactores para experimentación, los cuales son: metálicos, cerámicos y poliméricos o plásticos, no obstante, cada tipo presenta diversas ventajas y desventajas, las cuales actuaron como criterios de selección para la construcción del prototipo objeto de estudio de la presente investigación.

Además, cabe recalcar lo citado por (Velásquez, Urquijo, & Gutiérrez, 2014), quien pone de manifiesto que para la adecuada selección de los materiales de construcción de un biorreactor se debe considerar los siguientes criterios:

- Los materiales deben ser biocompatibles.
- Deben ser materiales resistentes a la corrosión.
- Para la construcción de prototipos deben favorecer a la economía de este.
- El material debe favorecer a la construcción de los prototipos, con técnicas constructivas convencionales.

En base a ello se ha seleccionado como mejor material de construcción para el reactor prototipo la utilización de materiales poliméricos (plásticos) Nylon LAMIGAMID 100 PA 6., donde se realizó un análisis del cumplimiento de los criterios de selección de los materiales y se obtuvo que este tiene alta resistencia a la corrosión, bajos desgaste, en el mecanizado presenta alta factibilidad constructiva y tiene una biocompatibilidad media. A pesar de que su costo es alto fue seleccionado para la construcción del reactor prototipo de fermentación oscura.

4.1.3. Geometría del reactor prototipo

Para la selección de la geometría con la cual fue construido el reactor se aplicaron los criterios establecidos por (Blanco Gálvez, Malato Rodríguez, Peral, Sánchez, & Cardona, 2001), quienes ponen de manifiesto que la geometría del reactor es un factor predominante a la hora de establecer la eficiencia. Para la determinación de las cargas y sujeción se consideró que el reactor operaría de manera vertical soportado por la base entonces la geometría es de tipo cilíndrico, ya que dicha configuración favorece a las mejores condiciones de mezclado y operación de los reactores biológicos. Además, resulto factible la construcción de este por medio de mecanizado a partir de una barra de Nylon comercial, y la ubicación de los sensores de tipo MQ4 y MQ8 ubicado en la tapa superior para su mejor monitoreo de gases producidos.

4.1.4. Volumen del reactor

En base a lo indicado por (Blanco Londoño S. A., Producción de biohidrógeno a través de la fermentación oscura de residuos – Revisión crítica, 2013), quien al realizar una revisión de las investigaciones relacionadas con la fermentación oscura pudo constatar que la mayoría de los reactores para experimentación operaban en batch con volúmenes de entre 70 a 4000 ml, es decir, volúmenes pequeños, lo cual favorece a las operaciones mantenidas dentro de los diferentes trabajos investigativos, no obstante, el valor más común aplicado para reactores de orden investigativo es igual a 1000 ml, es por ello por lo cual se estableció como volumen de operación para el prototipo un valor igual a 1 litro.

Cabe recalcar que los autores (Yung Chang & Yue Lin, 2004), en su investigación referente a la producción de biohidrógeno por fermentación oscura de los lodos residuales de un reactor calefactado, obtuvieron resultados favorables al estudiar un prototipo que presentó un volumen igual a 1 litro, lo cual respalda la selección de dicho volumen de trabajo dentro de la presente experimentación.

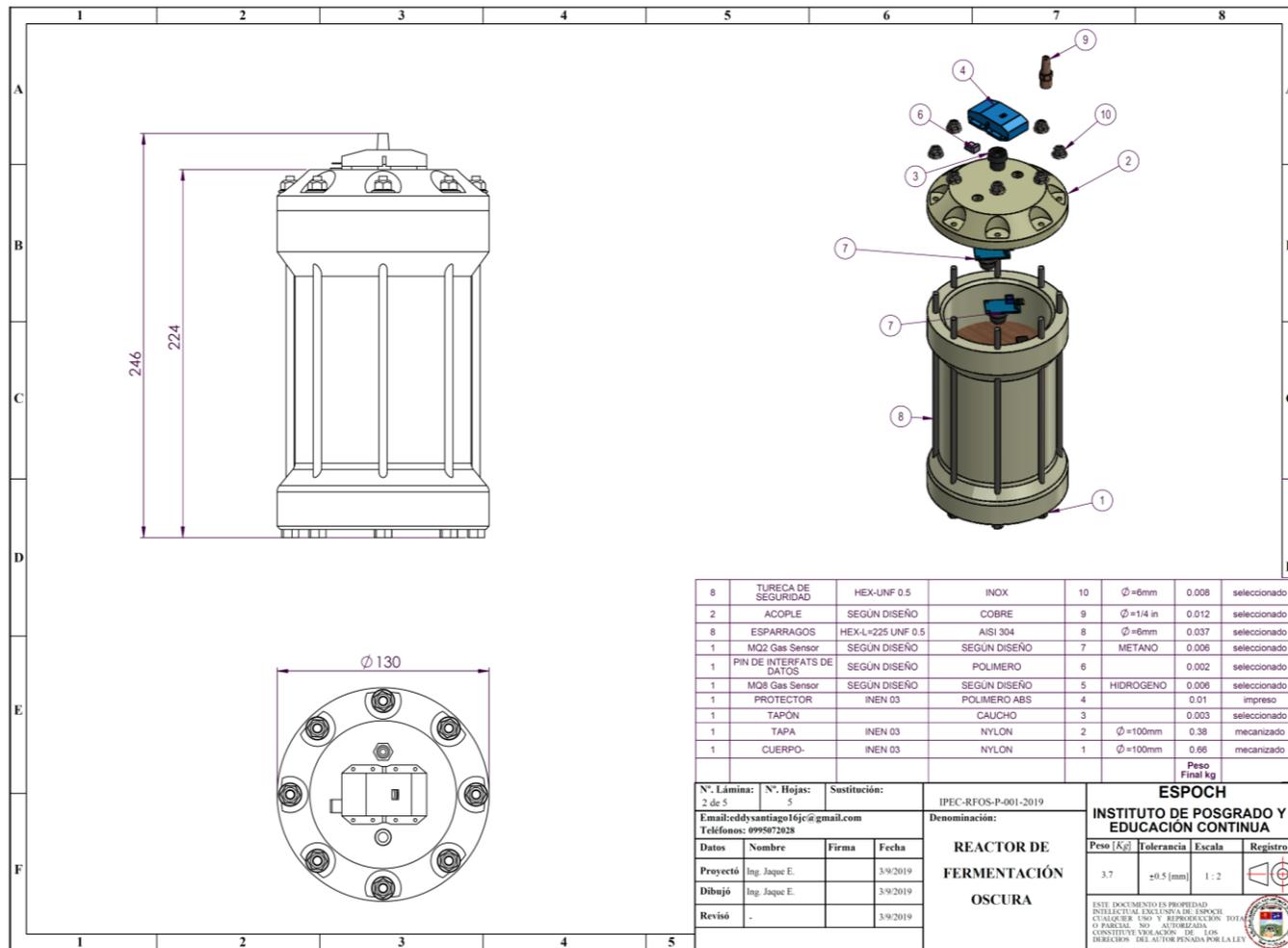


Figura 1-4 Diagrama del diseño del reactor prototipo para el tratamiento de lodos provenientes de la industria textil.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Tabla 1-4: Evaluación del cumplimiento de los diferentes criterios de selección de los materiales constructivos del reactor prototipo de fermentación oscura de lodos residuales de la industria textil.

TIPO DE MATERIAL	CRITERIO DE SELECCIÓN DE LOS MATERIALES				
	Resistencia a la corrosión	Resistencia al desgaste	Factibilidad constructiva	Aplicación de técnicas constructivas convencionales	Economía en la construcción
Materiales metálicos	Media	Alto	Media	Media	Alta
Materiales cerámicos	Alta	Media	Baja	Baja	Alta
Materiales poliméricos o plásticos	Alta	Alta	Alta	Alta	Media

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

4.2. Valoración de la generación de gas

La fermentación oscura favorece a la generación de hidrógeno frente a la producción de metano, condición que se ve potenciada cuando los residuos a tratar han sido irradiados con radiación de tipo gamma. Durante la etapa de diseño del equipo, mecanizado y posterior a la aplicación de este a escala de laboratorio se esperó que la producción del gas producto del tratamiento de los lodos registre una mayor concentración de hidrógeno frente a la concentración del metano para garantizar que se ha generado el tratamiento por la vía de fermentación oscura.

Para proceder a la valoración del equipo, una vez generado el mecanizado del mismo, se dio el tratamiento a una muestra de lodos provenientes de la industria textil previamente tratados por radiación gamma de 350 Gy, en base a lo recomendado por el autor (Aguay Saquicaray, 2017), valorándose durante 123 días de proceso, y de forma diaria, la concentración de los gases generados, a través de la adquisición automática de los datos por medio de los sensores MQ e interfaz con que contaba el equipo monitoreado en PC.

Como se ha mencionado, para la valoración continua de la generación de los gases de relevancia en la operación del equipo (H_2 y CH_4), se ha optado por la utilización de sensores comerciales tipo MQ8 y MQ4 respectivamente, como es mencionado por (Aguay Saquicaray, 2017), la aplicación de dicha metodología para la valoración de la concentración de los gases es ampliamente factible, en vista a que dichos sensores reúnen características analíticas sufrientes (en función a sensibilidad y especificidad) para la cuantificación de la concentración continua en procesos investigativos y aplicativos de varias índoles y representan una alternativa analítica pertinente a la aplicación de métodos de valoración de mayor complejidad y que presentan limitaciones operativas en la validación de la operación de equipos, como es el caso de la utilización de cromatografía de gases o la utilización de métodos volumétricos.

Las principales ventajas, tanto operativas como analíticas, que brinda la aplicación de los sensores comerciales de tipo MQ (de subtipo MQ-4 para la valoración de metano y MQ-8 para la cuantificación de hidrógeno) radican en que la adquisición de datos se genera en tiempo real, por medio del proceso inmediato de los datos a través de una placa Arduino y la interfaz para PC, con lo cual se puede monitorizar continuamente el proceso de tratamiento de los lodos, sin la necesidad de toma de muestras de los gases o la interrupción del proceso para la recolección de muestras del material en fermentación, con lo cual no se influye sobre la alta sensibilidad de la fermentación por vía oscura (ya que la apertura del reactor en un tiempo previo a la finalización del tiempo de residencia, conlleva a la contaminación de la muestra irradiada).

Dentro de la tabla 2-4, se describen las ventajas de la aplicación de sensores comerciales frente a los métodos analíticos tradicionales en la valoración de las concentraciones de los principales gases generados producto del tratamiento de los lodos.

Tabla 2-4: Ventajas de la aplicación de sensores comerciales en la valoración de las concentraciones de los principales gases producto del tratamiento de los lodos.

VALORACIÓN A TRAVÉS DE SENSORES	VALORACIÓN A TRAVÉS DE TÉCNICAS ANALÍTICAS CONVENCIONALES	SENSORES UTILIZADOS DENTRO DEL PROTOTIPO
No se requiere de la toma de las muestras.	Las muestras deben ser ejecutadas bajo estrictas medidas que garanticen la representatividad de estas.	Sensores para la valoración de hidrogeno HANWEI ELECTRONICS Modelo: MQ-8
Los valores obtenidos son analizados en tiempo real.	Se requiere de un periodo de tiempo de espera para la obtención de los resultados, dependiendo de las técnicas aplicadas.	
Se puede detectar errores en el tratamiento de forma inmediata	Los errores dentro del procesos solo podrán ser identificados una vez se tengan los resultados de los análisis.	Sensores para la valoración de metano HANWEI ELECTRONICS Modelo: MQ-4
Su aplicación no requiere de mayores recursos económicos.	Los análisis son costosos, en función a la técnica aplicada y la cantidad de valoraciones ejecutadas.	
Los datos pueden ser recolectados, procesados y almacenados de forma directa a través del sistema de adquisición de datos.	Los datos deben ser obtenidos, tabulados, procesados y almacenados en etapas diferentes, lo cual incrementa el tiempo del análisis.	

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

4.2.1. *Cálculo del volumen total a tratar*

Cálculo de volumen de hidrógeno generado

Dónde:

- V_{ww} : Volumen de lodo residual.
- V_h : volumen de gases recogidos.
- V_a : Volumen de hidrogeno generado.

Conociendo los valores de diseño previamente establecidos, se obtuvo los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}V_a &= V_{ww} * V_h \\V_a &= 0.1 * 10.50 \\V_a &= 1.05 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Para el cálculo del volumen a tratar dentro del reactor, se partió de la siguiente fórmula:

$$V_p = V_a + V_{ww}$$

Dónde:

- V_p : Volumen total para el tratamiento, m^3 .
- V_a : Volumen de hidrogeno producido, m^3 .
- V_{ww} : Volumen a procesar de agua residual, m^3 .

Conociendo los valores requeridos para la resolución de la relación matemática previamente citada, se obtuvo.

$$\begin{aligned}V_p &= 10.14 + 1.05 \\V_p &= 11.19 \text{ m}^3\end{aligned}$$

4.2.2. *Generación de gas*

En base a los datos adquiridos a base la aplicación del prototipo para la fermentación oscura de lodos provenientes de la industria textil se procedió, utilizando las ecuaciones establecidas en los epígrafes anteriores (las cuales relacionan el voltaje de la señal de salida de los sensores con la concentración de los gases analitos), a la cuantificación de la concentración del metano e hidrógeno durante el tratamiento de los lodos donde se puede verificar que, en promedio de las

122 valoraciones generadas durante todo el tiempo de residencia (123 días), la concentración de hidrógeno en el gas generado producto del tratamiento dentro del prototipo fue igual a 54,14 ppm; en tanto que, en promedio, la concentración generada de metano resulto igual a 0,0034 ppm durante el tiempo de residencia establecido para el tratamiento de la muestra de lodos.

La media de la concentración de hidrogeno en el gras producido dentro del reactor prototipo de tratamiento por fermentación oscura de los lodos residuales de industria textil fue igual a 54,14 ppm, con varianza igual a 674,43; una desviación igual a 24,96 y una curtosis igual a 1, 93; lo cual refleja la gran variabilidad de los datos, lo cual obedece al hecho de que la concentración del hidrógeno varia notoriamente con el transcurso del tiempo de retención o la remoción de una porción del gas generado.

Los datos obtenidos en la presente investigación guardan relación con los descritos por (Aguay Saquicaray, 2017), quien obtuvo una concentración promedio igual a 55,356 ppm de hidrogeno y 0,066 metano en el proceso de tratamiento de residuos de lodos activos previamente acondicionados por medio de la irradiación de rayos gamma, con lo cual se pudo inferir que el reactor opera bajo las condiciones esperadas, la producción de hidrogeno es mayor frente a la generación de metano en el biogás obtenido.

En tanto que para la valoración de la concentración de metano dentro del gas generado, se determinó que la media de todos los datos analizados fue igual a 0,0034 ppm; con una varianza igual a 0,0001, una desviación igual a 0,0046 y una curtosis igual a 13,08; lo cual pone de manifiesto que para el caso de la concentración de metano los valores reportados no presentan una gran variabilidad.

Es por ello que, en base a las valoraciones descritas y a los resultados de la aplicación de las pruebas estadísticas inferenciales, donde se puede evidenciar que existen diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.005$) entre las medias de los datos referentes a la concentración de hidrógeno y metano, con lo cual se puede concluir que el proceso de tratamiento ejecutado dentro del prototipo objeto de estudio de la presente investigación, se favoreció a la fermentación oscura y se alcanzó un alto nivel de inhibición de la metanogénesis en el tratamiento de las muestras de lodos.

Además por medio de la utilización del prototipo diseñado en la presente investigación, lo cual permite inferir en el hecho que la validación del prototipo presentó como principal resultado que dicho equipo satisface los objetivos planteados previo a la ejecución del diseño y construcción de este, es decir, que favorezca al proceso de tratamiento de los lodos bajo un proceso orientado

a la producción de hidrógeno y la inhibición de la producción de metano (objetivo principal de la fermentación oscura).

En vista a que se ha realizado la adquisición de una gran cantidad de datos referentes a la concentración de los principales componentes del biogás generado dentro del prototipo reactor de fermentación oscura a partir del tratamiento de los lodos residuales provenientes de la industria textil, y en vista a que la valoración de la concentración de dichos componente (propio de los análisis químicos) presentan errores que se traducen en incertidumbre no eliminable, no es factible realizar una comparación puramente matemática de los resultados obtenidos a partir de los datos registrados por los sensores en cada valoración, por lo cual resultó necesario la aplicación de herramientas estadísticas inferenciales, en las cuales se analice, bajo un modelo puramente estadístico y comprendiendo el error propio de las valoraciones si existen o no diferencias “estadísticas” entre los grupos de datos analizados (es decir, entre los valores de la concentración de cada uno de los gases).

Para el análisis inferencial aplicado se utilizó la herramienta estadística referente a la T de Student para muestras independientes, con lo cual se obtuvo como principal resultado que existieron diferencias estadísticas significativas entre los grupos de datos (concentración de metano e hidrógeno).

4.3. Eficiencia del tratamiento de los lodos

En vista a que, a más de la obtención del biohidrógeno, la principal finalidad de la aplicación del tratamiento de los lodos residuales de la industria textil consiste en la estabilización de los contaminantes de mayor relevancia presentes en dicho efluente, para minimizar los impactos generados en la disposición final del mismo, es por ello que resulto pertinente, en la validación del equipo, la determinación de la eficiencia en la remoción de los contaminantes o en la estabilización de los parámetros de calidad ambiental de los lodos.

Tabla 3-4: Estadísticos descriptivos de la concentración de metano e hidrógeno generado en el proceso de fermentación oscura.

DESCRIPTIVOS				
VARIABLE	ESTADÍSTICO	Valor	Desv. Error	
Concentración Hidrógeno	Media	54,14	2,35	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	49,49	
		Límite superior	58,80	
	Media recortada al 5%	51,71		

	Mediana	44,54	
	Varianza	674,43	
	Desv. Desviación	25,96	
	Mínimo	21,91	
	Máximo	145,08	
	Rango	123,170	
	Rango intercuartil	28,26	
	Asimetría	1,492	0,21
	Curtosis	1,93	0,43
	Media	0,0034	0,00042
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0,0026
		Límite superior	0,0043
	Media recortada al 5%	0,0027	
Metano	Mediana	0,0019	
	Varianza	0,0001	
	Desv. Desviación	0,0046	
	Mínimo	0,00052	
	Máximo	0,030	
	Rango	0,029	
	Rango intercuartil	0,0019	
	Asimetría	3,33	0,21
	Curtosis	13,008	0,43

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Tabla 4-4: Resultados de la aplicación de la prueba de T de Student para muestras independientes a los resultados de la concentración de hidrógeno y metano en el gas generado en el tratamiento de las muestras de lodo provenientes de la industria textil.

Prueba de muestras independientes										
VARIABLE		Prueba de Levene		Prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
CONCENTRACIÓN	Se asumen varianzas iguales	179,804	,000	23,029	242	,0001	54,149	2,351	49,513	58,777
	No se asumen varianzas iguales			23,029	121,000	,000	54,146	2,351	49,491	58,801

Estadísticas de grupo					
VARIABLE	GAS	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
CONCENTRACIÓN	1,00	122	54,149	25,969	2,35120
	2,00	122	,0034	,004	,0004

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

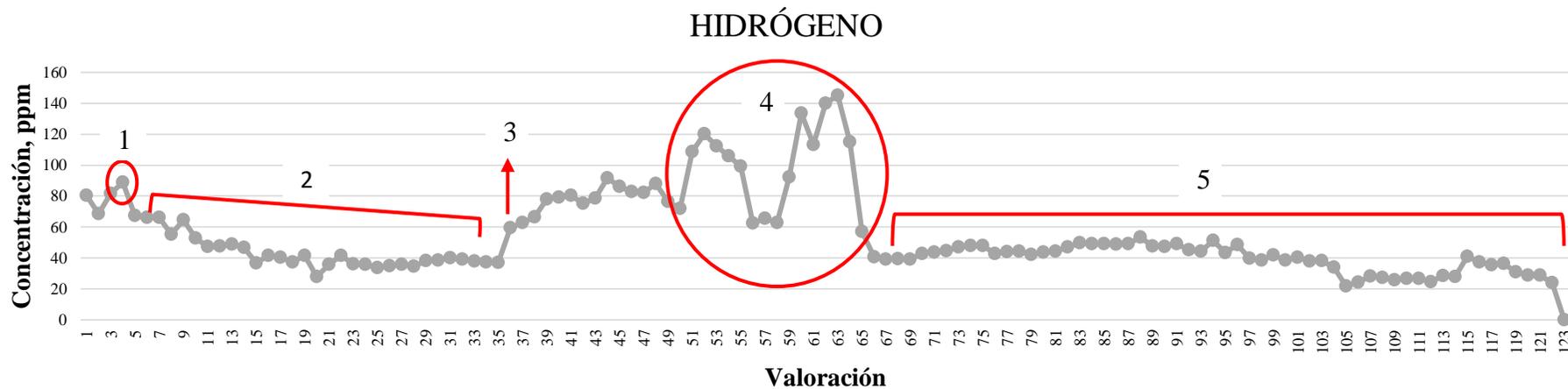


Gráfico 1-4: Concentración de hidrógeno generado en el tratamiento de las muestras de lodos de la industria textil.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

1. Hay mayor concentración de hidrógeno presente en el sustrato inicial (lodos residuales).
2. La biomasa consumidora de hidrógeno es predominante por lo que desciende la concentración de hidrógeno, a medida que se va consumiendo el hidrógeno se va produciendo ácidos grasos volátiles lo que hace que el pH disminuya.
3. Al disminuir el pH hace que la biomasa consumidora de hidrógeno descienda y pueda tomar protagonismo la biomasa generadora de hidrógeno que en condiciones de fermentación oscura las especies de bacterias pueden ser *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium* [Reith y otros, 2003; Levin y otros, 2004]. Y entonces se empieza a generar hidrógeno.
4. Al trabajar con un consorcio (cultivo mixto) de microorganismos y con fermentación oscura existe un descontrol en este tipo de parámetro (pH) podría afectar el metabolismo de la microflora productora de hidrógeno. [Kawagoshi y otros, 2005, Wang y otros, 2007].

- Como tenemos un proceso biológico tipo Batch, el sustrato es limitado, entonces al terminarse el sustrato la biomasa productora de hidrógeno comienza a descender entrando en etapa de respiración endógena y por ende la concentración de hidrógeno también descende, y esto hace que el valor de pH aumente, llegando a valores casi neutros como se tiene en los resultados de los análisis de la muestra.

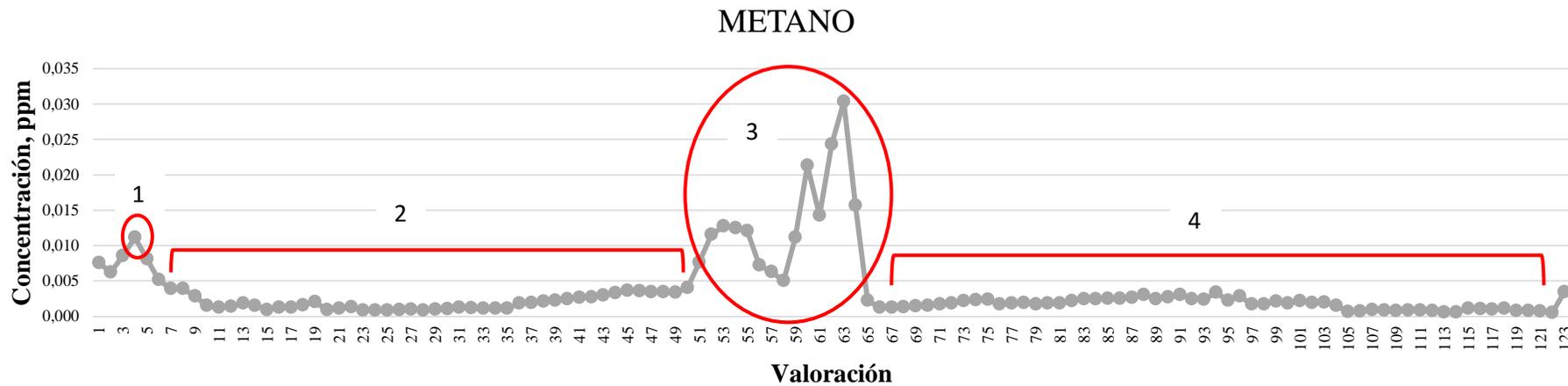


Gráfico 2-4: Concentración de metano generado en el tratamiento de las muestras de lodos de la industria textil.

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

- Hay una mayor concentración de metano presente en el sustrato inicial.
- Al no tener concentraciones de hidrógeno las bacterias metanogénicas no pueden generar metano.
- Las curvas tienen un comportamiento casi similar debido a las bacterias metanogénicas consumen el hidrógeno producido y lo convierten a metano. Sin embargo, las concentraciones de metano son menores a las de hidrógeno debido al pre-tratamiento realizado a la muestra con radiación gamma.
- La biomasa productora de metano comienza a descender entrando en etapa de respiración endógena por lo que la concentración de metano también descende.

4.4. Balance de masa del proceso de tratamiento de los lodos provenientes de la industria textil

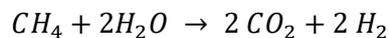
Para la determinación de la principal ecuación de que rige el balance de materia del proceso de tratamiento de los lodos provenientes de la industria textil se consideró al mismo como un proceso reactivo. Al ser un proceso reactivo la ecuación general para el balance de masa será igual a:

$$\{Entrada\ de\ reactantes\} + \{Generación\ de\ materia\} \\ = \{Salida\ de\ productos\} + \{Acumulación\}$$

En el caso del presente, es un reactor de tipo Batch; por lo que no existe acumulación de materia prima ya que toda el agua será tratada y después vertida; por lo que el balance general del sistema para calcular la cantidad acumulada será igual a:

$$\{Entrada\ de\ reactantes\} + \{Generación\ de\ materia\} = \{Salida\ de\ productos\}$$

Para determinar la cantidad de hidrogeno que se genera es necesario tomar en cuenta las reacciones que se dan por el proceso fermentativo; estas ecuaciones son:



Se realizó el balance de materia de acuerdo con los datos tomados en la etapa experimental:

Dónde:

$$\{Generación\ de\ materia\} = \{Entrada\ de\ productos\} - \{Salida\ de\ productos\} \\ \{G = E - S\}$$

- G: biogás
- E: entrada de lodos
- S: salida de lodos

$$G = E - S \\ G = 1000\ g - 980\ g \\ G = 20\ g$$

4.5. Rendimiento del reactor prototipo de fermentación oscura

A más de la obtención del biohidrógeno, la principal finalidad de la aplicación del tratamiento de los lodos residuales de la industria textil consiste en la estabilización de los contaminantes de mayor relevancia presentes en dicho efluente, para minimizar los impactos generados en la disposición final del mismo, es por ello por lo que resulto pertinente, en la validación del equipo, la determinación de su rendimiento. El cálculo del rendimiento del reactor prototipo se lo realizó en base a la siguiente relación matemática:

$$\%R = \frac{\text{Producción Real}}{\text{Producción Teórica}} \times 100$$

$$\%R = \frac{20 \text{ g}}{1000 \text{ g}} \times 100$$

$$\%R = 2\%$$

Tabla 5-4: Comparación de análisis fisicoquímicos de lodos residuales provenientes de la industria textil.

PARÁMETROS	UNIDADES	INICIALES	FINALES
		Valor	Valor
Temperatura	°C	17,80	18,60
Potencial Hidrógeno	---	6,73	6,94
Conductividad Eléctrica	μS/cm	1917,00	892,00
Salinidad	ppm	1,00	0,40
Materia Orgánica	%	38,25	34,9
Velocidad de Corrosión	mm/año	0,07	0,06
NO ₂	ppm	0,24	0,01
NO ₃	ppm	2,87	0,18

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

Previo al tratamiento de lodos residuales analizamos los siguientes parámetros físico – químicos obteniéndose los siguientes valores: temperatura 17,80 °C, pH 6,73, conductividad eléctrica 1917,00 μS/cm, salinidad 1,00 ppm, materia orgánica 38,25 %, velocidad de corrosión 0,07, nitritos 0,24 ppm y nitratos 2,87 ppm. Después del proceso de fermentación oscura que se realizó uso como sustrato se obtuvo los siguientes resultados: temperatura 18,60 °C, pH 6,94,

conductividad eléctrica 892,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, salinidad 0,40 ppm, materia orgánica 34,90 %, velocidad de corrosión 0,06, nitritos 0,01 ppm y nitratos 0,18 ppm.

Mediante el metabolismo del consorcio (microorganismos mixtos) presente en el sustrato existe un incremento de temperatura, mediante este mecanismo estos consumen nutrientes necesarios para su crecimiento. Se evidencia una reducción de nutrientes y estos están íntimamente relacionados con la materia orgánica, salinidad, conductividad eléctrica, nitritos y nitratos.

Tabla 6-4: Comparación de análisis metales de lodos residuales provenientes de la industria textil.

PARÁMETROS	SÍMBOLO	UNIDADES	INICIALES	FINALES
			Valor	Valor
Plomo	Pb	mg/L	0,313	0,410
Níquel	Ni	mg/L	0,597	0,652
Cadmio	Cd	mg/L	0,010	0,022
Cromo Hexavalente	Cr	mg/L	0,039	0,038
Mercurio	Hg	mg/L	0,186	0,075
Selenio	Se	mg/L	0,071	0,168
Arsénico	As	mg/L	0,086	0,102

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

En el análisis respectivo de lodos residuales previo al proceso de fermentación oscura se realizó el análisis de metales pesados obteniéndose los siguientes valores: plomo 0,313 mg/l, níquel 0,597 mg/l, cadmio 0,010 mg/l, cromo hexavalente 0,039 mg/l, mercurio 0,186 mg/l, selenio 0,071 mg/l y arsénico 0,086 mg/l. Mientras tanto que después del proceso de fermentación oscura en el reactor prototipo los valores fueron: plomo 0,410 mg/l, níquel 0,652 mg/l, cadmio 0,022 mg/l, cromo hexavalente 0,038 mg/l, mercurio 0,075 mg/l, selenio 0,168 mg/l y arsénico 0,102 mg/l.

El residuo final obtenido presenta un leve incremento en la concentración de los siguientes metales: plomo, níquel cadmio, selenio, arsénico. Se debe a que su sustrato perdió peso mediante el proceso, y la generación de gas entonces estos metales se concentraron en el sustrato final. Mientras tanto lo metales pesados mercurio y cromo hexavalente se observó la

reducción en su concentración se puede asumir que se debe al metabolismo de los microorganismos.

4.4.1. Estimación teórica de la generación de hidrógeno

En base a la relación descrita por (Montoya-Pérez & Durán-Herrera, 2017), la cual permite la estimación teórica de la generación y acumulación de hidrógeno dentro de los procesos de fermentación oscura, la cual se describe a continuación,

$$H = P_m \cdot e^{\left\{-e^{\left[\frac{R_m \cdot e^{(\lambda-t)+1}}{P_m}\right]}\right\}}$$

Se ha determinado que, para el periodo de 123 días (tiempo de residencia con que fue diseñado el prototipo reactor, de manera teórica, la generación de biohidrógeno (descrita en forma de concentración de hidrogeno dentro del gas generado producto del tratamiento de los lodos por fermentación oscura), es igual a 60,15 ppm (donde los parámetros para la resolución de la ecuación descrita fueron establecidos por los autores (Montoya-Pérez & Durán-Herrera, 2017)), como se muestra dentro de la tabla 7-4; lo cual pone de manifiesto que el rendimiento teórico (es decir, la relación entre el valor de la contracción esperada con la aplicación del modelo teórico y el valor obtenido experimentalmente) resultó igual a 90% para la operación del reactor, lo cual evidencia su idoneidad, en cuanto al diseño y la construcción del mismo.

Tabla 7-4: Determinación teórica de la producción de biohidrógeno

P_m	R_m	λ	t	H
90	0,025	480	532	5,9524969
90	0,025	480	642	8,17576469
90	0,025	480	752	9,93944487
90	0,025	480	862	11,8928871
90	0,025	480	972	14,0238254
90	0,025	480	1082	16,3161061
90	0,025	480	1192	18,7504668
90	0,025	480	1302	21,3053774
90	0,025	480	1412	23,9578866
90	0,025	480	1522	26,6844235
90	0,025	480	1632	29,4615198
90	0,025	480	1742	32,2664295

90	0,025	480	1852	35,0776322
90	0,025	480	1962	37,8752195
90	0,025	480	2072	40,6411678
90	0,025	480	2182	43,3595073
90	0,025	480	2292	46,0164010
90	0,025	480	2402	48,6001475
90	0,025	480	2512	51,1011231
90	0,025	480	2622	53,5116774
90	0,025	480	2732	55,8259954
90	0,025	480	2842	58,0399374
90	0,025	480	2952	60,1508671

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

4.5. Evaluación económica

En la tabla 8-4, se detalla la evaluación económica reactor prototipo para el tratamiento de los lodos residuales provenientes de la industria textil utilizando fermentación oscura, donde se realiza el análisis del Valor actual neto y de la Tasa interna de retorno.

Para una empresa que su fin es comercializar un producto y obtiene réditos por la venta de un bien, su principal escenario de estudio es el comportamiento de los mercados con el fin de recabar información que le permita realizar el cálculo y análisis de los principales indicadores financieros. No obstante, en proyectos de investigación, los cuales su fin no es lucrar, el escenario se presenta un poco más difícil debido a que en la mayoría de los casos se cuenta con una débil base de datos y las vías alternativas que éste presentaría. Sin embargo, hay que recordar que cualquier tipo de proyecto existen dos conceptos básicos que nunca pueden faltar para tomar una decisión económica que son los beneficios y los costos.

Es por ello, que en este contexto se presenta un análisis financiero del presente estudio de investigación para obtener los beneficios económicos que se pudieran obtener si este proyecto se comercializaría. Se ha planteado en primer lugar el costo de la inversión inicial que se necesitaría para la implementación de este. Los valores presentados en la siguiente tabla corresponden a los rubros en los que se invirtió para la construcción de un reactor prototipo de fermentación oscura:

A partir de esta inversión inicial se realizó el cálculo para los flujos netos de caja que se obtendrían en este proyecto considerando que el mismo tendría una duración de al menos 5

años. Los ingresos que se percibirían están basados en el precio de los reactores de biohidrógeno, al cual se vendería en el mercado y la cantidad máxima de producción de reactores que posee la máquina. Un precio aproximado y el que se tomará como referencia es de \$500,00 cada reactor; la capacidad de producción se considera que será de 8 reactores por año. Por otra parte, los costos de producción están basados en el proceso que tomará la generación de los 8 reactores anuales.

Se presenta el flujo de caja neto para el presente proyecto de investigación es de \$ 11.835,20, con un valor neto de \$ 1.373,68, una tasa de retorno de 17,13%. Para la proyección de los 5 años se estiman valores constantes como ingresos por \$4000, costos extras \$ 290,00 y flujo de caja neto \$ 3.710,00.

Tabla 8-4: Costo de inversión del reactor prototipo.

INVERSIÓN INICIAL			
	VALOR UNITARIO (DÓLARES)	CANTIDAD	VALOR TOTAL (DÓLARES)
MATERIALES			
Grillón Nylon	290,00	1	290,00
Computadora	1.200,00	1	1.200,00
Oficina (Papel, impresiones, copias)	200,00	1	200,00
Protoboard	4,00	1	4,00
Arduino	10,00	1	10,00
Software	50,00	1	50,00
Lodos Irradiados	60,00	1	60,00
Caracterización de muestras	238,00	1	238,00
ACCESORIOS			
Sensores	20,00	2	40,00
Arandelas de presión	0,20	8	1,60
Tornillo 1/4	1,50	4	6,00
Tuercas	0,20	8	1,60
Cables Jumper	2,00	4	8,00
Llaves de paso	4,00	2	8,00
Uniones	2,00	4	8,00
Manguera	10,00	1	10,00
Pega tubos	10,00	1	10,00
COSTOS DE PRODUCCIÓN			
Uso fresadora	120,00	1	12000
Uso de Torno	120,00	1	120,00
COSTOS INDIRECTOS			
Energía Eléctrica	10,00	1	10,00
Impresión 3D (Partes Mecánicas)	40,00	1	40,00
Logística Patente	800,00	1	800,00
MANO DE OBRA			
Ing. Mecánico	1200,00	3	3.600,00
Ing. Electrónico	1.200,00	1	1.200,00
Ing. Biotecnólogo Ambiental	1.200,00	3	3.600,00

GASTOS EXTRAORDINARIOS			
Imprevistos	200,00	1	200.00
VALOR DE INVERSIÓN			11.835,20

Realizado por: Eddy Jaque, 2019.

En el flujo de caja tanto los ingresos como los costos no varían a lo largo del tiempo debido a que se estaría ocupando la capacidad máxima de la máquina para producir los reactores de fermentación oscura y el precio de venta de los mismos se ha considerado que es fijo, dado que actualmente en el mercado no existe una referencia de venta de este bien y se ha preferido considerar un mismo precio durante la duración del proyecto.

Al ser un estudio de investigación y no tener otras alternativas para la implementación del mismo, el costo de la inversión inicial es de \$11.835,20, los cuales se han tratado de minimizar al máximo para obtener un resultado cercano a la realidad, pero a pesar de ello la inversión inicial se podría considerar muy alta si se observan los flujos de caja de los primeros años. Sin embargo, al realizar el cálculo del Valor actual neto y la Tasa interna de retorno que son los principales indicadores financieros, se constata que por su lado el VAN es positivo, lo cual nos da un preámbulo para decir que si el proyecto de investigación se ejecutaría para fines comerciales podría considerarse viable y por otro lado la TIR es positiva y mayor a la tasa de descuento considerada (TD=12%) dando un valor de 17,13%. A pesar de estos favorables resultados numéricos, existen más interpretaciones que deben ser tomadas en cuenta.

El VAN presenta un valor positivo de \$1.373,68, lo cual se puede deducir en 3 cosas:

- Su signo positivo afirma que existiría un recuperó total de la inversión inicial que se realizó en el proyecto, es decir, se recuperaría los \$11.835,20.
- Se obtiene el retorno esperado, la inversión inicial más la tasa de descuento (\$11.835,20+12%).
- Además de obtener el recuperó esperado, la inversión generaría aproximadamente \$1.373,68 adicionales.

Todos los resultados obtenidos del VAN dependen de la tasa de descuento que se aplique, mientras la tasa de descuento varíe, el VAN se irá ajustando a la realidad de esta. La interpretación de la TIR obtenida nos demuestra que, si variamos los valores de la tasa de descuento, la TIR no varía en lo absoluto, es decir que la tasa de 17,13% mantiene al VAN

igualado a cero; desde el punto de vista económico este resultado refleja que el proyecto no agrega ni destruye valor.

Sin embargo, no expresa que el invertir en ese proyecto no sea viable, ya que la tasa que se utilizó como TD compensa el sacrificio del inversor y compensa la desvalorización del dinero en el tiempo sugiriendo que el proyecto puede volverse atractivo.

CONCLUSIONES

- El reactor prototipo de fermentación oscura tipo Nylon LAMIGAMID 100 PA 6, cumple con los requerimientos para la generación de biohidrógeno de parámetros: volumen, temperatura, presión dando las condiciones óptimas para el consorcio bacteriano de los lodos residuales de la industria textil.
- La simulación en Solid Works versión 2018 determino que el reactor prototipo bajo diferentes condiciones mecánicas, con el tipo de material Nylon LAMIGAMID 100 PA6 para el proceso de fermentación oscura y se determinó que el prototipo cumple con las condiciones requeridas tanto para el metabolismo de los microorganismos presentes, así como la generación de gases esperados características anticorrosivas del nylon.
- Con el análisis económico se determinó la aplicación del prototipo de carácter científico - académico en centros de investigación e instituciones de educación superior para procesos de fermentación oscura.

RECOMENDACIONES

- Se motiva a realizar investigaciones con diferentes tipos de residuos con alto contenido de materia orgánica para determinar la producción máxima que se puede alcanzar mediante el proceso de fermentación oscura utilizando el reactor prototipo.
- Utilizar distintos tipos de organismos con alta especificidad para obtener una mayor producción de biohidrógeno para su aporten a la investigación académica.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguay Saquicaray, D. C. (2017). Producción de biohidrógeno a partir de residuos de lodo activado desintegrado por radiación gamma. (*Tesis de Pregrado*). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba.
- Argun , H., & Kargi., F. (2011). Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7443-7459.
- Argun, H., & Kargi, F. (2011). Bio-hydrogen production by different operational modes of dark and photo-fermentation: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7443-7459.
- Arias González, E. F., & Rodríguez Bohórquez, C. L. (2012). Estudio de la producción de hidrógeno en regimen batch con agua residual proveniente de la industria cervecera. (*Tesis de pregrado*). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Blanco Gálvez, J., Malato Rodríguez, S., Peral, J., Sánchez, B., & Cardona, A. (2001). Diseño de reactores para fotocátalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones . *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea*, 243-266.
- Blanco Londoño, S. A. (2013). Producción de biohidrógeno a través de la fermentación oscura de residuos – Revisión crítica. (*Tesis posgrado*). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Blanco Londoño, S. A., & Rodríguez Chaparro, T. (2012). Producción de biohidrógeno a partir de residuos mediante fermentación oscura: una revisión crítica (1993-2011). *Ingeniare*, 20(3), 398-411.
- Blanco Londoño, S., & Chaparro, T. (2012). Biohydrogen production from wastes via dark fermentation: A critical review (1993-2011). *Ingeniare*, 398-411.
- Buitrón Méndez, G., & Carvajal Monroy, C. (2009). Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales. *Revista Digital Universitaria*, 10(6), 1-9.
- Cakır, A., Ozmihci, S., & Kargi, F. (2010). Comparison of bio-hydrogen production from hydrolyzed wheat starch by mesophilic and thermophilic dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13214-13218.
- Cast Nylons, LTD. (27 de 06 de 2019). *Cast Nylons*. Obtenido de <http://www.castnylon.com/Cast-Nylons-Machining-Guidelines-sp.pdf>
- Castillo Hernández, A. (2015). Efecto de la carga orgánica sobre la producción biológica de hidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos en un reactor continuo. (*Tesis de posgrado*). Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO, D. F., MÉXICO.
- Castro, L. (2013). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Tecnología en Marcha*, 40-50.

- Cata Saady, N. (2013). Homoacetogenesis during hydrogen production by mixed cultures dark fermentation: Unresolved challenge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13172-13191.
- Cata Saady, N. M. (2013). Homoacetogenesis during hydrogen production by mixed cultures dark fermentation: Unresolved challenge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13172-13191.
- Cavalcante, E. L., Rocha, A., Rissato, M. H., Silva, E. L., & Barros, A. R. (2009). Anaerobic fluidized bed reactor with expanded clay as support for hydrogen production through dark fermentation of glucose. *International Journal of Hydrogen Energy*, 783-790.
- Cavia del Olmo, B. (2009). *Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores*.
- Cavinato, C., Giuliano, A., Bolzonella, D., Pavan, P., & Cecchi, F. (2012). Bio-hythane production from food waste by dark fermentation coupled with anaerobic digestion process: A long-term pilot scale experience. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11549-11555.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Charanpahari, A., Umare, S., & Sasikala, R. (2014). Enhanced photodegradation of dyes on Bi₂O₃ microflakes: Effect of GeO₂ addition on photocatalytic activity. *Separation and Purification Technology*, 438–442.
- Chong, M.-L., Sabaratnam, V., Shirai, Y., & Hassan, M. A. (2009). Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3277-3287.
- Contreras Dávila, C. A. (2015). Producción de hidrógeno en sistemas continuos a partir de hidrolizados enzimáticos de bagazo de Agave tequilana Weber. *Tesis de Maestría*. INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, San Luis Potosí.
- Converti, A., & Perego, P. (2002). Use of carbon and energy balances in the study of the anaerobic metabolism of *Enterobacter aerogenes* at variable starting glucose concentrations. *Appl Microbiol Biotechnol*, 303–309.
- Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., & González Ramírez, C. (2010). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. México: UNAM.
- Cruz Ramos, H., Hoffmann, T., Marino, M., Nedjari, H., Presecan-Siedel, L., Dreesen, O., . . . Jahn, D. (2000). Fermentative Metabolism of *Bacillus subtilis*: Physiology and Regulation of Gene Expression. *JOURNAL OF BACTERIOLOGY*, 3072–3080.
- Das, D., & Veziroglu, N. T. (2001). Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13-28.

- EL TELÉGRAFO. (01 de Abril de 2019). *EL TELÉGRAFO - NOTICIAS DEL ECUADOR Y DEL MUNDO*. Obtenido de Empresas textiles reflotan luego de dos años de crisis: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/sector-textil-signos-recuperacion-ecuador>
- Forero Nunez, C., Castellanos Contreras, J., & Sierra Vargas, F. (2013). Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales. *Ingenier. mecáni. tecnolog. desarroll*, 161-168.
- Gadhamshetty, V., Johnson, D., Nirmalakhandan, N., & Arudchelvamb, Y. (2010). Modeling dark fermentation for biohydrogen production: ADM1-based model vs. Gompertz model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 479-490.
- Graboski, M., & McCormick, R. (1998). Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Prog Energy Combust Sci*, 125-164.
- Grimes, C., Varghese, O., & Ranjan, S. (2008). *Light, Water, Hydrogen. The solar generation of hydrogen by water photoelectrolysis*. New York: Springer Science+Business Media.
- Gupta, S. K., Kumari, S., Reddy, K., & Bux, F. (2013). Trends in biohydrogen production: major challenges and state-of-the-art developments. *Environmental Technology*, 13-14.
- Gutiérrez, A. J. (2003). *Diseño de procesos en ingeniería química*. Reverté.
- Hallenbeck, P. (2009). Fermentative hydrogen production: principles, progress, and prognosis. *Int J Hydrog Energy*, 7379-7389.
- HANWEI ELETRONICS CO.,LTD. (2 de 5 de 2019). *GAS SENSOR*. Obtenido de <http://www.hwsensor.com>
- Hawkes, F., Hussy, I., Kyazze, G., Dinsdale, R., & Hawkes, D. (2007). Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora: principles and progress. *Int J Hydrog Energy*, 172-184.
- Hernández Avilés, D. M., Grisales Penagos, D. K., & Rodríguez Chaparro, A. T. (2016). Efecto de la configuración de reactores anaerobios de alta tasa en la producción de hidrógeno: biomasa fija y UASB-híbrido. *Rev.ion.*, 27-36.
- Jasso Salcedo, A. B. (2010). Estudio de la producción de hidrógeno en reactores UASB a partir de lodo granular. (*Tesis de Maestría*). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
- Juárez-Hernández, S., & Castro-González, A. (2013). Factibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno a partir de lodos del tratamiento de agua y otros desechos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(2), 137-147.
- Kargi, F., & Kapdan, I. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzym Microb Technol*, 569-582.

- Kumar, G., Bakonyi, P., Kobayashi, T., Xu, K., Sivagurunathan, P., & Kim, S. (2016). Enhancement of biofuel production via microbial augmentation: the case of dark fermentative hydrogen. *Renew Sustain Energy Rev*, 879-891.
- Levine, I. (2014). *Principios de fisicoquímica*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- Litardo López, T. A. (2014). Estudio de la viabilidad socio-ambiental del hidrógeno como vector energético producido a partir de energías renovables en el Ecuador. (*Tesis de pregrado*). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Marzo.
- Liu, C., Zheng, J., Wu, S., & Chu, C. (2016). Fermentative hydrogen production potential from washing wastewater of beverage production process. *Int J Hydrog Energy*, 4466-4473.
- Liu, Z., Zhang, C., Lu, Y., Wu, X., Wang, L., Wang, L., . . . Xing, X.-H. (2013). States and challenges for high-value biohydrogen production from waste biomass by dark fermentation technology. *Bioresource Technology*, 292-303.
- Logan, B. (2004). Extracting hydrogen and electricity from renewable resources. *Environ Sci Technol*, 4-8.
- Magaña Pietra, A. (2002). Reactor anaerobio horizontal doble. *Ingeniería*, 61-65.
- Manish, S., & Banerjee, R. (2008). Comparison of biohydrogen production processes. *Int J Hydrog Energy*, 279-286.
- Mansilla, H., Lizama, C., Gutarra, A., & Rodríguez, J. (2001). Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil. *CYTED VII-G. Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea.*, 60-84.
- Márquez Orozco, S. G. (s.f.). Propuesta de mejora de la productividad del trabajo en el taller de mecanizado de la empresa Poligrup S.A. (*Tesis de pregrado*). Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Guayaquil.
- Mercado, V., Esteves, A., Filippín, C., & Flores Larsen, S. (2009). Sistema de calefacción radiante solar pasivo diseño, construcción de un prototipo y obtención de resultados. *SISTEMA DE CALEFACCIÓN RADIANTE SOLAR PASIVO*, 53 -61.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 028. Sustituyese el Libro VI del texto Unificado de Legislación Secundaria*. Quito: Registro Oficial.
- Molina García, M., & Melchor Hernández, C. (2016). Prototipo de un Sistema Fotovoltaico Autónomo. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 9-18.
- Montoya-Pérez, L., & Durán-Herrera, E. (2017). Producción de Hidrógeno a partir de la fermentación de residuos agroindustriales de la piña. *Tecnología en Marcha*, 106-118.
- Morales Corral, E. M. (2013). Los efluentes industriales y su incidencia en la calidad ambiental de la fábrica textil "andelas" ubicada en la corporación del parque industrial Ambato - Cepia. (*Tesis de pregrado*). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

- Morales Hernandez, S., Rizo Acosta, P., & Hernandez Rojas, M. (2015). Estudio de una celda de combustible tipo PEM alimentada con hidrógeno parcialmente purificado y oxígeno del aire. *Rev Cub Quim*, 65-78.
- Naranjo, M., & Eugenio Torres, J. C. (2012). Estudio de impacto ambiental ex – post para la industria textil del Canton Pelileo- provincia de Tungurahua- Ecuador. *CONAMA*, 2-13.
- Narvaez Ortiz, W., Benavides Mendoza, A., Vazquez Badillo, M., & Cabrera de la Fuente, M. (2014). Effect of the application of raw sludge from the fabric industry into the productivity and chemical composition of lettuce (*Lactuca sativa*). *Rev. Int. Contam. Ambient*, 379-391.
- O'Brien, R., & Morris, J. (1971). Oxygen and the Growth and Metabolism of *Clostridium acetabutylicum*. *Journal of General Microbiology*, 307-318.
- Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 51-58.
- Ortiz Hernández, L., Gutiérrez Ruiz, M. E., & Sánchez Salinas, E. (1995). Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 105-115.
- Pandey, A., & Sinha, P. (2011). An evaluative report and challenges for fermentative biohydrogen production. *Int J Hydrog Energy*, 7460-7478.
- Perez, J., Espinel, J., Ocampo, A., & Londoño, C. (2001). Dioxinas en procesos de incineración de desechos. *Dyna*, 65-75.
- Petrucci, R., Geoffrey, F., Madura, J., & Bissonnette, C. (2011). *Química General. Principios y aplicaciones modernas*. Madrid: Pearson Educación.
- PFERD. (2010). *Herramientas para el mecanizado de plásticos*. Alemania: PFERD.
- Revelo, A., Proaño, D., & Banchon, C. (2015). Biocoagulación de aguas residuales de industria textilera mediante extractos de *Caesalpinia spinosa*. *Enfoque UTE*, 1-12.
- Salub. Manish, R. (2008). Comparison of biohydrogen production processes. *International Journal Of Hydrogen Energy*(33), 279 – 286.
- Sarma, S., Pachapur, V., Brar, S., Bihan, Y., & Buelna, G. (2015). Hydrogen biorefinery: potential utilization of the liquid waste from fermentative hydrogen production. *Renew Sustain Energy Rev*, 942-951.
- Sinha, P., & Pandey, A. (2011). An evaluative report and challenges for fermentative biohydrogen production. *International*, 36(13), 7460-7478.
- Sotelo Navarro, P. X. (2017). Producción de bioH₂ por fermentación oscura a partir de pañales desechables usados. (*Tesis Doctoral*). Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Ciudad de México, México.
- Tinoco, O., Medina, A., & Zapata, H. (2012). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Industrial Data*, 9-15.

- UN-Water. (2014). *Water pollution*. Obtenido de The United Nations Inter-Agency Mechanism on All: <https://www.unwater.org/statistics/statistics-detail/en/c/211800/>
- Valero, J., López, E., Antoñanzas, J., Egizabal, A., Belsue, M., & Arrien, N. (2005). Producción de hidrógeno a partir de residuos mediante fermentación. *Dialnet*(423), 175-181.
- Velásquez, A., Urquijo, P., & Gutiérrez, Y. (2014). Diseño y construcción de un reactor mecatrónico para el crecimiento de películas delgadas por la técnica de recubrimiento por inmersión. *Ingeniería y Ciencia*, 93–113.
- Vera, S., Sartarelli, A., Echarri, R., Cyrules, E., & Samson, I. (2011). Prototipos de refrigeradores solares por adsorción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 41-50.
- Wang, A., Sun, D., Cao, G., Wang, H., Ren, N., Wu, W.-M., & Logan, B. E. (2011). Integrated hydrogen production process from cellulose by combining dark fermentation, microbial fuel cells, and a microbial electrolysis cell. *Bioresource Technology*, 4137-4143.
- Yanan, Y., & Jianlong, W. (2015). Biohydrogen production using waste activated sludge disintegrated by gamma irradiation. *Applied Energy*(155), 434–439.
- Yang, H., Guo, L., & Liu, F. (2010). Enhanced bio-hydrogen production from corncob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation. *Bioresource Technology*, 2049-2052.
- Yang, H., Guo, L., & Liu, F. (2010). Enhanced bio-hydrogen production from corncob by a two-step process: Dark- and photo-fermentation. *Bioresource Technology*, 2049-2052.
- Yoshihito, S., Mei-Ling, C., Vikineswary, S., & Mohd, A. (2009). Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation. *international journal of hydrogen energy*, 34, 3277 – 3287.
- Yung Chang, F., & Yue Lin, C. (2004). Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33-39.

ANEXOS

Anexo A. Valoración de la concentración de hidrógeno en el gas generado producto del tratamiento de las muestras de lodo provenientes de la industria textil.

Nº	Fecha	Señal de salida del sensor (v)	Señal de salida del Arduino (v)	Concentración (ppm)
1	26/9/2018	753	3,680351906	80,4174839
2	27/9/2018	731	3,572825024	68,4437392
3	28/9/2018	755	3,690127077	81,6377886
4	29/9/2018	766	3,743890518	88,8065668
5	30/9/2018	729	3,563049853	67,4732014
6	1/10/2018	726	3,548387097	66,0502821
7	2/10/2018	726	3,548387097	66,0502821
8	3/10/2018	700	3,421309873	55,1840650
9	4/10/2018	723	3,533724340	64,6655723
10	5/10/2018	693	3,387096774	52,6496015
11	6/10/2018	677	3,308895406	47,3750791
12	7/10/2018	678	3,313782991	47,6852106
13	8/10/2018	682	3,333333333	48,9507629
14	9/10/2018	675	3,299120235	46,7621427
15	10/10/2018	637	3,113391984	36,7389726
16	11/10/2018	657	3,211143695	41,6552281
17	12/10/2018	652	3,186705767	40,3569275
18	13/10/2018	639	3,123167155	37,1987156
19	14/10/2018	656	3,206256109	41,3916443
20	15/10/2018	592	2,893450635	27,9333758
21	16/10/2018	633	3,093841642	35,8391715
22	17/10/2018	656	3,206256109	41,3916443
23	18/10/2018	634	3,098729228	36,0616993
24	19/10/2018	632	3,088954057	35,6182338
25	20/10/2018	623	3,044965787	33,6989809
26	21/10/2018	629	3,074291300	34,9648151
27	22/10/2018	633	3,093841642	35,8391715
28	23/10/2018	627	3,064516129	34,5368884
29	24/10/2018	643	3,142717498	38,1385128

30	25/10/2018	644	3,147605083	38,3777881
31	26/10/2018	651	3,181818182	40,1030577
32	27/10/2018	647	3,162267840	39,1062633
33	28/10/2018	642	3,137829912	37,9009843
34	29/10/2018	639	3,123167155	37,1987156
35	30/10/2018	638	3,118279570	36,9680110
36	31/10/2018	711	3,475073314	59,4826332
37	1/11/2018	719	3,514173998	62,8763980
38	2/11/2018	727	3,553274682	66,5202744
39	3/11/2018	749	3,660801564	78,0479400
40	4/11/2018	751	3,670576735	79,2210753
41	5/11/2018	753	3,680351906	80,4174839
42	6/11/2018	744	3,636363636	75,2130150
43	7/11/2018	750	3,665689150	78,6316366
44	8/11/2018	770	3,763440860	91,6206557
45	9/11/2018	762	3,724340176	86,1065474
46	10/11/2018	757	3,699902248	82,8826342
47	11/11/2018	756	3,695014663	82,2571027
48	12/11/2018	765	3,739002933	88,1211148
49	13/11/2018	746	3,646138807	76,3305612
50	14/11/2018	738	3,607038123	71,9857366
51	15/11/2018	791	3,866080156	108,548946
52	16/11/2018	803	3,924731183	120,177988
53	17/11/2018	795	3,885630499	112,246570
54	18/11/2018	788	3,851417400	105,884162
55	19/11/2018	780	3,812316716	99,1993340
56	20/11/2018	718	3,509286413	62,4389823
57	21/11/2018	725	3,543499511	65,5845348
58	22/11/2018	719	3,514173998	62,8763980
59	23/11/2018	771	3,768328446	92,3427619
60	24/11/2018	815	3,983382209	133,6015300
61	25/11/2018	796	3,890518084	113,1978781
62	26/11/2018	820	4,007820137	139,8151322
63	27/11/2018	824	4,027370479	145,0819442
64	28/11/2018	798	3,900293255	115,1339751

65	29/11/2018	705	3,445747801	57,0879361
66	30/11/2018	653	3,191593353	40,6127022
67	1/12/2018	647	3,162267840	39,1062633
68	2/12/2018	648	3,167155425	39,3526952
69	3/12/2018	647	3,162267841	39,1062633
70	4/12/2018	661	3,230694037	42,7297709
71	5/12/2018	664	3,245356794	43,5574665
72	6/12/2018	668	3,264907136	44,6911992
73	7/12/2018	676	3,304007821	47,0673982
74	8/12/2018	679	3,318670577	47,9978185
75	9/12/2018	679	3,318670577	47,9978185
76	10/12/2018	661	3,230694037	42,7297709
77	11/12/2018	665	3,250244379	43,8376272
78	12/12/2018	667	3,260019551	44,4044714
79	13/12/2018	659	3,220918866	42,1884179
80	14/12/2018	664	3,245356794	43,5574665
81	15/12/2018	666	3,255131965	44,1199548
82	16/12/2018	676	3,304007821	47,0673982
83	17/12/2018	684	3,343108504	49,5989282
84	18/12/2018	683	3,338220919	49,2735404
85	19/12/2018	683	3,338220919	49,2735404
86	20/12/2018	682	3,333333333	48,9507629
87	21/12/2018	683	3,338220919	49,2735404
88	22/12/2018	695	3,396871945	53,3587130
89	23/12/2018	678	3,313782991	47,6852106
90	24/12/2018	677	3,308895406	47,3750791
91	25/12/2018	683	3,338220919	49,2735404
92	26/12/2018	670	3,274682307	45,2713793
93	27/12/2018	667	3,260019550	44,4044714
94	28/12/2018	689	3,367546432	51,2660084
95	29/12/2018	663	3,240469208	43,2794512
96	30/12/2018	681	3,328445748	48,6305681
97	31/12/2018	649	3,172043011	39,6009597
98	1/1/2019	644	3,147605083	38,3777881
99	2/1/2019	658	3,216031281	41,9208127

100	3/1/2019	645	3,152492669	38,6188269
101	4/1/2019	652	3,186705767	40,3569275
102	5/1/2019	642	3,137829912	37,9009843
103	6/1/2019	643	3,142717498	38,1385128
104	7/1/2019	624	3,049853372	33,9062485
105	8/1/2019	551	2,693059629	21,9111723
106	9/1/2019	567	2,771260997	24,0761299
107	10/1/2019	594	2,903225806	28,2700194
108	11/1/2019	587	2,869012708	27,1109688
109	12/1/2019	579	2,829912023	25,8498485
110	13/1/2019	585	2,859237537	26,7894959
111	14/1/2019	585	2,859237537	26,7894959
112	15/1/2019	570	2,785923754	24,5068913
113	16/1/2019	596	2,913000978	28,6111642
114	17/1/2019	592	2,893450635	27,9333758
115	18/1/2019	654	3,196480938	40,8704006
116	19/1/2019	640	3,128054741	37,4311019
117	20/1/2019	631	3,084066471	35,3988714
118	21/1/2019	636	3,108504399	36,5115848
119	22/1/2019	608	2,971652004	30,756996
120	23/1/2019	597	2,917888563	28,7834486
121	24/1/2019	597	2,917888563	28,7834486
122	25/1/2019	566	2,766373412	23,9343549

Anexo B. Valoración de la concentración de metano en el gas generado producto del tratamiento de las muestras de lodo provenientes de la industria textil.

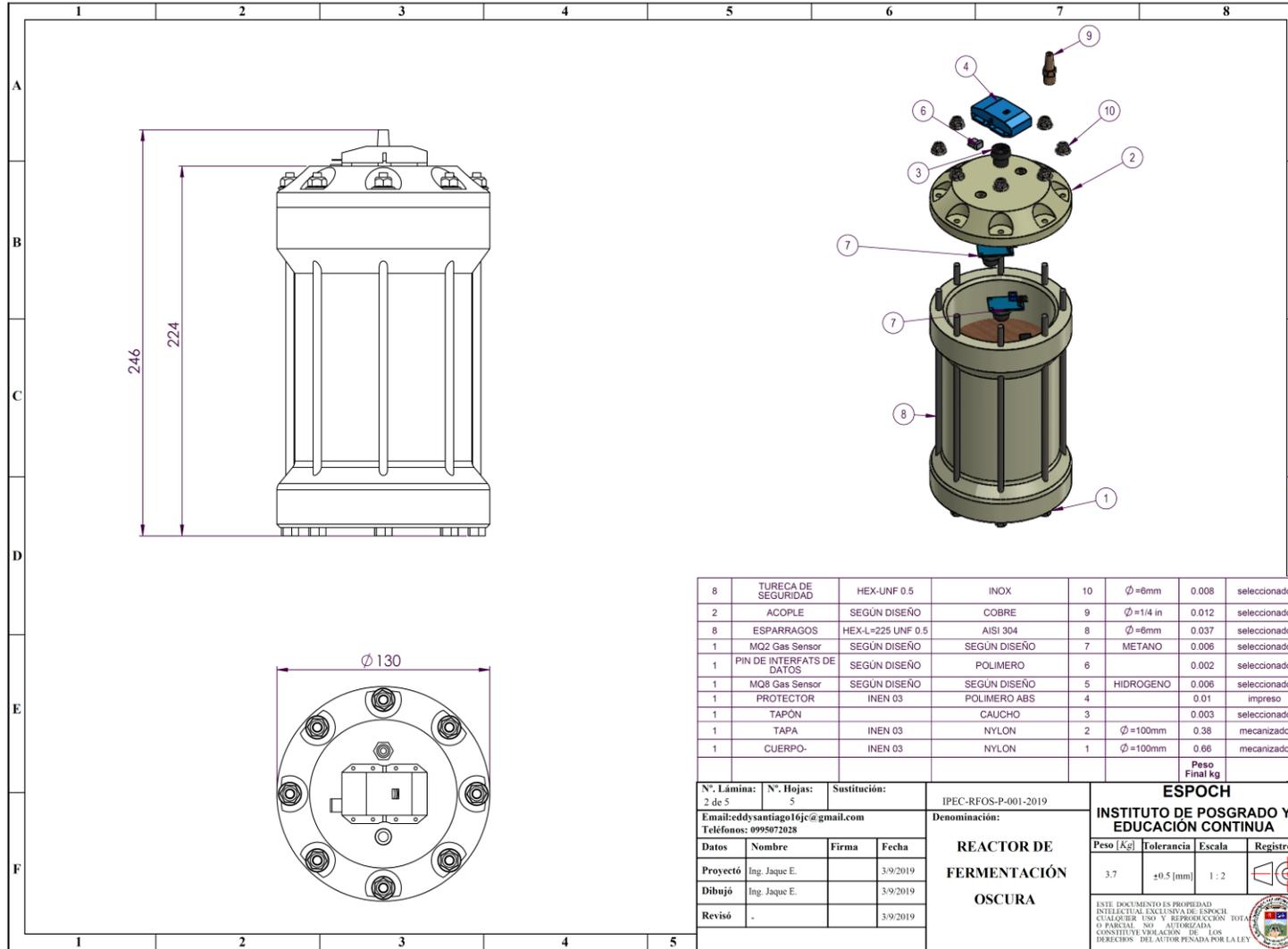
Nº	Fecha	Señal de salida del sensor (v)	Señal de salida del Arduino (v)	Concentración (ppm)
1	26/9/2018	584	2,854349951	0,007553793
2	27/9/2018	566	2,766373412	0,006206918
3	28/9/2018	595	2,908113392	0,008525132
4	29/9/2018	619	3,025415445	0,011135857
5	30/9/2018	590	2,883675464	0,008068211
6	1/10/2018	549	2,683284457	0,005163226
7	2/10/2018	523	2,556207234	0,003902407
8	3/10/2018	523	2,556207234	0,003902407
9	4/10/2018	493	2,409579668	0,002827117
10	5/10/2018	435	2,126099707	0,001507056
11	6/10/2018	419	2,047898338	0,001262968
12	7/10/2018	426	2,082111437	0,00136479
13	8/10/2018	454	2,218963832	0,00185489
14	9/10/2018	437	2,135874878	0,001540518
15	10/10/2018	392	1,915933529	0,000932728
16	11/10/2018	416	2,033235582	0,001221544
17	12/10/2018	417	2,038123167	0,001235209
18	13/10/2018	438	2,140762463	0,001557511
19	14/10/2018	462	2,258064516	0,00202325
20	15/10/2018	389	1,901270772	0,000901429
21	16/10/2018	407	1,989247312	0,001104731
22	17/10/2018	423	2,06744868	0,001320245
23	18/10/2018	384	1,876832845	0,000851385
24	19/10/2018	385	1,88172043	0,000861187
25	20/10/2018	383	1,871945259	0,000841685
26	21/10/2018	390	1,906158358	0,000911754
27	22/10/2018	397	1,940371457	0,000987113
28	23/10/2018	385	1,88172043	0,000861187
29	24/10/2018	399	1,950146628	0,001009670
30	25/10/2018	403	1,969696970	0,001056214
31	26/10/2018	416	2,033235582	0,001221544

32	27/10/2018	413	2,018572825	0,001181389
33	28/10/2018	409	1,999022483	0,001129755
34	29/10/2018	407	1,989247312	0,001104731
35	30/10/2018	406	1,984359726	0,001092413
36	31/10/2018	452	2,209188661	0,001814951
37	1/11/2018	458	2,238514174	0,001937311
38	2/11/2018	465	2,272727273	0,002090105
39	3/11/2018	472	2,306940371	0,002254521
40	4/11/2018	479	2,341153470	0,002431479
41	5/11/2018	486	2,375366569	0,002621981
42	6/11/2018	489	2,390029326	0,002708037
43	7/11/2018	498	2,434017595	0,002983255
44	8/11/2018	507	2,478005865	0,003286148
45	9/11/2018	516	2,521994135	0,003619686
46	10/11/2018	514	2,512218964	0,003542754
47	11/11/2018	511	2,497556207	0,003430415
48	12/11/2018	511	2,497556207	0,003430415
49	13/11/2018	510	2,492668622	0,003393766
50	14/11/2018	526	2,570869990	0,004030286
51	15/11/2018	585	2,859237537	0,007637071
52	16/11/2018	622	3,040078201	0,011518174
53	17/11/2018	631	3,084066471	0,012752721
54	18/11/2018	629	3,074291301	0,012466491
55	19/11/2018	626	3,059628543	0,012050116
56	20/11/2018	580	2,834799609	0,007230107
57	21/11/2018	567	2,771260997	0,006274733
58	22/11/2018	546	2,668621701	0,004998702
59	23/11/2018	619	3,025415445	0,011135857
60	24/11/2018	675	3,299120235	0,021284249
61	25/11/2018	641	3,132942326	0,014295192
62	26/11/2018	686	3,352883675	0,024303121
63	27/11/2018	704	3,440860215	0,030342274
64	28/11/2018	649	3,172043011	0,015676061
65	29/11/2018	471	2,302052786	0,002230287
66	30/11/2018	420	2,052785924	0,001277066

67	1/12/2018	419	2,047898338	0,001262968
68	2/12/2018	422	2,062561095	0,001305702
69	3/12/2018	429	2,096774194	0,001410743
70	4/12/2018	436	2,130987292	0,001523700
71	5/12/2018	446	2,179863148	0,001700012
72	6/12/2018	455	2,223851417	0,001875174
73	7/12/2018	470	2,297165201	0,002206307
74	8/12/2018	474	2,316715543	0,002303758
75	9/12/2018	478	2,336265885	0,002405394
76	10/12/2018	448	2,189638319	0,001737529
77	11/12/2018	453	2,214076246	0,001834816
78	12/12/2018	458	2,238514174	0,001937311
79	13/12/2018	446	2,179863148	0,001700012
80	14/12/2018	453	2,214076246	0,001834816
81	15/12/2018	454	2,218963832	0,001854890
82	16/12/2018	470	2,297165201	0,002206307
83	17/12/2018	479	2,341153471	0,002431479
84	18/12/2018	480	2,346041056	0,002457840
85	19/12/2018	482	2,355816227	0,002511403
86	20/12/2018	482	2,355816227	0,002511403
87	21/12/2018	486	2,375366569	0,002621981
88	22/12/2018	500	2,443792766	0,003048074
89	23/12/2018	480	2,346041056	0,002457840
90	24/12/2018	490	2,394916911	0,002737336
91	25/12/2018	499	2,438905181	0,003015492
92	26/12/2018	480	2,346041056	0,002457841
93	27/12/2018	476	2,326490714	0,002354042
94	28/12/2018	510	2,492668622	0,003393766
95	29/12/2018	472	2,306940371	0,002254521
96	30/12/2018	494	2,414467253	0,002857684
97	31/12/2018	445	2,174975562	0,001681544
98	1/1/2019	445	2,174975562	0,001681544
99	2/1/2019	466	2,277614858	0,002112861
100	3/1/2019	453	2,214076246	0,001834816
101	4/1/2019	469	2,292277615	0,002182577

102	5/1/2019	456	2,228739003	0,001895670
103	6/1/2019	459	2,243401760	0,001958460
104	7/1/2019	434	2,121212121	0,001490585
105	8/1/2019	359	1,754643206	0,000636836
106	9/1/2019	371	1,813294233	0,000732843
107	10/1/2019	387	1,891495601	0,000881098
108	11/1/2019	380	1,857282502	0,000813184
109	12/1/2019	376	1,837732160	0,000776544
110	13/1/2019	382	1,867057674	0,000832086
111	14/1/2019	382	1,867057674	0,000832086
112	15/1/2019	373	1,823069404	0,00075005
113	16/1/2019	352	1,720430108	0,000586172
114	17/1/2019	351	1,715542522	0,000579234
115	18/1/2019	410	2,003910068	0,001142464
116	19/1/2019	403	1,969696970	0,001056214
117	20/1/2019	399	1,950146628	0,001009671
118	21/1/2019	405	1,979472141	0,001080221
119	22/1/2019	376	1,837732160	0,000776544
120	23/1/2019	376	1,837732160	0,000776544
121	24/1/2019	366	1,788856305	0,000691368
122	25/1/2019	343	1,676441838	0,000526296

Anexo C. Diagramas del diseño del reactor prototipo.



8	TURECA DE SEGURIDAD	HEX-UNF 0.5	INOX	10	$\varnothing = 6\text{mm}$	0.008	seleccionado
2	ACOPLE	SEGUN DISEÑO	COBRE	9	$\varnothing = 1/4 \text{ in}$	0.012	seleccionado
8	ESPARRAGOS	HEX-L=225 UNF 0.5	AISI 304	8	$\varnothing = 6\text{mm}$	0.037	seleccionado
1	MQ2 Gas Sensor	SEGUN DISEÑO	SEGUN DISEÑO	7	METANO	0.006	seleccionado
1	PIN DE INTERFATS DE DATOS	SEGUN DISEÑO	POLIMERO	6		0.002	seleccionado
1	MQ8 Gas Sensor	SEGUN DISEÑO	SEGUN DISEÑO	5	HIDROGENO	0.006	seleccionado
1	PROTECTOR	INEN 03	POLIMERO ABS	4		0.01	impreso
1	TAPON		CAUCHO	3		0.003	seleccionado
1	TAPA	INEN 03	NYLON	2	$\varnothing = 100\text{mm}$	0.38	mecanizado
1	CUERPO-	INEN 03	NYLON	1	$\varnothing = 100\text{mm}$	0.66	mecanizado
						Peso Final kg	

N°. Lámina: 2 de 5	N°. Hojas: 5	Sustitución:	IPEC-RFOS-P-001-2019	ESPOCH			
Email: eddy.santiago16jc@gmail.com			INSTITUTO DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA				
Teléfonos: 0995972028			REACTOR DE FERMENTACIÓN OSCURA				
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Proyectó	Ing. Jaque E.		3/9/2019	3.7	$\pm 0.5 \text{ [mm]}$	1:2	
Dibujó	Ing. Jaque E.		3/9/2019				
Revisó	-		3/9/2019				
				<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE ESPOCH. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL, NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.</small>			

Anexo D. Informes de caracterización de los lodos.



INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO QUÍMICO AMBIENTAL

ANÁLISIS: Físicoquímico de Muestras de Suelo CIU: NA R: S0018-19
 MC22.1
 Revisión: 8
 Orden de trabajo N° OT-2019-S-010

CLIENTE: Eddy Santiago Jaque Castellano DIRECCION: Riobamba TELEFONO: 0995072028 SOLICITADO POR: Sr. Eddy Santiago Jaque Castellano PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS NA	TIPO DE MUESTRAS: Lodo CODIGO DE MUESTREO: A - Irradiada CUERPO RECEPTOR: NA LOCALIZACIÓN: GEAA - Grupo de Energías Alternativas Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
--	---

CONDICIONES AMBIENTALES	TEM AMB (°C): 17
	HUMEDAD (%): 71
COORDENADAS EN EL PUNTO DE MUESTREO	NI
TECNICO RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA	Cliente
TIPO DE TOMA DE MUESTRA (Simple/Compuesta)	Compuesta
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2019/02/15
HORA DE TOMA DE MUESTRA	9:00
FECHA DE INGRESO DE MUESTRA	2019/03/28
HORA DE INGRESO	16:46
FECHA DE ANALISIS	2019/03/28 - 2019/04/12
FECHA DE REALIZACIÓN DE INFORME	2019/04/15
ANALISTA RESPONSABLE DE ELABORACION DE INFORME	Cristofer Sánchez

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. PERMISIBLE	METODOS	U (k=2)	Especial	CUMPLE				
					S0018-19					
Plomo	mg/Kg	NA	PEE24/ EPA 3050 B, SM-Eg-23-2017, 3111 B	27%	16,4	NA				
Niquel	mg/Kg	NA	PEE25/ EPA 3050 B; SM-Eg-23-2017, 3111B	21%	31,3	NA				
Cadmio	mg/Kg	NA	PEE23/ EPA3050B; SM-Eg-23-2017, 3111B	29%	<1,0	NA				
Cromo hexavalente [Ⓢ]	mg/Kg	NA	APHA 3500 Cr B	NA	0,39	NA				
Mercurio [Ⓢ]	mg/Kg	NA	APHA 3120 B	NA	1,86	NA				
Selenio ^{***}	mg/Kg	NA	APHA 3120 B	10%	0,709	NA				
Arsénico ^{***}	mg/Kg	NA	APHA 3120 B	20%	4,28	NA				

*** Parámetros subcontratados acreditados a Laboratorios con número de acreditación N° OAE LE 2C 05-002. El informe se encuentra disponible en el laboratorio
 Ⓢ Parámetros subcontratados no acreditados a Laboratorios con número de acreditación N° OAE LE 2C 05-002. El informe se encuentra disponible en el laboratorio



 Dr. Luis Seto
 RESPONSABLE TECNICO

NOTA: C= Cumple con la norma, NC=No cumple con la norma, NI= No indicado por el cliente, NA=No aplica
 SM= Standard Methods; EPA=Environmental Protection Agency; TNRCC 1005=Texas Natural Resource Commissions;
 PEE= Procedimiento Especifico de Ensayo

U : Incertidumbre del Método

- El Informe solo afecta a las muestras sometidas a ensayo - Prohibida la reproducción parcial, por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio - Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE - El resultado de Cadmio fue 0,520 mg/Kg, valor comprendido fuera del alcance de acreditación del SAE - El resultado de Mercurio se encuentran fuera del alcance de acreditación del laboratorio Subcontratado - Resultados reportados en base seca

INFORME DE RESULTADOS
LABORATORIO QUIMICO AMBIENTAL

ANALISIS: Físicoquímico de Muestras de Suelo CIU: NA R: S0019-19
MC22.1
Revisión: 8
Orden de trabajo N° OT-2019-S-010

CLIENTE: Eddy Santiago Jaque Castellano DIRECCIÓN: Riobamba TELEFONO: 0995972028 SOLICITADO POR: Sr. Eddy Santiago Jaque Castellano PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS: NA	TIPO DE MUESTRAS: Lodo CÓDIGO DE MUESTREO: B - Sin Irradiar CUERPO RECEPTOR: NA LOCALIZACIÓN: GEAA - Grupo de Energías Alternativas Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
---	--

CONDICIONES AMBIENTALES	TEM AMB (°C): 17
	HUMEDAD (%): 71
COORDENADAS EN EL PUNTO DE MUESTREO	NI
TECNICO RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA	Cliente
TIPO DE TOMA DE MUESTRA (Simple/Compuesta)	Compuesta
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2019/02/16
HORA DE TOMA DE MUESTRA	9:00
FECHA DE INGRESO DE MUESTRA	2019/03/28
HORA DE INGRESO	16:45
FECHA DE ANALISIS	2019/03/28 - 2019/04/12
FECHA DE REALIZACIÓN DE INFORME	2019/04/16
ANALISTA RESPONSABLE DE ELABORACION DE INFORME	Cristófor Sánchez

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. PERMISIBLE	METODOS	U (k=2)	Especial		CUMPLE
					S0019-19		
Plomo	mg/Kg	NA	PEE24/ EPA 3050 B, SM-Ed-23 2017, 3111 B	27%	22,8	NA	
Níquel	mg/Kg	NA	PEE25/ EPA 3050 B; SM-Ed-23-2017, 3111B	21%	36,0	NA	
Cadmio	mg/Kg	NA	PEE23/ EPA3050B; SM-Ed-23-2017, 3111B	29%	1,21	NA	
Cromo hexavalente ⁶	mg/Kg	NA	APHA 3500 Cr B	NA	0,38	NA	
Mercurio ⁶	mg/Kg	NA	APHA 3120 B	NA	0,751	NA	
Selenio ⁶	mg/Kg	NA	APHA 3120 B	NA	1,68	NA	
Arsénico ^{6**}	mg/Kg	NA	APHA 3120 B	20%	5,08	NA	

^{6**} Parámetros subcontratados acreditados a Laboratorios con número de acreditación N° OAE LE 20 05-002. El informe se encuentra disponible en el laboratorio
⁶ Parámetros subcontratados no acreditados a Laboratorios con número de acreditación N° OAE LE 20 05-002. El informe se encuentra disponible en el laboratorio

Dr. Luis Solo
RESPONSABLE TECNICO

NOTA: C= Cumple con la norma, NC=No cumple con la norma, NI= No indicado por el cliente, NA=No aplica
 SM= Standard Methods; EPA= Environmental Protection Agency; TNRC 100= Texas Natural Resource Commissions;
 PEE= Procedimiento Especifico de Ensayo

El Informe solo afecta a las muestras sometidas a ensayo

U : Incertidumbre del Método

- Prohibida la reproducción parcial, por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio
- Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
- Los resultados de Mercurio y Selenio se encuentran fuera del alcance de acreditación del laboratorio Subcontratado
- Resultados reportados en base seca

INFORME TÉCNICO

MUESTRA	ANÁLISIS	PESO SECO - SUELO (g)	VOLUMEN EXTRACTANTE (ml)	CONCENTRACIÓN (mg/Kg)	CONCENTRACIÓN (mg/L)
S0018-19	Plomo	1,906	100	16,4	0,313
	Niquel	1,906	100	31,3	0,597
	Cadmio	1,906	100	0,52	0,010
	Cromo hexavalente©	10	100	0,39	0,039
	Mercurio©	5	50	1,86	0,186
	Selenio***	5	50	0,709	0,071
	Arsénico***	1	50	4,28	0,086
S0019-19	Plomo	1,8123	100	22,6	0,410
	Niquel	1,8123	100	36	0,652
	Cadmio	1,8123	100	1,21	0,022
	Cromo hexavalente©	10	100	0,38	0,038
	Mercurio©	5	50	0,751	0,075
	Selenio***	5	50	1,68	0,168
	Arsénico***	1	50	5,08	0,102

Fórmula empleada:

$$\frac{\text{Concentración (mg)}}{\text{(Kg)}} \times \frac{\text{Peso seco - suelo(g)}}{\text{Volumen extractante (mL)}} \times \frac{1 \text{ (Kg)}}{1000 \text{ (g)}} \times \frac{1000 \text{ (mL)}}{1 \text{ (L)}} = \text{Concentración (mg/L)}$$

Elaborado por: Cristófer Sánchez

Anexo F. Memoria fotográfica de la construcción del equipo.

a) Materia Prima



b) Herramientas Utilizadas

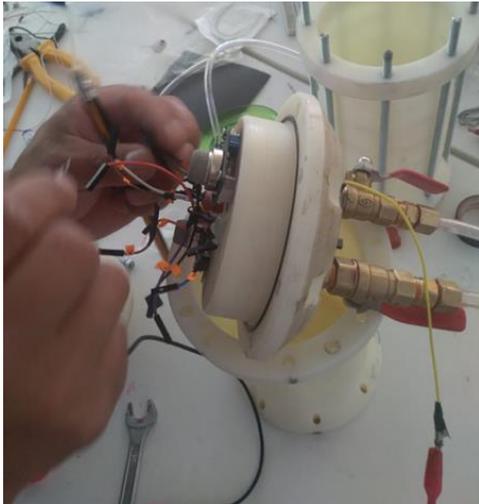


c) Mecanizado



Realizado: Jaque Eddy	Fecha: 04/07/2019	Codificación: IPEC-RFOS-001-2019	INSTITUTO DE POSTGRADOS ESPOCH
Correo: eddysantiago16jc@gmail.com	Firma:	Denominación:	
Teléfono: (03)2 904891/ 0995072028		REGISTRO FOTOGRÁFICO	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE SU TITULAR CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DE AUTOR PENADA POR LA LEY.

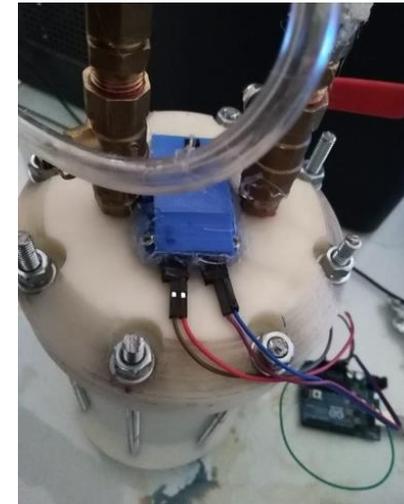
d)Ensamblaje de accesorios



e)Armado de prototipo



f)Prueba del sistema conectada



Realizado: Jaque Eddy	Fecha: 04/07/2019	Codificación: IPEC-RFOS-001-2019	INSTITUTO DE POSTGRADOS ESPOCH
Correo: eddysantiago16jc@gmail.com	Firma:	Denominación:	
Teléfono: (03)2 904891/ 0995072028		REGISTRO FOTOGRÁFICO	
			ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE SU TITULAR CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIALNO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DE AUTOR PENADA POR LA LEY.

g) Disposición de Lodos Irradiados



h) Sellado de prototipo



i) Sistema en operación



Realizado: Jaque Eddy	Fecha: 04/07/2019	Codificación: IPEC-RFOS-001-2019	INSTITUTO DE POSTGRADOS ESPOCH
Correo: eddysantiago16jc@gmail.com	Firma:	Denominación:	
Teléfono: (03)2 904891/ 0995072028		REGISTRO FOTOGRÁFICO	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE SU TITULAR CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIALNO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DE AUTOR PENADA POR LA LEY.

Anexo G. Ficha técnica del sensor MQ-4 para la determinación de metano.

TECHNICAL DATA

MQ-4 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to CH₄, Natural gas.
- * Small sensitivity to alcohol, smoke.
- * Fast response . * Stable and long life * Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of CH₄, Natural gas. LNG, avoid the noise of alcohol and cooking fumes and cigarette smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	20K Ω	
R _H	Heater resistance	33 Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 750mw	

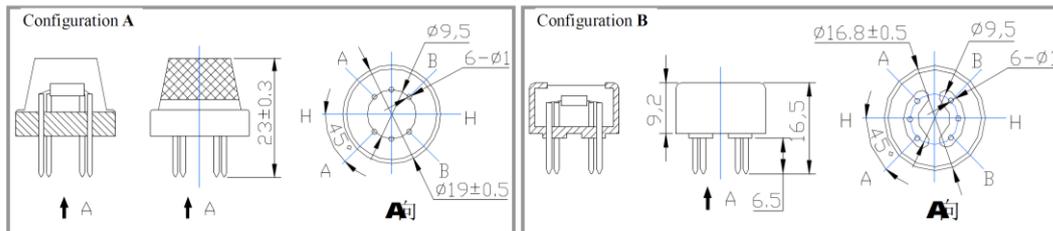
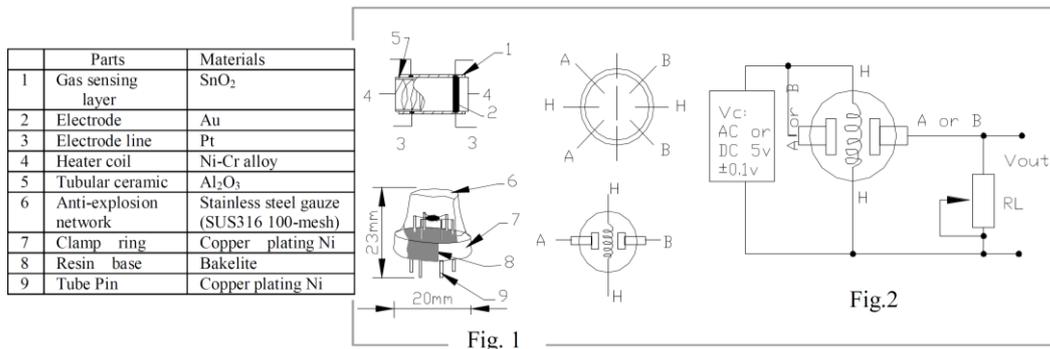
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10°C-50°C	
T _{as}	Storage Tem	-20°C-70°C	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R _s	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (1000ppm CH ₄)	Detecting concentration scope: 200-10000ppm CH ₄ , natural gas
α (1000ppm/ 5000ppm CH ₄)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20°C ± 2°C Humidity: 65%±5%	V _c : 5V±0.1 V _H : 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Strucyure and configuration, basic measuring circuit



Structure and configuration of MQ-4 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-4 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2
 E. Sensitivity characteristic curve

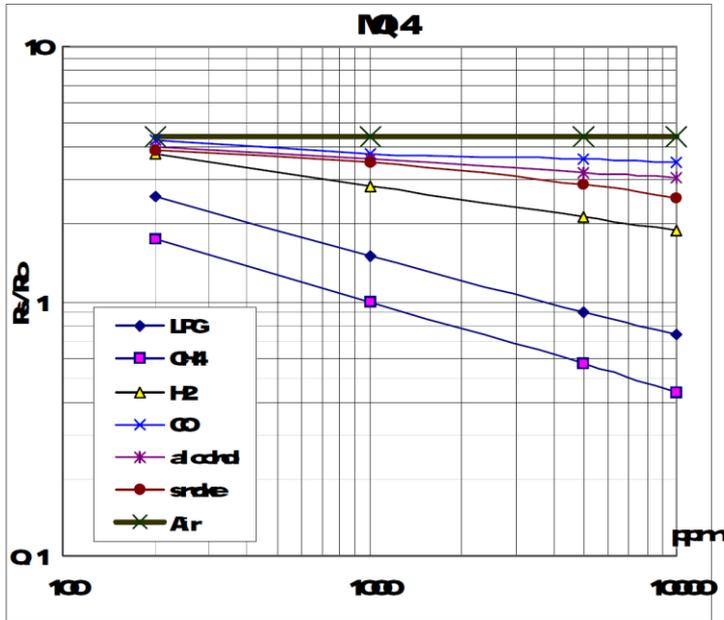


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-4

Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-4 for several gases. in their: Temp: 20°C、Humidity: 65%、O₂ concentration 21%、RL=20kΩ
 Ro: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in the clean air.
 Rs:sensor resistance at various concentrations of gases.

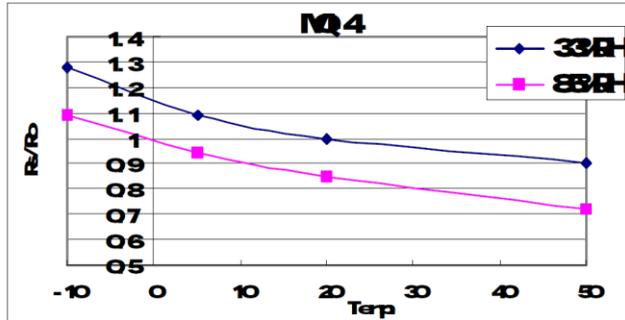


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-4 on temperature and humidity. Ro: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in air at 33%RH and 20 degree.
 Rs: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in air at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-4 is difference to various kinds and various concentration gases. So,When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 5000ppm of CH₄ concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 20KΩ (10KΩ to 47KΩ).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

Anexo H. Ficha técnica del sensor MQ-8 para la determinación de hidrógeno.

TECHNICAL DATA

MQ-8 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to Hydrogen (H₂)
- * Small sensitivity to alcohol, LPG, cooking fumes
- * Stable and long life

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of Hydrogen (H₂), avoid the noise of alcohol and cooking fumes, LPG, CO.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	10K Ω	
R _H	Heater resistance	31 ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mW	

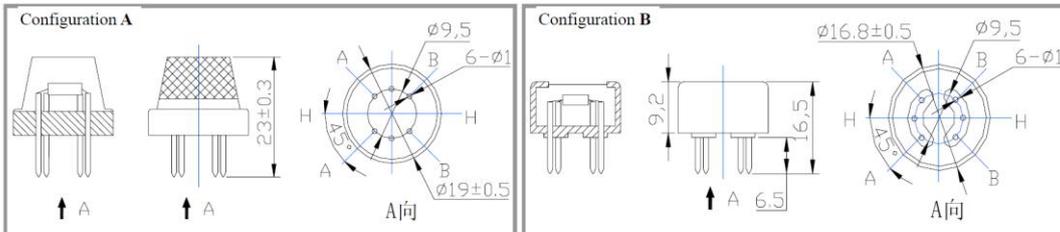
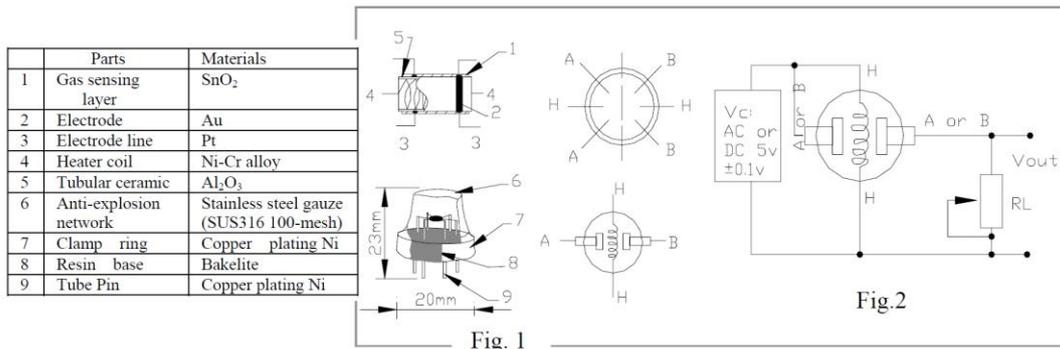
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10°C-50°C	
T _{as}	Storage Tem	-20°C-70°C	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R _s	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (1000ppm H ₂)	Detecting concentration scope: 100-10000ppm Hydrogen (H ₂)
α (1000ppm/ 500ppmH ₂)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20°C ± 2°C Humidity: 65%±5%	V _c : 5V±0.1 V _H : 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit



Structure and configuration of MQ-8 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-8 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2
 E. Sensitivity characteristic curve

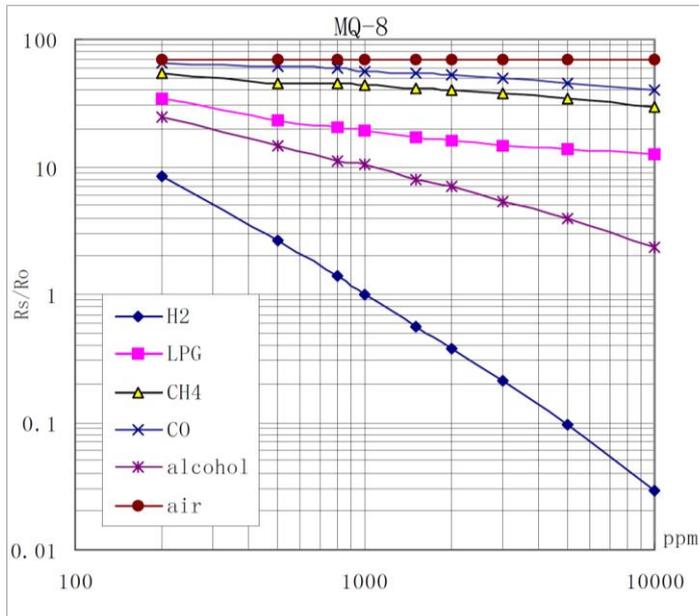


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-8

Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-8 for several gases.

in their: Temp: 20 °C、
 Humidity: 65%、
 O₂ concentration 21%
 RL=10k Ω

Ro: sensor resistance at 1000ppm H₂ in the clean air.
 Rs:sensor resistance at various concentrations of gases.

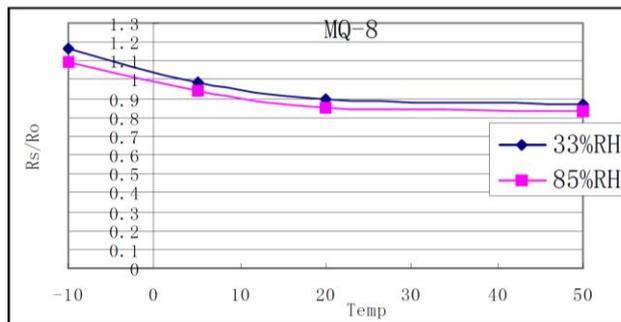


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-8 on temperature and humidity.
 Ro: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in air at 33%RH and 20 degree.

Rs: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in air at different temperatures and humidities.

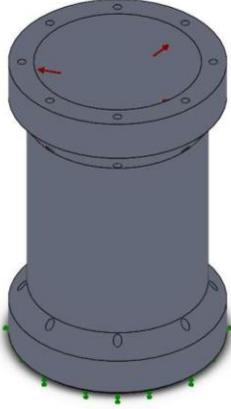
SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-8 is difference to various kinds and various concentration gases. So,When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 1000ppm H₂ concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 10 K Ω (5K Ω to 33 K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

Anexo I. Simulación de cuerpo del reactor prototipo.

Información de modelo



Nombre del modelo: CUERPO-
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Chaflán2 	Sólido	Masa:0.65857 kg Volumen:0.000572669 m ³ Densidad:1150 kg/m ³ Peso:6.45399 N	D:\ESCRITORIO\equipos\lo p-3\CUERPO-.SLDPRT Apr 23 16:52:20 2019

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Nylon Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 6e+07 N/m ² Límite de tracción: 7.92897e+07 N/m ² Módulo elástico: 1e+09 N/m ² Coeficiente de Poisson: 0.3 Densidad: 1150 kg/m ³ Coeficiente de dilatación térmica: 1e-06 /Kelvin	Sólido 1(Chaflán2)(CUERPO-)
Datos de curva:N/A		