



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR EXPERIMENTAL
CON UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE TEMPERATURA**

Presenta: Gabriela Orisell Gastelum Fernández

Tesis presentada como requisito para obtener el título de:

Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables

Director de Tesis: Dr. Ricardo Vázquez Perales

Asesor: Dr. Luis Armando Moreno Coria

Puebla, Pue. Febrero 2020

RESUMEN

El presente trabajo consta del desarrollo de un biodigestor estacionario tipo laguna a escala experimental, en donde se describen las etapas que se llevaron a cabo para realizarlo pasando por su diseño, fabricación, instalación y puesta en marcha.

Se explica también, cómo se diseñó e implementó un sistema de monitoreo de ciertas variables críticas que influyen en el proceso de la digestión anaerobia, así como un control ON/OFF para un sistema térmico.

Este prototipo es para fines académicos, por lo que se diseñó pensando en futuras modificaciones para diferentes investigaciones, corridas y pruebas que estudiantes, profesores y todo aquel interesado en el área de la bioenergía pueda realizar, teniendo un reactor fácil de operar con un sistema que le permita conocer los datos de las variables que desee investigar.

Al final del trabajo se agregó una lista algunos de los trabajos a futuro en los cuales se puede trabajar con el reactor aquí presentado, esperando que sea una motivación para futuras investigaciones y así enriquecer el área de la implementación de los biodigestores en México.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis asesores Dr. Luis Armando Moreno Coria y Dr. Ricardo Vázquez Perales por creer en mí, apoyarme en momentos críticos de la realización del trabajo, por motivarme a continuar cuando dudaba cumplir con todos los objetivos. Ha sido un camino muy largo y ustedes no quitaron el dedo del renglón en ningún momento, sus consejos los llevaré siempre a lo largo de mi vida profesional.

A todos los profesores que me han asesorado para culminar el proyecto, sin ustedes tal vez seguiría intentando programar el primer sensor. Es aquí en donde agradezco especialmente a la Dra. Olga G. Felix Beltrán por su apoyo en la etapa térmica del proyecto.

Gracias a mi abuela Rosita y tía Duriell, por ser mis confidentes y dos grandes pilares en mi vida, por darme todo su amor desde mi primer día y hacerme sentir la persona más amada. A mis tíos Wendy y Daniel, por estar a mi lado incondicionalmente, por abrirme las puertas de su hogar y ser mis segundos padres desde mi primer día en la universidad.

Gracias a mi padre por todo su esfuerzo, trabajo y por apoyarme en este largo camino y darme su voto más grande de confianza. Un pedacito de este triunfo también es para ti.

Gracias a todos mis amigos que me han acompañado hasta este momento, por compartir días de frustración, alegrías y por hacerme sentir en casa aun estando lejos de ella.

DEDICATORIA

A mi madre, por su amor y apoyo incondicional, por creer en mí, por su confianza, y seguirme en cada paso de este viaje al que llamamos vida. Gracias a tu gran esfuerzo hoy puedo culminar este sueño y lograr una meta más.

A mis hermanas Ximena y María Fernanda, ustedes son mi mayor motor de vida y mi más grande inspiración.

A mi compañero de aventuras y de vida, Guillermo, por tanto amor, comprensión, apoyo y paciencia, por estar a mi lado incluso en mis peores días y ayudarme a levantarme después de cada tropiezo.

**“Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Consejo de Ciencia y
Tecnología del Estado de Puebla”.**

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|---|-------|
| RESUMEN | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| LISTA DE TABLAS | x |
| LISTA DE FIGURAS..... | xi |
| INTRODUCCIÓN | xiii |
| ANTECEDENTES | xiv |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | xviii |
| HIPÓTESIS..... | xix |
| OBJETIVOS | xx |
| General | xx |
| Específicos | xx |
| JUSTIFICACIÓN | xxi |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 1.1 Bioenergía..... | 24 |
| 1.1.1 Biodigestores..... | 25 |
| 1.1.2 Bioenergía en México..... | 31 |
| 1.1.3 Digestión Anaerobia | 33 |
| 1.1.4 Factores determinantes en la etapa metanogénica | 35 |
| 1.1.4.1 Composición bioquímica de la biomasa | 36 |
| 1.1.4.2 Temperatura..... | 37 |

| | |
|---|----|
| 1.1.4.3 pH..... | 38 |
| 1.1.4.4 Velocidad de carga orgánica (VCO)..... | 38 |
| 1.1.4.5 Ácidos grasos volátiles (AGVs)..... | 38 |
| 1.2 Instrumentación de Biodigestores..... | 39 |
| 1.2.1 Sistemas de control automático | 39 |
| 1.2.2 Control de potencia: <i>on/off</i> | 41 |
| 1.2.3 Sistemas térmicos..... | 41 |
| 1.2.4 Control de biodigestores | 41 |
| CAPÍTULO II. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL BIORREACTOR ESTACIONARIO . | 43 |
| 2.1 Elaboración del biodigestor | 43 |
| 2.1.1 Descripción del diseño del reactor | 44 |
| 2.1.2 Diseño en SolidWorks | 44 |
| 2.1.3 Cálculo térmico y selección del sistema de calentamiento..... | 46 |
| 2.1.3.1 Potencia eléctrica | 47 |
| 2.1.3.2 Elección de la resistencia..... | 49 |
| CAPÍTULO III. INTALACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL REACTOR | |
| ESTACIONARIO | 50 |
| 3.1 Instalación del biodigestor | 50 |
| 3.2 Instrumentación del biodigestor..... | 53 |
| 3.2.1 Sensores MQ..... | 54 |
| 3.2.2 Sensor MG 811 | 57 |
| 3.2.3 Atlas pH kit | 59 |
| 3.2.4 Sensor T9602 | 59 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.5 Gravity: SEN0237-A | 59 |
| 3.2.6 RTD PT 100..... | 60 |
| 3.2.7 Programación de sensores..... | 61 |
| 3.3 Control de temperatura | 66 |
| CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS..... | 69 |
| 4.1 Carga y descarga del biodigestor | 69 |
| 4.1.1 Primera carga | 70 |
| 4.1.2 Segunda carga | 76 |
| 4.2 Interfaz LabView | 81 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 83 |
| CONCLUSIÓN..... | 84 |
| TRABAJO A FUTURO..... | 85 |
| REFERENCIAS..... | 86 |
| APÉNDICES..... | 90 |
| Apéndice A. Cálculo de potencia de resistencias térmicas..... | 90 |
| Apéndice B. Código de calibración y operación de sensores MQ..... | 95 |
| Apéndice C. Código del sensor pH..... | 96 |
| Apéndice D. Código y control de temperatura | 99 |
| ANEXOS | 101 |
| Anexo I. Hoja de datos MQ 132. | 101 |
| Anexo II. Hoja de datos MQ 2..... | 104 |
| Anexo III. Hoja de datos MG 811 | 106 |
| Anexo IV. Hoja de datos Probeta medidora de pH..... | 108 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Anexo V. Hoja de datos T9602..... | 112 |
|-----------------------------------|-----|

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Características generales del biogás. | 25 |
| Tabla 1.2 Comparación entre tecnologías anaeróbicas..... | 29 |
| Tabla 1.3. Potenciales para generación de electricidad en el sector pecuario..... | 31 |
| Tabla 1.4 Clasificación de sustratos para la digestión anaeróbica..... | 36 |
| Tabla 3.1 Descripción de sensores utilizados en el sistema de monitoreo..... | 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Biodigestor globo. | 27 |
| Figura 1.2 Biodigestor de domo fijo. | 28 |
| Figura 1.3 Diagrama a bloques de un sistema de control de lazo cerrado. | 40 |
| Figura 2.1 Ensamble final, vista frontal. | 45 |
| Figura 2.2 Ensamble final, vista superior. | 46 |
| Figura 3.1 Estructura del techo para proteger el biodigestor. | 51 |
| Figura 3.2 Vista frontal del biodigestor instalado en el sitio. | 52 |
| Figura 3.3 Vista superior del biodigestor instalado en el sitio de trabajo. | 53 |
| Figura 3.4 Características típicas de sensibilidad de MQ-136 para varios gases. Gráfica logarítmica. | 56 |
| Figura 3.5 Curvas características de sensibilidad del sensor MQ2 para diferentes gases. Gráfica logarítmica. | 57 |
| Figura 3.6 Sensor MG811. | 58 |
| Figura 3.7 Placa MAX 31865. | 60 |
| Figura 3.8. Diagrama de conexiones de sensores al Arduino MEGA. | 62 |
| Figura 3.9. Diagrama de conexiones del módulo MAX31856 al Arduino UNO. | 63 |
| Figura 3.10. Código de LabView utilizado para mostrar los datos adquiridos por el Arduino MEGA. | 64 |
| Figura 3.11 Placa de pines. | 65 |
| Figura 3.12 Protección del Arduino. | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.13 Diagrama a bloques de control térmico..... | 67 |
| Figura 3.14 Acción del control ON/OFF aplicado a las resistencias térmicas | 68 |
| Figura 4.1 Biodigestor cargado..... | 70 |
| Figura 4.2 Biodigestor sellado | 71 |
| Figura 4.3. Promedio diario de los registros de temperaturas del sustrato dentro del biodigestor..... | 72 |
| Figura 4.4. pH registrado durante cuatro semanas, sin control de temperatura..... | 73 |
| Figura 4.5. Rampa de respuesta inicial del sistema térmico. | 77 |
| Figura a1.1 Vista frontal del reactor. | 91 |
| Figura a1.2 Vista lateral del reactor..... | 91 |
| Figura a1.3 Vista superior del reactor..... | 92 |

INTRODUCCIÓN

Hoy en día nos enfrentamos a una crisis energética-ambiental de grandes dimensiones. Por un lado, los países compiten por la generación energética para lograr cubrir la gran demanda de las poblaciones, la cual tiene un crecimiento exponencial en todo el mundo; por otro lado, la crisis ambiental que se vive hoy en día alrededor del mundo es una situación que preocupa a las naciones, ya que las altas concentraciones de emisiones de gases contaminantes, producidos por combustibles fósiles, están acabando con los recursos y como consecuencia con los ecosistemas.

En el Estado de Puebla, se vive una crisis ambiental sin precedentes llegando a tener días con contingencia ambiental, lo cual genera problemas de salud entre la población, obligando a las autoridades a realizar medidas urgentes para reducir las emisiones GEI (Gases de Efecto Invernadero).

La digestión anaerobia de los desechos del ganado es una solución a dichos problemas, ya que puede ser aprovechada en digestores anaeróbicos para así poder prevenir problemas ambientales que han sido causados por instalaciones ganaderas y al mismo tiempo obtener energía renovable. El aprovechamiento de la biomasa tiene un doble beneficio: (1) es un importante recurso de energía renovable y (2) tiende a mejorar el medio ambiente y el clima (European Commission, 1997). Los biodigestores son una tecnología que ofrece convertir el estiércol en biogás y en biol, y al mismo tiempo mitigando con ello GEI. En este trabajo se presenta la investigación sobre el comportamiento de los parámetros más importantes dentro de la producción de biogás, así como la

implementación de un sistema de control y monitoreo de las variables críticas de un biorreactor anaerobio experimental.

Dicha investigación busca arrojar la propuesta de un sistema de monitorización de parámetros de interés, que en este caso son pH, humedad, presión, temperatura, oxígeno disuelto, concentración de metano, de dióxido de carbono, de metano y de ácido sulfhídrico, así como un sistema que controle la temperatura y permita tomar decisiones sobre la operación del biodigestor o corregir las variables que se encuentren en estado crítico.

Se busca que dicha tecnología a desarrollar sea replicable, teniendo como resultados un manual de cómo operar el biodigestor y sobre cómo interpretar los datos arrojados por el sistema para que se pueda optimizar con el fin de llevarlo a los productores en granjas. Esto representa una gran oportunidad para ellos de producir su propia energía y así mejorar las condiciones de su granja y comunidad. También se busca que los resultados obtenidos sean útiles para otros trabajos de investigación, brindando la oportunidad de hacer pruebas para la comprobación de hipótesis, ya que el prototipo se encuentra instalado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

ANTECEDENTES

En nuestro país el incremento en la participación de bioenergéticos en la matriz de generación eléctrica ayuda a satisfacer la creciente demanda de energía y contribuye a alcanzar los objetivos ambientales para la disminución de contaminantes, los cuales son (SENER, 2016):

Objetivo 1 “Promover y facilitar el crecimiento sostenido y sustentable de bajo carbono con equidad y socialmente incluyente”

Objetivo 2 “Incrementar la resiliencia a efectos del cambio climático y disminuir las emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero”

El sector ganadero es proveedor de dos de los principales alimentos de la canasta básica, carne y leche, sin embargo, los impactos ambientales de la ganadería tienen grandes efectos a nivel global y local. La ganadería juega un papel preponderante en el cambio climático por la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente metano (CH₄), utiliza y desecha agua en grandes cantidades y contribuye a la pérdida de biodiversidad, debido a la pérdida de hábitat por el cambio de uso de suelo por pastoreo (FAO, 2019).

Un biodigestor puede ser económicamente viable para el productor y a la vez proporcionar beneficios ambientales, tomando en cuenta que el metano tiene un potencial de calentamiento global 25 veces más que el dióxido de carbono (CO₂) (Dalai, Allen., & Richards, 2008). El sector agropecuario es la principal fuente de gases de efecto invernadero (GEI) diferentes a la combustión. La ganadería contribuye con el 42% de las emisiones de metano (CH₄) (SAGARPA, 2012), las principales fuentes de emisión del sector ganadero provienen del metano generado de la descomposición de excretas de la población rumiante.

Parte de la literatura revisada muestra biodigestores construidos para el abastecimiento de pequeñas familias que carecen de instrumentación, ya que se centran más en que el diseño de construcción resulte económico sin que sean energéticamente sustentables. En otra parte, las propuestas de biodigestores que se plantean llegan a ser diseños de uso exclusivo para laboratorio, de tal manera que operan en condiciones

óptimas; sin embargo, son fabricados para realizar experimentación a base de toma de muestras, alterando los resultados obtenidos de tal manera que se alejan de las posibles respuestas de los sistemas en condiciones normales de operación en una granja.

Hay dos tipos de abordajes al control de sistemas tipo anaerobio: (1) control basado en modelos y (2) control basado en el conocimiento. El control basado en modelos tiene comandos clásicos como los PID (Proportional-Integral-Derivative), que es el tipo de algoritmo de control más usado, o con comandos avanzados de control óptimo, de control adaptativo o de control robusto. En el control basado en el conocimiento (de métodos heurísticos), se usan: el control basado en leyes, el control basado en sistemas expertos, el control difuso y el control mediante redes neurales.

Para el control de la digestión anaerobia, en varios proyectos se han utilizado diferentes sistemas de simulación y control. Dochain y Bastin usaron desde 1985 esquemas de control adaptativo de tiempo continuo en procesos de una o dos etapas; una característica de su estudio es que no requirieron una descripción analítica de la tasa de crecimiento microbiana, sino que se basaron en la medición de las variables críticas de entrada y salida del proceso (Dochain & Bastin, 1985). Por otro lado, en la revista *International Symp on Anaerobic Digestion* se ha mencionado que al utilizar sistemas basados en una ley de control, se debe tomar en cuenta la variación de tres parámetros principales de salida: el pH en la fase líquida, la concentración de gas y la producción de gas en la fase metanogénica (Moletta, Escoffier, Ehlinger, Coudert, & Leyris, 1994).

En la Universidad de Santander Martínez Guillermo y Rodríguez Carolina diseñaron e implementaron en 2007 un biodigestor anaerobio de lecho fijo para operación continua con control de temperatura y pH en tiempo real; los resultados permitieron

seleccionar sustratos específicos para futuras investigaciones y montajes en laboratorio, así como un parteaguas para la implementación de una monitorización con interfaz gráfica (Mártinez & Rodríguez , 2007).

Dicha investigación fue clave para que en 2010 se desarrollara, por estudiantes de la misma institución, un diseño e implementación de un biodigestor a nivel laboratorio en el cual la producción de metano fue basada en presión, temperatura y pH. El biodigestor fue fabricado de acero inoxidable, controlando la temperatura con un serpentín de cobre por donde fluye agua caliente a tres diferentes referencias: 34, 37.85 y 40°C. Según los resultados obtenidos concluyeron que, a mayor temperatura mayor presión dentro del tanque en menor tiempo; el efecto de la temperatura sobre el pH es mínimo en el caso de las bacterias mesofílicas, manteniendo un rango de pH entre 5.5 y 6. Dicha bacteria no se vio afectada por los cambios de temperatura de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. (Díaz H. & Bermúdez G., 2010).

Mientras tanto, en México la investigación más reciente sobre el control de temperatura y los efectos que tiene ese parámetro en el proceso realizada por Gustavo Aguilar, quien desarrolló un sistema de control difuso de temperatura y control de pH dentro de un biodigestor modular, alimentado diariamente con mezclas de residuos diferentes. Lo relevante de los resultados arrojadas es que se demostraron cuáles son las temperaturas óptimas en cada fase de la digestión anaerobia: 37°C en la hidrólisis, 30°C en acetogénesis y 35°C en metanogénesis. Además, se concluyó que el control de pH es irrelevante en los estados de la biodigestión anaerobia (Águilar, 2013).

Como se puede notar, en los trabajos revisados sobre el tema del control de biodigestores, no existe alguno que controle y estudie de forma independiente la principal variable (temperatura) que rige el proceso, así como su influencia en las otras variables que

intervienen en la digestión anaerobia, impidiendo que se determinen las condiciones óptimas de la operación en cada fase.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad existe un interés para mejorar el funcionamiento de los biodigestores, ya que al acelerar el proceso de la digestión anaerobia se garantiza el incremento de los beneficios para la sociedad colectiva que decida implementar este tipo de tecnologías, pues sería una carga menos para los rellenos sanitarios y, en el caso de las comunidades cercanas a las granjas, ayuda a disminuir los malos olores provocados por la materia orgánica desechada por los animales, las emisiones de GEI y la contaminación del agua, aprovechando el estiércol como fuente de energía y de fertilizantes biológicos que beneficien a la comunidad.

Sin embargo, las investigaciones actuales no han logrado dar una respuesta completa que logre explicar operativamente el comportamiento de la reacción anaerobia en un biodigestor. En la literatura se plantea que para observar y después poder anticipar las condiciones de la reacción anaerobia dentro del biodigestor, la instrumentación electrónica representa una opción viable, tal como lo explica la autora Caridad Mayara Sosa Delgado en su tesis *Parámetros de control y monitoreo del proceso en digestores anaerobios de pequeña escala y diferentes tecnologías (2015)*. En su trabajo, Sosa compara los diferentes resultados obtenidos en diferentes tipos de tecnologías aplicadas en los biodigestores, esto sin hacer un diseño propio de un sistema de monitoreo.

Además, muchos sistemas de monitorización y control son diseñados normalmente sin tomar en cuenta al futuro usuario de dicho sistema, quienes normalmente no tienen conocimiento de instrumentación electrónica y mucho menos de cómo manejarla. También futuros investigadores sobre la misma temática no pueden dar continuidad al trabajo previamente realizado por otros investigadores por la falta de disponibilidad de resultados claros sobre del diseño de biodigestores para futuras mejoras o propuestas.

El principal problema es que la investigación respecto a cómo influyen todas las variables relevantes dentro de un biodigestor anaeróbico está incompleta. En algunas investigaciones se centran únicamente en las variables químicas, como el pH y la DQO (Demanda Química de Oxígeno), mientras que en otras se centran solamente en monitorear o controlar variables físicas como la temperatura. Por ello, estas propuestas no han podido dar una solución y conclusiones integrales respecto a la reacción anaerobia en biodigestores y las relaciones de las variables críticas que se ven involucradas en la producción de biogás.

HIPÓTESIS

Si se logra realizar un sistema de monitoreo de los parámetros de variables tanto físicas como químicas que interactúan en el proceso dentro de un biodigestor anaerobio estacionario (también conocido como en lote), se podrá desarrollar una metodología para que el control de dichas variables sea adecuado en el proceso de la producción de biogás y así poder proponer optimizaciones en dicho proceso.

OBJETIVOS

General

Diseñar, construir, poner en operación y hacer pruebas en un biorreactor, con un sistema de control de temperatura y monitorización de parámetros y variables críticas dentro de los procesos del sistema.

Específicos

- i. Diseñar un biorreactor anaerobio experimental de producción en lote.
- ii. Diseñar un sistema de monitorización de las variables críticas del sistema e implementar un protocolo de comunicación entre los sensores y la interfaz.
- iii. Diseñar e implementar un control de la temperatura para el sistema.
- iv. Instalar y poner en operación el biorreactor con los dispositivos de monitorización y de control.
- v. Realizar pruebas experimentales para conocer el estado actual del proceso anaerobio y actuar sobre la variable de temperatura del proceso para mejorar el equilibrio operativo.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existen distintos tipos de sistemas de monitoreo y control de parámetros para los biodigestores, sin embargo, estos sistemas son sumamente costosos debido al tipo de sensores que se implementan y a los programas en los que se recopilan los datos.

Al revisar la literatura sobre sistemas de monitoreo y control para biodigestores a pequeña escala, la información disponible no es clara, ya que los trabajos de investigación carecen de procedimientos replicables o apropiados para obtener resultados confiables, sin mencionar que la mayoría de los trabajos son realizados fuera de México y específicamente fuera del estado de Puebla.

Es importante tener presente que las condiciones ambientales influyen de manera considerable en la operación de los biodigestores y, por consecuencia, en la producción de biogás que se puede obtener. Puebla, al ser un estado con actividad agropecuaria significativa, resulta de interés estudiar las condiciones de operación de los biodigestores en esta zona geográfica para implementar sistemas que permitan mejorar la producción de biogás, esto para poder dar el impulso a esta tecnología, volviéndola atractiva para los medianos y pequeños productores. Por esta razón se eligió este trabajo de investigación que busca integrar la teoría y la práctica aterrizándola en las condiciones que se tienen en el Estado de Puebla.

La biomasa juega un doble papel: primero como fuente de energía para sustituir los combustibles fósiles y segundo como una solución atractiva para la mitigación de gases invernadero en el mundo, ya que una de las materias primas con las que se trabaja en la biomasa es estiércol, el cual genera altas concentraciones de emisiones gases de efecto

invernadero. El uso de digestores anaerobios en las granjas ganaderas y establos lecheros para la producción de energía ha mostrado un crecimiento en los últimos tiempos.

En México se promueve y financia la adopción de biodigestores mediante programas gubernamentales a través de las secretarías de estado (SAGARPA principalmente) y los gobiernos municipales. Aunque estos programas han logrado que muchos ganaderos se beneficien aprovechando el biogás, en la mayoría de los casos los biodigestores no operan óptimamente ya que existen escasos estudios acerca del adecuado manejo del proceso para la producción de biogás en nuestro país. Al mismo tiempo, la falta de medición de las variables críticas del sistema y, en conjunto con el carecimiento de procesos de control que garanticen la calidad del biogás, evitan identificar oportunamente fallas para retomar acciones en tiempo inmediata.

Este trabajo busca lograr un estudio de las reacciones que ocurren dentro de un biodigestor integrando el diseño del prototipo, la elección de componentes adecuados para su instrumentación y la interpretación de los resultados obtenidos, todo esto con el fin de trazar un camino claro de investigación que dé pie a establecer parámetros de operación óptimos para la producción de biogás energéticamente viable, es decir que se pueda utilizar para generar energía térmica o eléctrica. A la vez se busca crear un sistema de control de temperatura en un prototipo que operará en condiciones ambientales, sin estar dentro de un laboratorio ni alejado de las condiciones reales.

Se utiliza el sistema de monitoreo para corroborar que el control de la temperatura funciona y mejora las condiciones de operación del biodigestor, las cuales pueden ser reflejadas en el tiempo de retención hidráulica (disminuyendo el tiempo para que el aprovechamiento de la biomasa sea mayor), o bien demostrando que el biogás que se

produzca sea mejor que el biogás sin un control de temperatura, lo cual es notable en parámetros como el pH, la humedad, entre otros que se buscan monitorear en este proyecto.

Para ello se emplearán los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera en Ingeniería en Energías Renovables, integrando conocimientos de electrónica y de energética con el fin de obtener el título de grado como Licenciada en Ingeniería en Energías Renovables.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Bioenergía

Se conoce como bioenergía a la energía que es derivada de los biocombustibles, los cuales son producidos directa o indirectamente de la biomasa. La biomasa es el material derivado de las transformaciones o del aprovechamiento de la producción primaria neta de los organismos fotosintéticos, por ejemplo, la leña, el estiércol, la producción agrícola o el carbón vegetal, y excluyendo el material integrado de formaciones biológicas de génesis antigua transformado en combustibles fósiles.

A finales del siglo XVIII el físico italiano Alessandro Volta identificó por primera vez el metano (CH_4) como el gas inflamable en las burbujas que emergían de los pantanos. No fue hasta la segunda guerra mundial que el metano alcanzó una especial importancia debido a la escasez de combustibles. Sin embargo, al terminar la guerra se olvidó casi por completo este tipo de combustible, hasta que en los años 60 en India se impulsó notablemente la producción de biogás. (FAO, 2019)

En China en la década de los 70, mediante programas de ámbito nacional se fomentó la implementación de biodigestores. En los países industrializados fue diferente, ya que en los años 80 esta tecnología perdió interés por los precios bajos del petróleo. Sin embargo, en la actualidad se ha despertado un interés por el biogás como fuente de combustible tanto a nivel industrial como doméstico pues su producción impulsa el desarrollo sostenido y ha proporcionado una fuente de energía renovable alternativa al carbón y petróleo.

El biogás es un tipo de bioenergía producto final del proceso la digestión anaerobia. Es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas, su composición depende de la biomasa con la que se cargue el biodigestor y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable (Moreno, 2001). En la tabla 1 se presentan las características generales importantes del biogás.

Tabla 1.1 Características generales del biogás.

| | |
|----------------------------|---|
| Composición | 55 – 70 % metano (CH_4) 30 – 45% dióxido de carbono (CO_2) 15 – 20% Trazas de otros gases |
| Contenido energético | 6.0 – 6.5 kW h m ⁻³ |
| Equivalente de combustible | 0.60 – 0.65 L petróleo/ m ³ biogás |
| Límite de explosión | 6 – 12 % de biogás en el aire |
| Temperatura de ignición | 650 – 750°C |
| Presión crítica | 74 – 88 atm |
| Temperatura crítica | -82.5°C |
| Densidad normal | 1.2kg m ⁻³ |
| Olor | Huevo podrido.(el olor del biogás desulfurado es imperceptible) |

Fuente: (Deublein & Steinhauser, 2008)

1.1.1 Biodigestores

Un biodigestor se puede definir, a grandes rasgos, como un contenedor cerrado herméticamente el cual permite la carga de residuos orgánicos formando un lodo, donde se

desarrollan bacterias que convierten la materia orgánica en biogás y fertilizante de manera natural mediante la digestión anaerobia.

Existen muchos tipos de biodigestores, pues es una tecnología que ha ido evolucionando constantemente en la manera de construir biodigestores y en la manera de operarlos. En sus inicios era un simple contenedor en donde se depositaba el excremento y demás residuos orgánicos, con el paso de los años se observó que la producción del biogás se podía optimizar, eligiendo el modelo del biodigestor adecuado dependiendo de la zona geográfica, necesidades y cantidad de biomasa desechada.

A continuación, se mencionan los biodigestores comunes en el medio rural describiendo sus principales características.

Plantas de globo. Este tipo de plantas constan de un biodigestor de bolsa en la parte superior en el cual se almacena el gas, la entrada y salida se encuentran en la superficie de la bolsa como se muestra en la Figura 1.2. El diseño ha logrado disminuir los costos hasta 30% (Pérez J. M., 2010), lo cual es su principal ventaja, así como su poca sofisticación de construcción, altas temperaturas de digestión, fácil transportación, limpieza, mantenimiento y vaciado. (Corona, 2007)

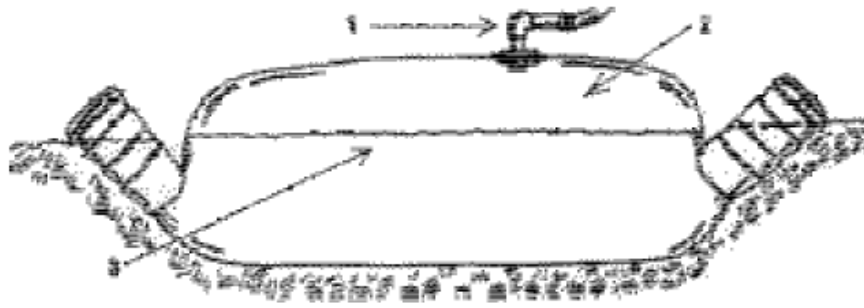


Figura 1.1 Biodigestor globo.

Se muestran las partes que conforman las plantas de globo. El número 1 corresponde a la válvula de salida, el número 2 al almacenamiento de biogás y el 3 al nivel de agua con materia orgánica. La imagen fue obtenida del artículo “Biodigestores” por Iván Corona, 2007.

Sus desventajas son su corto tiempo de vida por su alta susceptibilidad a ser dañado, baja generación de empleo y poca generación de biogás si presenta algún daño estructural.

Plantas de domo fijo. Los biodigestores de domo fijo, Figura 1.2, consisten en una cámara de gas fija e inmóvil, la cual se coloca en la parte superior del biodigestor. La mezcla se desplaza hacia el tanque de compensación al aumentar la presión del gas. Este tipo de plantas son las más utilizadas en China.

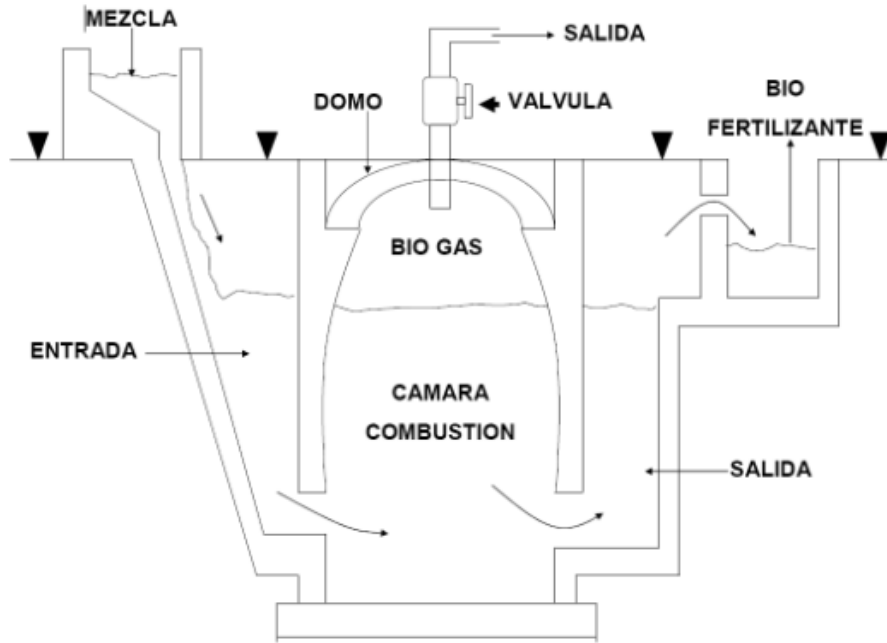


Figura 1.2 Biodigestor de domo fijo.

Se muestran las partes que conforman los biodigestores de domo fijo, incluyendo las entradas y salidas del biodigestor. La imagen fue obtenida del artículo “Biodigestores” por Iván Corona, 2007.

Dentro de sus ventajas se encuentran los bajos costos de construcción, larga vida útil, el ahorro de espacios y la protección contra los cambios de temperatura (éstos últimos por la construcción subterránea).

Las desventajas son los problemas recurrentes con la permeabilidad para gas del recipiente superior, pues una pequeña fractura implica altas pérdidas de gas.

Reactor anaeróbico tipo batch de flujo estacionario. Los biodigestores se cargan con las materias primas en una sola carga, también conocido como lote. Después de un cierto período de fermentación, al cual se le conoce como tiempo de retención hidráulica, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un

bajo nivel, se vacían los biodigestores por completo y se alimentan de nuevo iniciando un nuevo proceso de fermentación.

Biodigestores de flujo continuo. Este tipo consiste en una batería de tanques o depósitos herméticos (digestores) con una salida de gas que conecta a todos los tanques con un medidor de flujo de gas flotante, donde se almacena el biogás.

Se dispone más de un digester con la finalidad de tener siempre uno de ellos en proceso de carga o descarga, mientras el resto están en la etapa de producción de gas.

La carga del biodigestor con la materia prima, sólida o seca se realiza por lotes (discontinuamente) y la descarga de los residuos estabilizados se efectúa una vez que ha finalizado la producción de biogás.

Biodigestor de flujo discontinuo. El sistema de carga discontinuo es aplicable en situaciones particulares, por ejemplo, cuando se presentan problemas de manejo de las materias primas, si la materia es de digestión metanogénica difícil o si la disposición de la materia se encuentra de forma intermitente, como es el caso de los rastrojos de cosecha.

Por ello está destinado a pequeñas y grandes explotaciones agropecuarias, mientras que su uso a escala doméstica es poco práctico.

Ventajas del digester discontinuo (Corona, 2007):

- Ocupa menor volumen de digester por volumen de biogás producido, debido a la alta concentración de materia seca en el sustrato (40 – 60%).
- Ocupa de 60 – 80% menos de agua que los digestores continuos y semi continuos.
- No forma costra ni necesita agitación diaria.
- No sufre cambios de temperaturas violentos.

- Ocupa menos mano de obra, ya que no necesita carga diaria, sino cada 2 o 3 meses para carga y descarga.
- Durante el resto del tiempo, basta amontonar el material a usar.
- La mayor parte del bioabono se obtiene en forma sólida, siendo más fácil de esparcir en la preparación de suelos.
- La corrosión de las tapas de los digestores es menor, debido a que éstas están insertas en un sello de agua.
- No requiere de cuidados especiales que pueda causar accidentes en la fermentación anaeróbica.
- Se puede construir sobre el suelo o semi enterrado. Es ideal para localidades de nivel freático superficial o terreno en rocas

En la Tabla 1.2 se hace la comparación entre los diferentes tipos tecnologías de digestión anaeróbica, en la cual se puede notar que la elección de dicha tecnología va relacionada tanto con el productor que la necesite, así como las condiciones de la instalación pecuaria. En la mayoría de los casos el costo puede ser un factor determinante para la elección de la tecnología, por lo que la más común entre los pequeños y medianos productores son el tipo laguna cubierta.

Tabla 1.2 Comparación entre tecnologías anaeróbicas.

| Características | Laguna cubierta | Completamente mezclado | Flujo pistón | Membrana fija |
|------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|
|------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|

| Contenedor de digestión | Laguna profunda | Tanque redondeado/cuadrado sobre terreno | Tanque rectangular en el terreno | Tanque sobre el terreno |
|--------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| Nivel de tecnología | Bajo | Medio | Bajo | Medio |
| Calor adicional | No | Sí | Sí | No |
| Sólidos totales | 0.5-3% | 3-10% | 11-13% | 3% |
| Característica de los sólidos | Fina | Gruesa | Gruesa | Muy fina |
| Tiempo de retención hidráulica | 40-60 | +15 | +15 | 30 |
| Localización óptima | Clima templado y cálido | Todos los climas | Todos los climas | Clima templado y cálido |

Fuente: (Rivas, y otros, 2012)

1.1.2 Bioenergía en México

México es un país con alto potencial el desarrollo de la bioenergía. En el 2008 se promulgó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos para fomentar la producción de éstos y extenderla más allá de los biocombustibles tradicionales como lo es el carbón vegetal. Desde entonces el marco regulatorio para las energías renovables se ha ido modificando, creando la Ley General del cambio climático (2012), Ley de Industria Eléctrica (2014) y la Ley de Transición Energética (2015).

A pesar de que los apoyos para la bioenergía han existido desde el principio de la promulgación de dichas leyes, no se ha tenido una explotación suficiente, quedando como una fuente de energía rezagada ocupando los últimos lugares en las estadísticas de

generación de energías limpias. En México se produce actualmente 114Mm³/a de biogás con una generación eléctrica de 109GWh_e/a, lo que representa una minúscula fracción de la meta de energía limpia para el 2024 de unos 112,000GWh_e/a (SENER, 2016).

El sector pecuario es en donde más se ha explotado la biomasa, según SAGARPA y FIRCO de 2005 a 2010 se instalaron cerca de 720 biodigestores tipo laguna o bolsa para digerir el estiércol de granjas porcinas y lecheras, la mayoría en 11 estados de México. Al terminar la entrega de bonos de carbono en el 2012, la construcción de biodigestores bajó de manera considerable hasta llegar a la actualidad, donde la mayoría de los biodigestores y motogeneradores en granjas están fuera de servicio.

Según la Red Mexicana de Bioenergía en su documento Situación actual y escenarios para el desarrollo de biogás en México hacia 2024 y 2030, habrá un incremento de inversión en los próximos años para la construcción de biodigestores tipo laguna mejorada, las cuales cuentan con mezclado de líquidos y sólidos por bombeo, separación de sólidos grandes en la entrada y sistema de instrumentación del biodigestor. Esta laguna puede producir biogás a bajo costo, pero con relativamente alta productividad.

El potencial total de producción de biogás por sector se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 2.3. Potenciales para generación de electricidad en el sector pecuario.

| AÑO | 2024 | | | | 2030 | | | Total | |
|--|--------|---------|--------------|--------------|-------|---------|--------------|-------|--------------|
| | Ganado | Porcino | Bovino leche | Bovino carne | Total | Porcino | Bovino leche | | Bovino carne |
| Fracción del potencial nacional | | 5.3% | 2.3% | 0.8% | 13.5% | 13.5% | 7.2% | 2.4% | 23.1% |
| Producción del biogas (Mm ³ /a) | | 30 | 32 | 39 | 101 | 82 | 109 | 187 | 378 |

| | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Generación eléctrica (GWh_e/a) | 56 | 55 | 67 | 179 | 155 | 189 | 323 | 667 |
| Costo de generación (\$MX/ kWh_e) | 1.21 | 1.25 | 1.25 | 1.23 | 1.21 | 1.25 | 1.25 | 1.23 |
| Emisiones GEI evitadas (tCO_2_e/a) | 31,035 | 30,262 | 37,015 | 98,313 | 85,152 | 103,853 | 177,858 | 366,863 |
| Costo fiscal (mdp/a) | 16.4 | 16.7 | 20.4 | 53.5 | 45.1 | 57.6 | 98.1 | 200.8 |
| Ahorro en electricidad (mdp/a) | 22.1 | 19.3 | 23.6 | 65.1 | 60.7 | 66.3 | 113.5 | 240.5 |
| Empleos creados | 269 | 286 | 233 | 788 | 983 | 1,308 | 1,344 | 3,635 |
| Fuente: Prospectiva de energías renovables (Gutiérrez, 2018) | | | | | | | | |

1.1.3 Digestión Anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el cual se convierten los desechos del ganado en biogás en un medio libre de oxígeno. El proceso de digestión anaeróbica puede ser replicado y optimizado en un proceso de ingeniería usando estiércol o biomasa como materia prima. El biogás producido por la digestión anaeróbica típicamente está compuesto por metano (55 a 65 %), dióxido de carbono (35 a 45 %) y trazas de amonio y sulfuro de hidrógeno (Rivas Lucero, y otros, 2012).

Actualmente existen varias plantas de digestión anaerobia cuyo fin es la producción de biogás, el cual tiene propiedades de combustible, con un poder calorífico entre 18.8 a 23.4 MJ/m (5000 a 6000 kcal/m³) (FAO, 2019) y puede ser utilizado como fuente de energía eléctrica o fuente térmica. Sin embargo, con un contenido de metano menor al 50%, el biogás deja de ser inflamable, ya que es más ligero que el aire y su temperatura de combustión oscila entre 650°C y 750°C (Delgado, 1997). Además del biogás, en la digestión anaerobia se obtiene biofertilizante de buena calidad para la tierra.

Los digestores más populares son los del tipo hindú o chino para producción a pequeña y mediana escala, los cuales presentan desventajas como: largos tiempos de retención hidráulica y la baja eficiencia de conversión del sustrato en metano, lo que se traduce en una baja velocidad de producción volumétrica de biogás y pone en riesgo la calidad de éste por el bajo porcentaje de metano.

Según los modelos tradicionales, la digestión anaerobia está dividida en cuatro etapas:

Etapas hidrolítica – las enzimas extracelulares la llevan a cabo, excretadas por bacterias fermentativas. Esta etapa es clave, ya que puede ser la limitante de la velocidad del proceso global, cuando se trata de materia orgánica con alto contenido de sólidos (Pavlostathis & Giraldo-Gómez, 1991)

Etapas fermentativa o acidogénica – consiste en la fermentación de productos solubles de la hidrólisis, donde obtiene ácido láctico, etanol, ácido propiónico y ácido butírico, entre otros (Stams, S.Oude-Elferink, & Westermann, 2003), cuyas concentraciones varían en función del consumo de H₂. Cuando el H₂ es eliminado de forma eficiente, las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos como el etanol

que favorece la producción de H_2 y ATP (trifosfato de adenosina). La actividad de algunas bacterias fermentativas y acetogénicas se favorece a valores bajos de presión parcial de H_2 (Pavlostathis & Giraldo-Gómez, 1991). En esta fase se disminuye el efecto tóxico del gas.

Etapa acetogénica – en esta etapa ocurre la transformación de ácidos y aminoácidos en compuestos que puedan metabolizar las arqueas metanógenas. Este proceso involucra reacciones energéticamente desfavorables, donde las bacterias acetogénicas necesitan ser estimuladas por las metanógenas u otros consumidores de H_2 y la ΔG de la reacción depende de la presión parcial de H_2 (Delgado, 1997).

Etapa metanogénica – es llevada a cabo por arqueas metanógenas que forman el CH_4 , de ahí el nombre: biometanización. Este tipo de bacterias son anaerobias obligadas y utilizan sustratos con uno o dos átomos de carbono unidos por enlace covalente. En esta etapa, las bacterias consumen H_2 , ácido fórmico, metilos del acetato, metanol y algunas aminas. En teoría, solo el 33% del CH_4 se produce a partir de reducir CO_2 , utilizando el H_2 generado durante la degradación de los sustratos iniciales al nivel del acetato, por lo que es un intermediario clave en todo el proceso (Delgado, 1997).

1.1.4 Factores determinantes en la etapa metanogénica

La examinación de los factores de esta etapa es importante por la susceptibilidad de los microorganismos metanogénicos en las condiciones ambientales. La etapa metanogénica es clave en la producción de biogás, la evaluación del desempeño de un sistema anaerobio está en función de la tasa de producción de metano. Es por ello que la biotecnología anaeróbica necesita de un monitoreo cuidadoso de las condiciones

ambientales, algunas de estas condiciones son: temperatura, pH, tipo de materia prima con la que se trabaja, tiempo de retención hidráulica y composición bioquímica de la biomasa.

1.1.4.1 Composición bioquímica de la biomasa

En la fermentación metanogénica se pueden utilizar diversas materias primas, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal animal, agroindustria, doméstico, etcétera. Entre los residuos de origen animal se encuentran el estiércol, orina, guano, camas, residuo de mataderos y residuos de pescados.

Es importante que las características bioquímicas que presentan los residuos, ya mencionados, permitan el desarrollo y la actividad de las bacterias involucradas en el sistema anaeróbico. Además de requerir fuentes de carbono y nitrógeno, en el proceso microbiológico deben estar en equilibrio sales minerales como lo son el azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, entre otros.

No todas las sustancias orgánicas como los estiércoles presentan los elementos necesarios en proporciones adecuadas. Tal es el caso de los desechos industriales, en el cual se debe añadir los compuestos faltantes para llevar a cabo la digestión; en cuanto a las sustancias con alto contenido de lignina, estas se deben someterse a tratamientos previos, por ejemplo, compostaje o macerado. Para los estiércoles de animales, la degradación dependerá del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos para definir si son directamente aprovechables o deben pasar por un post tratamiento anaeróbico.

Debido al gran número de factores que pueden intervenir en el proceso la comparación de resultados tanto de producción como de rendimiento en gas, entre diferentes tipos de materia prima, se vuelve complicada.

En términos generales, se pueden clasificar los sustratos en cuatro clases en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, tal como se muestra en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Clasificación de sustratos para la digestión anaeróbica.

| Características | Clase* | Tipo de sustrato | Características cuantitativas |
|--|--------|---|--|
| Sólido | 1 | Basura doméstica Estiércol sólido Restos de cosecha | >20% ST** 40 – 70 % fracción orgánica |
| Lodo altamente contaminado, alta viscosidad | 2 | Heces animales | 100 – 150 g/l DQO** 5 – 10 % ST 4 – 8 SV** |
| Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS) | 3 | Heces animales de cría y levante diluido con agua de lavado Aguas residuales de matadero | 3 – 17 g/l DQO 1 – 2 g/l SS |
| Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión | 4 | Aguas residuales de agroindustrias Aguas negras | 5 – 18 g/l DQO 4 – 500 g/l DQO |

Fuente: (FAO, 2019)

**Los sustratos de clase 1 pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch o por lotes.*

Los sustratos de la clase 2 son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua.

Por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor, los sustratos de clase 3 deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio.

En cuanto a los sustratos de clase 4, debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia.

***ST=Sólidos totales; SV= Sólidos volátiles; DQO= Demanda química de oxígeno.*

1.1.4.2 Temperatura.

La digestión anaerobia tiene lugar en un amplio intervalo de temperaturas, los más utilizados son psicrófilos (<20°C), mesófilos (20 – 45°C) y termófilo (45 –65°C). A altas temperaturas las velocidades de las reacciones bioquímicas y las velocidades específicas de crecimiento máxima aumentan, dentro de cada intervalo de temperatura, por ejemplo: entre 35 y 37°C para la digestión anaerobia mesofílica. Dicho rango de temperatura es el más utilizado, pues en él se encuentra la producción óptima de biogás (Delgado, 1997).

1.1.4.3 pH.

El pH en la mezcla utilizada en el biorreactor depende del tipo de bacteria elegida para el metano, el cual puede ser de 5.2 a 7.5. Este parámetro se relaciona con la actividad realizada por las bacterias, dichos microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo. El pH afecta, principalmente, a la actividad enzimática de los microorganismos

1.1.4.4 Velocidad de carga orgánica (VCO).

La VCO es la relación entre la cantidad de materia orgánica alimentada, expresada en unidades de DQO o sólidos volátiles, por unidad de volumen efectivo de reactor y tiempo. Este parámetro indica si la producción de CH₄ es alta o si hay acumulación de ácidos grasos volátiles. (Delgado, 1997).

1.1.4.5 Ácidos grasos volátiles (AGVs).

Los AGVs son los intermediarios más importantes de la digestión anaerobia y muestran una rápida respuesta a las variaciones en el sistema, dado por sobrecargas orgánicas o por la introducción de tóxicos (Delgado, 1997).

Una de las características más importantes de la biodigestión es que disminuye el potencial contaminante de los excrementos de origen animal, disminuyendo la Demanda Química de Oxígeno hasta un 90% (Delgado, 1997). Al controlar el pH, presión y temperatura se asegura un óptimo rendimiento en el proceso, por lo que cada vez hay más propuestas de diferentes diseños con sistemas de monitoreo y control de diversos parámetros, dependiendo de las necesidades que se busquen satisfacer.

1.2 Instrumentación de Biodigestores

La instrumentación electrónica clásica se encarga del diseño y manejo de los instrumentos electrónicos y eléctricos, sobre todo para la aplicación en mediciones. Sus funciones básicas son: adquisición, análisis y presentación de datos.

En los últimos años, el uso de la PC generó una revolución en la instrumentación, medición y automatización. Así es como llega la instrumentación virtual, la cual registra la medición de señales como temperatura, pH, presión, entre otras. También involucra procesamiento, análisis, almacenamiento y distribución de los datos e información relacionada con la medición de una o varias señales específicas (Mandado, Mariño, & Lago, 1995). He aquí el significado de interfaz hombre-máquina.

1.2.1 Sistemas de control automático

A diferencia del control manual, el control automático se opera sin necesidad del ser humano. Se conoce como sistema de control al conjunto de elementos conectados de tal forma que permite controlar una o varias variables de un proceso denominado planta o sistema. Para mostrar las funciones de cada componente en la ingeniería de control, se

utiliza una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales, dicha representación se conoce como diagrama a bloques.

Dentro del control automático existen diferentes tipos de sistema: control de lazo abierto y control de lazo cerrado.

El control de lazo cerrado es aquel que tiene retroalimentación, la cual vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema (Ogata, 2010). En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de los elementos de un diagrama a bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

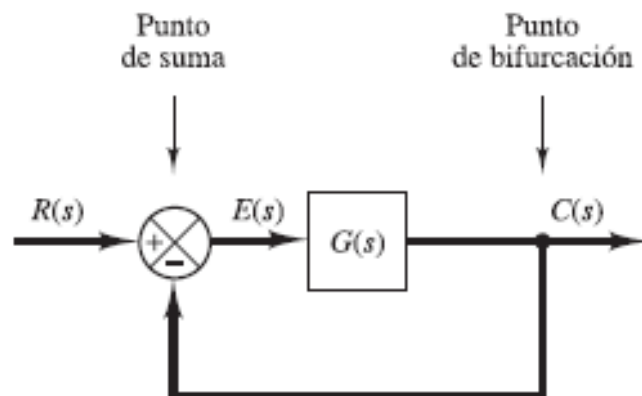


Figura 1.3 Diagrama a bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

Se comienza con una señal de referencia la cual se conoce como $R(s)$, posteriormente se tiene el comparador punto de suma, del cual se obtiene la señal de error $E(s)$ que se necesita para el control de la planta. Del siguiente punto sale la señal controlada $C(s)$ la cual retroalimenta al comparador.

1.2.2 Control de potencia: *on/off*

En este tipo de sistemas se somete al actuador a dos estados de funcionamiento. Estos sistemas de control son los más sencillos y económicos de implementar, por el bajo costo de los elementos; sin embargo, tiene como desventaja que produce muchas oscilaciones, por lo que no es recomendable utilizarlo en procesos robustos. Para evitar las oscilaciones que presenta el controlador *on/off* cuando el error es cero, se le añade una histéresis o zona muerta. La histéresis sirve para estabilizar el sistema. Estos controles funcionan bien si la dinámica del proceso varía lentamente y si su tiempo de retraso es mínimo.

1.2.3 Sistemas térmicos

Los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia de calor de una sustancia a otra. Estos sistemas se analizan en términos de resistencia y capacitancia, ya que ambos son elementos que se encuentran distribuidos en todas las sustancias. Para poder analizarlos se deben tomar en cuenta las diferentes formas por las que fluye el calor: conducción, por convección y por radiación (Ogata, 2010).

1.2.4 Control de biodigestores

La generación de energía renovable suficiente para abastecer el consumo de las ciudades representa un gran reto, pues se ponen varias cartas sobre la mesa a la hora de discutir la inversión inicial, los costos de producción y la sustentabilidad de las plantas generadoras. En el caso de la bioenergía se tienen muchas dudas sobre la viabilidad que puede llegar a tener instalar plantas de biogás y sobre cómo manejarlas.

El control de biodigestores es fundamental en la operación de una planta de biogás, pues al tener un buen control e instrumentación se garantiza que la producción será

eficiente y viable en todos los sentidos. Tomando como ejemplo a Francia, en donde en el año 2018 se cerró con la instalación de 588 plantas de biogás en funcionamiento y durante el año 2019 se inauguró una planta de biometano cada 3 semanas, según el reporte de la European Biogas Association (EBA). En cuanto a Alemania se tienen 10,971 plantas instaladas, siendo el mayor productor de biogás en Europa y líder en tecnología de biogás. A nivel mundial, China es el principal productor de biogás, con una capacidad instalada de 380,000 MW.

En cuanto a México se tienen instalados 66 MW que representan 0.4% del total mundial. Es una tecnología que aún no termina por consolidarse, sin embargo, tiene un alto potencial.

El control que más se emplea para los biodigestores a nivel industrial es el control de lazo cerrado proporcional integral derivativo. Mientras que a pequeña escala se ha demostrado que basta con un control *on/off* para obtener buenos resultados si se aplica en pequeños biodigestores estacionarios.

CAPÍTULO II. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL BIORREACTOR

ESTACIONARIO

El proyecto en total se dividió en cuatro etapas:

- Elaboración del biodigestor.
- Instrumentación.
- Carga del biodigestor.
- Control de temperatura.

En cada etapa se realizó una evaluación del proceso y de los resultados que se fueron obteniendo para detectar las fallas oportunamente. En las próximas secciones se describen los pasos que se siguieron en cada etapa.

2.1 Elaboración del biodigestor

El tipo de biodigestor que se eligió para realizar este trabajo fue el tipo laguna (a escala experimental), modificando el diseño original de biodigestor para cumplir con los requerimientos que se buscan para poder operarlo de manera sencilla.

La elaboración del biodigestor se dividió en tres subetapas: 1) diseño del biodigestor, 2) cálculo térmico del sistema de calentamiento y 3) instalación del equipo. En cada etapa se realizaba una revisión para corroborar que se cumplían con las especificaciones necesarias para llegar a la implementación del biodigestor.

2.1.1 Descripción del diseño del reactor

El biodigestor experimental consta de un reactor con forma de pirámide truncada, invertida, que emula un biodigestor de tipo laguna. La capacidad total de operación del reactor es de 100 L. Este cuenta con un sistema de agitación para mezclar el sustrato de manera homogénea, el cual no será utilizado en la primera fase del experimento. El reactor se apoya en una base metálica que permite trabajar de manera más cómoda y facilitar la instalación de los sensores y aditamentos necesarios para la instrumentación.

Cabe recalcar que en todo momento se pensó en que el reactor resultante sea fácil de modificar, esto con el fin de realizar diferentes pruebas, experimentos y corridas cambiando los aditamentos de instrumentación de manera sencilla cuando sea necesario.

2.1.2 Diseño en SolidWorks

La primera etapa de la elaboración del biodigestor fue hacer el diseño del reactor, el cual se trazó en el software Solid Works. Para ello, primero se dibujó el reactor, pensando que la capacidad máxima de mezcla sea de cien litros. Posteriormente se dibujó la mesa en donde va montado el reactor.

Como se puede observar en la Figura 2.1, sobre la parte superior del reactor se acopló un marco metálico, que recibe el nombre de bastidor de instrumentación, que cuenta con entradas (orificios) para instalar sensores e instrumentación, debidamente sellados y aislados, y unas ventanillas que regularmente estarán tapadas para evitar la entrada de luz al interior del sistema, estas se colocaron con el objetivo de poder observar pruebas de agitación y poder asegurar que los sensores no se muevan de su posición original. El volumen del bastidor de instrumentación servirá como contenedor de biogás y estará cubierto por geomembrana.

La vista isométrica del ensamble final en Solid Works se muestra en la Figura 2.1 y la vista superior en la Figura 2.2.

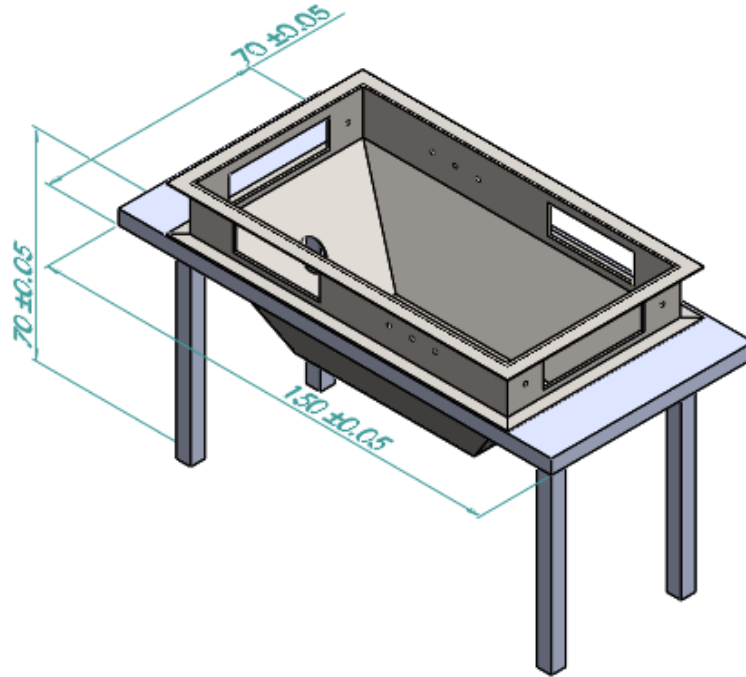


Figura 2.1 Ensamble final, vista isométrica.

Se pueden notar las dos piezas principales del biodigestor realizado en Solid Works que son el reactor, con el bastidor de instrumentación y las ventanillas en los costados, montado sobre la base.

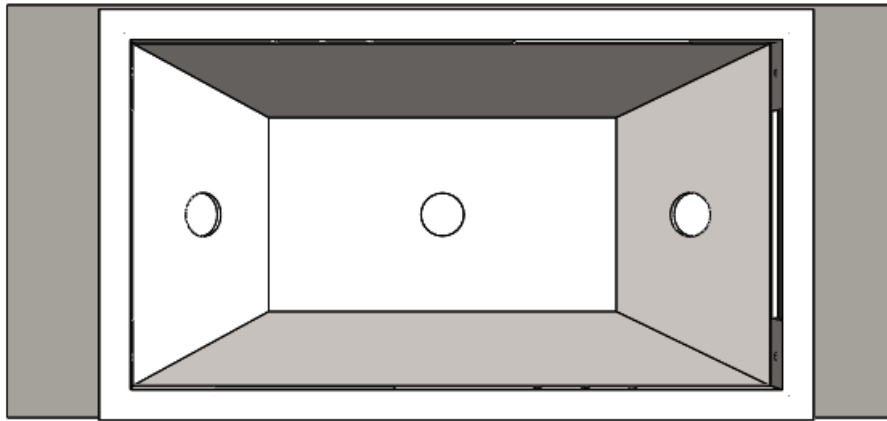


Figura 2.2 Ensamble final, vista superior.

En esta vista se pueden notar los orificios de entrada, salida y depuración de la mezcla.

Como se puede notar en las figuras presentadas anteriormente, los orificios para los sensores no se encuentran todos de un mismo lado y guardan cierta distancia; esto se hizo para evitar la interferencia entre ellos y no tener problemas al recibir los datos adquiridos por los sensores. Las ventanillas permanecen cerradas con la misma geomembrana que se utiliza en el biodigestor, esto con la finalidad de evitar la entrada de la luz solar al interior del reactor ya que es contraproducente para las bacterias anaerobias.

2.1.3 Cálculo térmico y selección del sistema de calentamiento.

La segunda etapa del proyecto consta en el cálculo térmico para obtener la potencia y longitud de las resistencias a instalar como sistema de calentamiento de la mezcla dentro del biodigestor.

A continuación, se muestran los cálculos realizados para tomar una decisión sobre qué tipo de resistencias conviene adquirir.

2.1.3.1 Potencia eléctrica

El primer paso es obtener la potencia eléctrica necesaria para calentar el sustrato que se depositará en el biodigestor. Para ello se toman dos referencias de temperatura, la mínima y máxima del lugar en donde será instalado.

Para obtener el calor necesario para calentar de 5°C, 100 kg de sustrato, a 35°C es necesario aplicar la ecuación de transferencia de calor (1), en la que Q es el flujo de calor dentro del biodigestor, m corresponde a la masa (kg), ΔT es la variación de temperatura y c es una constante de proporcionalidad característica de la sustancia (cal/g°C) (Cengel & Ghajar, 2011). En termodinámica, esta constante de proporcionalidad c recibe el nombre de capacidad térmica específica (también conocida como capacidad calorífica específica o calor específico).

$$Q = m_{lodo}c_{lodo}\Delta T \quad (1)$$

Sustituyendo valores, obtenemos que:

$$Q_{lodo} = 12.552 \times 10^6 J$$

Para calcular el flujo de calor perdido, $Q_{perdida}$, se emplea la ecuación (2), en donde el flujo de calor perdido por conducción es q_{cond} , A representa el área, e la emisividad y k el coeficiente de conductividad térmica.

$$q_{cond} = A \frac{\Delta T}{e/k} \quad (2)$$

En este caso tenemos dos tipos de materiales diferentes que son el acero y la geomembrana, tabla 2.1, por lo que la ecuación (2) tiene dos casos de pérdida de calor por conducción.

Tabla 2.1 Propiedades térmicas de los materiales utilizados en el biodigestor (Cengel & Ghajar, 2011).

| Material | Espesor | Coefficiente de conductividad térmica (k) | Emisividad (e) | Coefficiente de transferencia de calor h |
|-----------------|---------|---|----------------|--|
| Lámina de acero | 0.0635m | 16.3 W/mK | 0.35 | 10W/m ² K |
| Geomembrana | 0.03m | 0.33 W/mK | 0.85 | 10W/m ² K |

Fuente:

Para calcular la pérdida por conducción del acero empleamos la ecuación (3):

$$q_{cond(acero)} = (A_T)_{acero} \frac{\Delta T}{\frac{e_{acero}}{k_{acero}}} \quad (3)$$

La ecuación (4) corresponde a la sustitución de variables para la pérdida por conducción del material de geomembrana.

$$q_{cond(geom)} = (A_T)_{geom} \frac{\Delta T}{\frac{e_{geom}}{k_{geom}}} \quad (4)$$

Una vez sustituidos los valores en las ecuaciones anteriores, podemos conocer el total de calor perdido por conducción:

$$Q_{cond} = 2394.703J + 8.3276J = 2,403.0305 J$$

El sustrato del reactor (fase líquida) se compone por la mezcla del lodo (estiércol), mezclado con agua en proporción de 1:3. Ahora, para calcular la potencia eléctrica de las resistencias que calientan la fase líquida de la temperatura de inicio (ambiente) a la temperatura ideal de operación del reactor, es necesario solucionar las siguientes operaciones, en donde Q_{ag} es la potencia necesaria para calentar el agua contenida en el biodigestor y Q_{exc} la potencia necesaria para el lodo.

Sabemos que 1kWh= 862kcal, entonces:

$$Q_{ag} = 75kg * 1kcal * 30^{\circ}C = 2250 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 2.6102kWh$$

$$Q_{exc} = 25kg * 0.11kcal * 30^{\circ}C = 82.5 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 0.0957kWh$$

Por lo tanto, para calentar la fase líquida del biodigestor con una masa de 100kg, se necesita hacer la suma de la potencia necesaria para calentar el agua y el excremento:

$$Q_T = 2.6102kWh + 0.0957kWh = 2.7059kWh$$

Pero si se considera que el lodo se encuentra a temperatura ambiente (20°C), entonces nos queda:

$$Q_{ag} = 75kg * 1kcal * 15^{\circ}C = 1500 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 1.305kWh$$

$$Q_{exc} = 25kg * 0.11kcal * 15^{\circ}C = 157.74 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 0.047kWh$$

$$Q_T = 1.74kWh + 0.183kWh = \mathbf{1.352 kWh}$$

Para revisar el desarrollo detallado de las ecuaciones empleadas para el cálculo de la potencia eléctrica del sistema térmico ver Apéndice A, así como los diagramas del biodigestor con el que se trabajó.

2.1.3.2 Elección de la resistencia

El segundo paso es la elección de la resistencia, sabiendo que se necesitan 1.352 kWh para mantener el calor necesario que llegue a la temperatura deseada.

Para esta tarea fue preciso revisar catálogos de resistencias térmicas y así encontrar la forma que mejor se adapte al biodigestor. Ya que el biodigestor cuenta con dos agitadores en el fondo, eligió una resistencia térmica de 1000 Watts, 120V y de 100cm con forma de “U” para que el sistema de transferencia de calor no chocara con el sistema de agitación, ni llegue a estar cerca de los sensores, pues afectaría la medición que estos arrojan.

CAPÍTULO III. INTALACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL REACTOR ESTACIONARIO

En este capítulo se muestra el procedimiento que se siguió para instalar el biodigestor y posteriormente, instrumentarlo hasta llegar al control de la temperatura. La instalación se llevó a cabo en la terraza del edificio FCE-5 de la Facultad de Ciencias de la Electrónica, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

3.1 Instalación del biodigestor

Al tratarse de un experimento que busca comprender la operación de los biodigestores reales, se optó por instalar el reactor en la terraza del edificio FCE – 5 en la Facultad de Ciencias de la Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, así se garantiza que todo el tiempo se esté trabajando bajo las condiciones ambientales del exterior. Al estar expuesto a la intemperie se corre el riesgo de fracturas en la geomembrana por granizo y lluvias, por lo que fue necesario el acondicionamiento del lugar, se construyó un techo para proteger todo el equipo, el cual también fue diseñado antes de proceder con su instalación. Dicho techo es el que se muestra en la Figura 3.1.

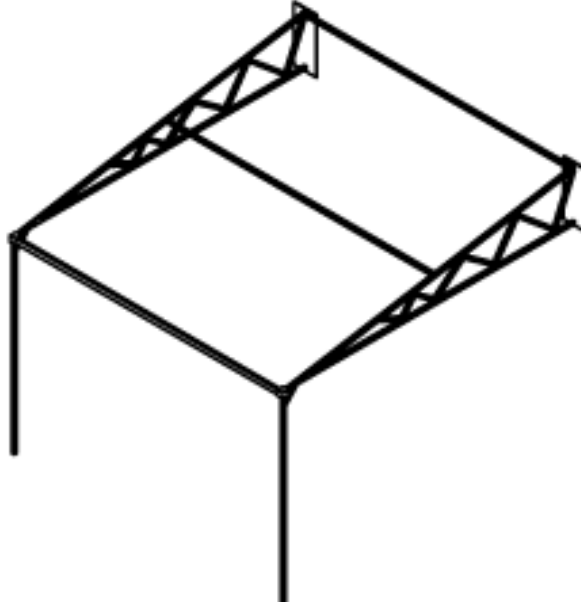


Figura 3.1 Estructura del techo para proteger el biodigestor.

La estructura es de acero para sostener la lámina que cubre el biodigestor y al equipo de instrumentación.

Una vez instalado el techo, se procedió a montar el biodigestor. La figura 3.2 muestra la vista frontal el biodigestor ya instalado en el sitio de trabajo; mientras que en la figura 3.3 se pueden ver las resistencias térmicas y las aspas de agitación. Estas últimas no fueron utilizadas durante las corridas, solo se activaron el primer día para homogenizar la mezcla de agua con excremento y el último día para poder hacer la evacuación del sustrato de manera más rápida.



Figura 3.2 Vista frontal del biodigestor instalado en el sitio.

Se pueden notar las ventanillas que se encuentran en el marco de instrumentación, en las cuales se pueden monitorear visualmente los cambios del sustrato con el paso de los días, sin embargo, estas estuvieron cerradas para evitar la entrada de luz al biodigestor y solo se utilizaron ocasionalmente. La imagen también muestra la entrada de sustrato en el costado derecho del marco, la válvula de escape de gas en la parte frontal y la válvula de escape de sustrato debajo del biodigestor.

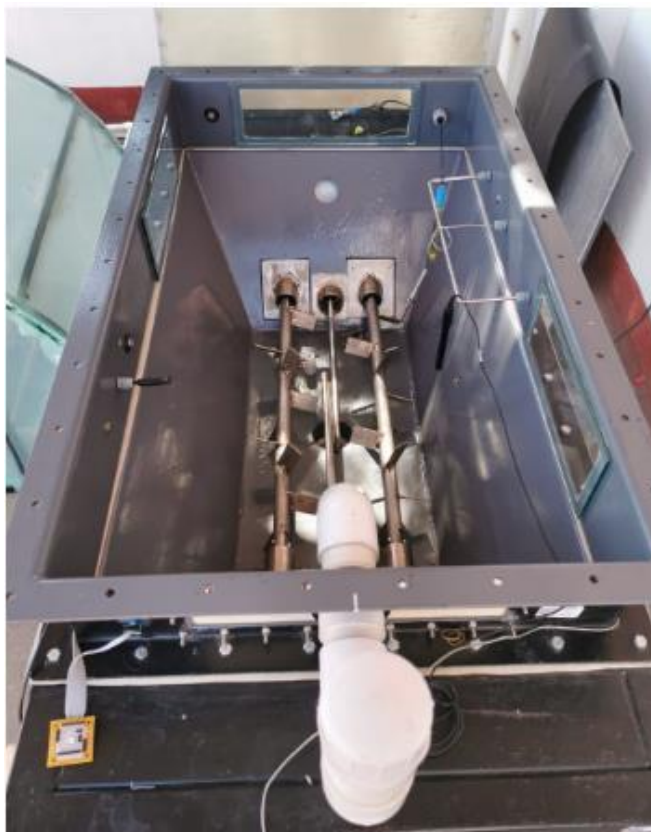


Figura 3.3 Vista superior del biodigestor instalado en el sitio de trabajo.

Se pueden observar las aspas de tornillo son fin a los costados casi en el fondo del reactor, en medio de ellas se encuentran las resistencias térmicas en forma de “U”, en las paredes de los costados se observan los sensores, así como el soporte que tienen las sondas de pH, oxígeno disuelto y temperatura.

3.2 Instrumentación del biodigestor

El objetivo de la instrumentación del biodigestor es monitorizar las variables críticas con el propósito de entender la dinámica del bioproceso y controlar la variable temperatura. En la tabla 3.1 se listan los sensores que se utilizaron, así como una breve descripción de su funcionamiento. Las variables críticas que se monitorearon dentro del

biodigestor son la temperatura (de la mezcla y del gas), presión, pH, humedad, metano, ácido sulfhídrico, oxígeno disuelto y dióxido de carbono.

Tabla 3.1 Descripción de sensores utilizados en el sistema de monitoreo

| SENSOR | DESCRIPCIÓN | COMUNICACIÓN | RANGOS DE VOLTAJE |
|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|
| MQ136 | Detección de ácido sulfhídrico | Serial | 5.0V±0.2V AC o DC |
| T9602 | Sensor de humedad y temperatura | I2C o PDM | 3.3 o 5V |
| MQ 2 | Sensor de metano | Serial | 0.2 ±5.0V AC o DC |
| MG811 | Sensor de dióxido de carbono | Serial | 0.1± 6.0 V AC o DC |
| Atlas pH kit | Sensor de pH | I2C | 0-5V |
| Transductor k240 | Sensor de presión | Serial | 0-5V |
| Gravity: SEN0237-A | Sensor de oxígeno disuelto | Serial | 3.3~5.5V |
| RTD PT 100 3 hilos | Sensor temperatura | | 0-5V |

3.2.1 Sensores MQ

Los sensores MQ están compuestos por un sensor electroquímico que varía su resistencia al estar en contacto con ciertas sustancias químicas. Son dispositivos con alta inercia, por lo que necesita un periodo largo de tiempo para estabilizarse tras un cambio de concentración de los gases medidos. Además, disponen de un calentador necesario para elevar la temperatura del sensor para que sus materiales adquieran la sensibilidad requerida.

Para la medición de PPM de gases que se generan dentro del biodigestor se implementaron sensores MQ, ya que estos están diseñados para detectar la presencia de

distintos componentes químicos en el aire. Cada uno de estos sensores funcionan con una placa de medición estándar con el comparador LMC662, la cual permite obtener la lectura tanto como un valor analógico, como de un valor digital cuando se supera un cierto umbral regulado a través de un potenciómetro ubicado en la placa.

Como se puede notar en tabla 3.2, los sensores MQ empleados para el monitoreo del biodigestor son el MQ 2, para la medición de metano y el MQ136 para el ácido sulfhídrico. Para poder utilizarlos fue necesario calibrarlos antes de obtener una medida precisa.

Para poder obtener la concentración de los gases, fue necesario aplicar la ecuación (5) en el código, tal como lo menciona la hoja de datos del sensor MQ 2 y MQ136¹.

$$\text{Concentración} = 10^{(A \cdot \log(\frac{Rs}{R}) + B)} \quad (5)$$

Para determinar la concentración se necesitó obtener la pendiente que se aproxima, ecuación (7) y (8) para ello se eligieron dos puntos de las gráficas, en la figura 3.4 se muestran las curvas para el MQ 2 y en la figura 3.5 las del MQ 136.

La ecuación (6) muestra la ecuación de la recta resultante.

$$Y = A \cdot x + B \quad (6)$$

Donde

$$A = \frac{\log(Y_1) - \log(Y_0)}{\log(X_1) - \log(X_0)} \quad (7)$$

$$B = Y_0 - A \cdot X_0 \quad (8)$$

¹ Revisar hoja de datos en los anexos I y II.

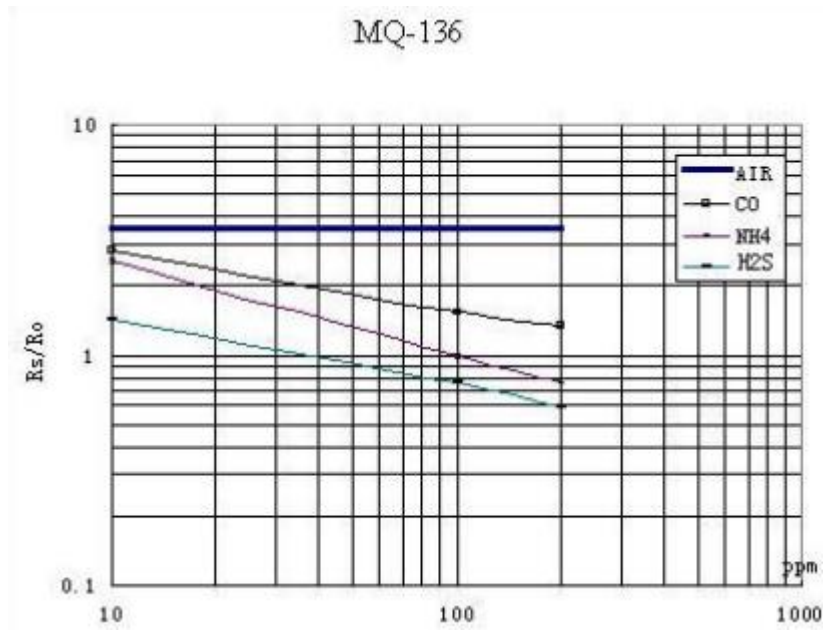


Figura 3.4 Características típicas de sensibilidad de MQ-136 para varios gases. Gráfica logarítmica.

Fuente: MQ Datasheet. Temp=20°C, Humedad=65%, Concentración de O₂= 21%, RL=20kΩ, Ro=resistencia del sensor a 10ppm de H₂S en aire limpio, Rs= resistencia del sensor en v. Fuente: Hoja de datos MQ-136.

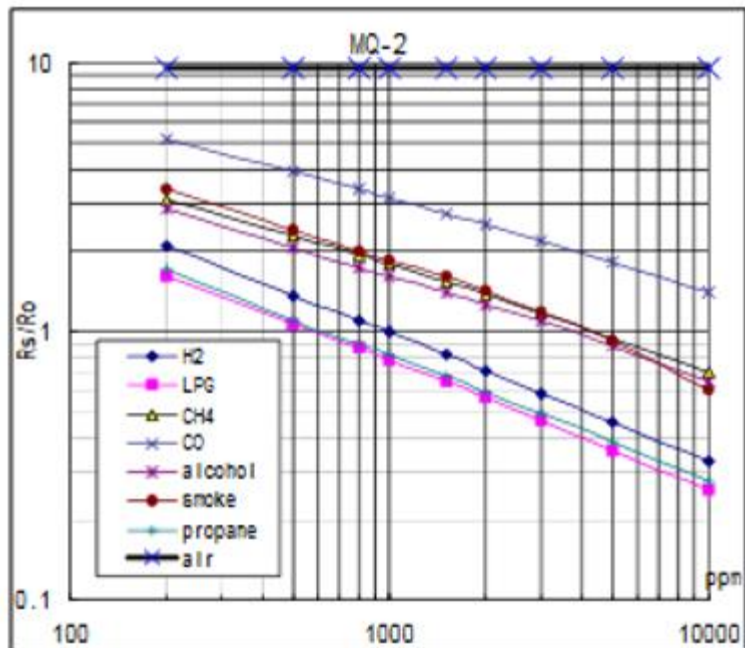


Figura 3.5 Curvas características de sensibilidad del sensor MQ2 para diferentes gases.

Gráfica logarítmica.

A temperatura= 20°C, Humedad= 65%, concentración de O₂= 21%, RL= 5kΩ, Ro= resistencia del sensor a 1000ppm de H₂ en el aire limpio, Rs= resistencia del sensor a varias concentraciones de gases. Fuente: Hoja de datos MQ2

La calibración se realizó con un código en Arduino, el cual se puede consultar en el Apéndice B.

Para más detalle del funcionamiento de estos sensores, consultar los anexos I y II.

3.2.2 Sensor MG 811

Este sensor se empleó para medir la concentración de CO₂ dentro del biodigestor. Al igual que los sensores MQ, se calentó previamente para que el voltaje se nivelara hasta

que estuvo listo para implementarse, la calibración también se llevó a cabo mediante un código de Arduino, el cual se puede consultar en el apéndice b. Para conocer más detalles del funcionamiento del sensor, consultar la hoja de datos en el anexo III.

En la Figura 3.6 se muestra el sensor MG811 instalado en el marco de instrumentación del biodigestor.



Figura 3.6 Sensor MG811.

Sensor instalado en el marco de instrumentación del biodigestor. El cable que se utilizó para comunicar a los sensores con el Arduino es el cable plano flexible.

3.2.3 Atlas pH kit

Para la medición del pH del sustrato se optó por utilizar el kit de sensor de pH Atlas Scientific, el cual consta de una sonda de pH de grado de laboratorio de plata/cloruro de plata de doble unión la cual va conectada a una placa de soporte EZO aislada eléctricamente para enviar la lectura de pH dentro del rango de 0.001 a 14.000.

La calibración de la sonda se hizo con tres soluciones de pH en el siguiente orden: punto medio (pH 7), punto bajo (pH 4) y punto alto (pH 10).

Los datos fueron procesados en el Arduino Mega, el código se puede consultar en el apéndice b ya que forma parte del código global del sistema.

3.2.4 Sensor T9602

En cuanto a la medición de temperatura y humedad del biogás se utilizó el sensor T9602, ya que es resistente al agua, el consumo de corriente es bajo y por su resistencia a ambientes similares al interior del biodigestor. Es un sensor fácil de aplicar, se encuentra calibrado y proporciona señales de salida linealizadas. A pesar de ello, se realizaron mediciones de prueba con temperaturas conocidas para corroborar que la medición fuera la correcta.

La hoja de datos del sensor se puede consultar en el anexo V.

3.2.5 Gravity: SEN0237-A

El oxígeno disuelto se midió con un kit sensor compatible con Arduino. El electrodo se introdujo en el biodigestor al nivel del sustrato. El electrodo es una sonda de medición de tipo galvánico y resiste temperaturas de hasta 40°C y presión hasta 50PSI.

3.2.6 RTD PT 100

El sensor RTD PT 100 es una termo resistencia de platino la cual incrementa el valor de la resistencia cuando incrementa la temperatura. Se optó por utilizar un RTD de 3 hilos por el rango de distancia en el cual trabaja, la extensión puede ser hasta de 40 metros sin tener un error negativo. Para poder implementar este sensor se programó la placa MAX3185, la cual se muestra en la Figura 3.7.

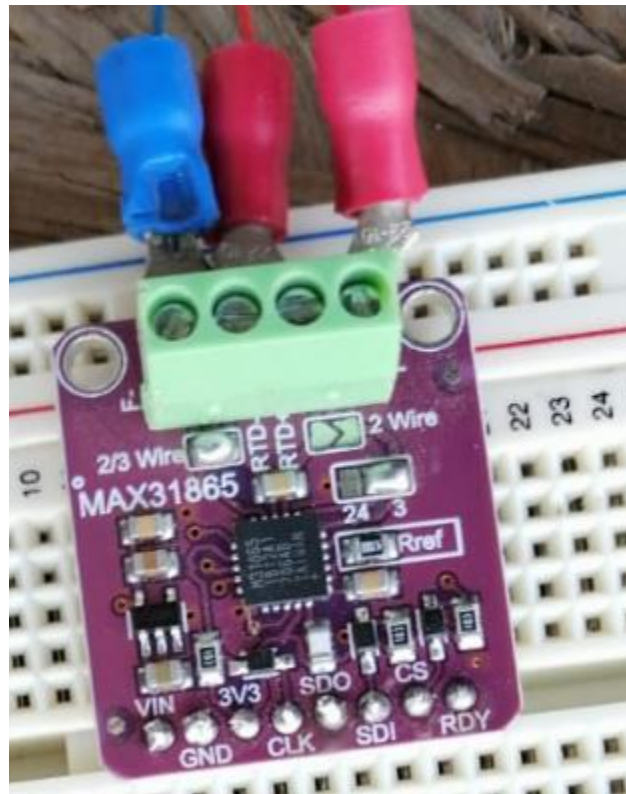


Figura 3.7 Placa MAX 31865.

Este circuito integrado facilitó la implementación del RTD, pues es un amplificador que ajusta y compensa automáticamente la resistencia. Tiene una excelente resolución de lectura y se conectar a cualquier microcontrolador con SPI.

Con este sensor se monitoreó la temperatura del sustrato, dicho dato se utilizó para el control del sistema térmico.

3.2.7 Programación de sensores

La programación de los sensores se realizó por etapas, se comenzó uno por uno a realizar pruebas de medición de los parámetros para verificar el funcionamiento correcto de cada uno de los sensores. Una vez probados, se procedió a montarlos sobre una protoboard, en donde se fueron agregando uno a uno, comenzando por los sensores de gases ya que estos tienen un código más complejo. En el caso del sensor de presión fue necesario utilizar un compresor de aire para realizar las pruebas con valores conocidos, para verificar que las mediciones del sensor eran las correctas.

Una vez que se tuvieron los programas individuales de los sensores se integraron los códigos en un solo programa de IDE Arduino, a dicho programa se le nombró código global.

En el Apéndice C se puede ver el código global de los sensores utilizados, los cuales envían los datos adquiridos a un Arduino Mega, en donde se procesan los datos para posteriormente visualizarlos en LabView. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 3.8.

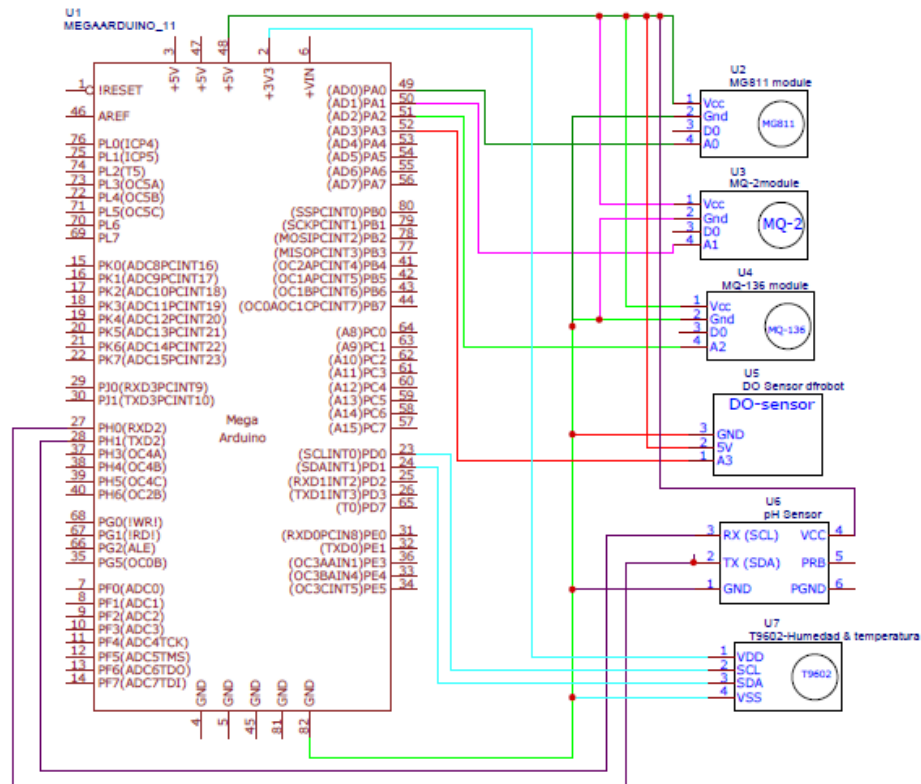


Figura 3.8. Diagrama de conexiones de sensores al Arduino MEGA.

Como se puede notar, son muchas conexiones, por lo que la alimentación y tierra se hizo común, alimentando a los sensores con una fuente externa de 5V y 3.3V. En figura 3.11 se muestra la placa que se elaboró para conectar los pines analógicos y digitales para evitar el cruce de cables en el área de trabajo.

Únicamente el PT100 se encuentra en un código diferente. Para poder manipular el sistema de control de temperatura sin perjudicar el funcionamiento de otros sensores, se optó por utilizar un Arduino UNO, tal como se muestra en el diagrama de la figura 3.9.

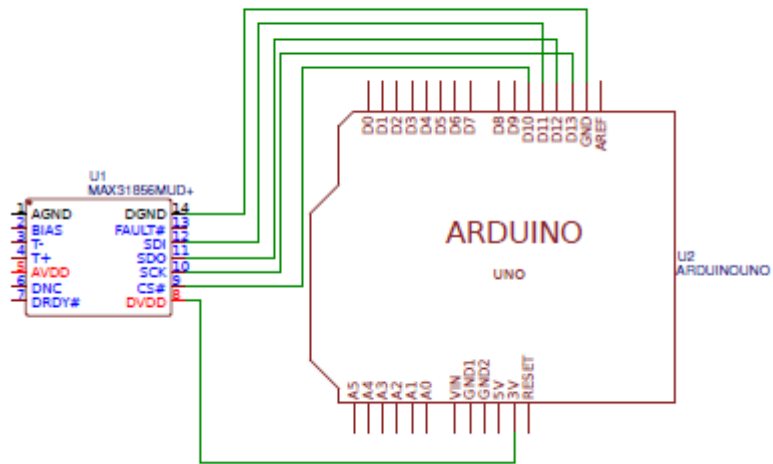


Figura 3.9. Diagrama de conexiones del módulo MAX31856 al Arduino UNO.

El módulo funciona como transmisor que permite obtener de forma confiable las mediciones de temperatura de los sensores RTD PT100. El módulo se encarga de realizar la lectura de resistencia del sensor RTD PT100 y convertir esta señal analógica en un dato digital para ser interpretado como un valor de temperatura por el microcontrolador.

Se consideró hacer que el sistema de monitoreo sea amigable con el usuario, por lo que se optó por utilizar el firmware de monitoreo LabVIEW, ya que es un software que ofrece una programación orientada a objetos, manejo de puertos de manera sencilla y que, además, permite realizar una interfaz HMI visual. En la figura 3.10 se muestra parte del código final de LabView con el que se proyectan los datos arrojados por los sensores.

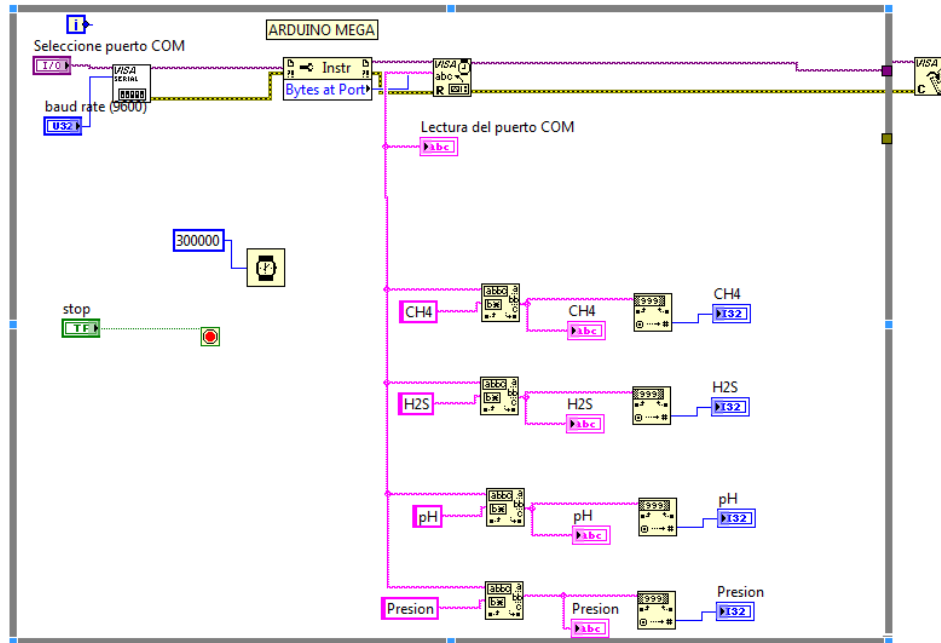


Figura 3.10. Código de LabView utilizado para mostrar los datos adquiridos por el Arduino MEGA.

El código es similar para el Arduino UNO, ya que en LabView solo se muestran los datos que se procesan en los microcontroladores.

La comunicación Arduino – LabView fue directa para evitar la pérdida de datos, se instaló una computadora portátil a un costado del biodigestor sobre una mesa, así como una fuente que alimenta los sensores; dicha fuente se utilizó para evitar la caída de corriente y asegurar la medición de los sensores.

Los sensores fueron conectados por medio de cable plano flexible, las terminales del cable se soldaron a placa con pines, los cuales se conectaban al Arduino por medio de jumpers. Se pensaron las conexiones de esa manera para que resultara más sencillo hacer el cambio de sensores en caso de ser necesario. La placa tiene pines para conectar todos

los sensores que se encuentran dentro del biodigestor y para futuros sensores que se quieran implementar, así como entradas especiales para conectar la fuente. En la figura 3.11 se muestra la placa con los pines y el cable plano flexible que se utilizó en el proyecto.

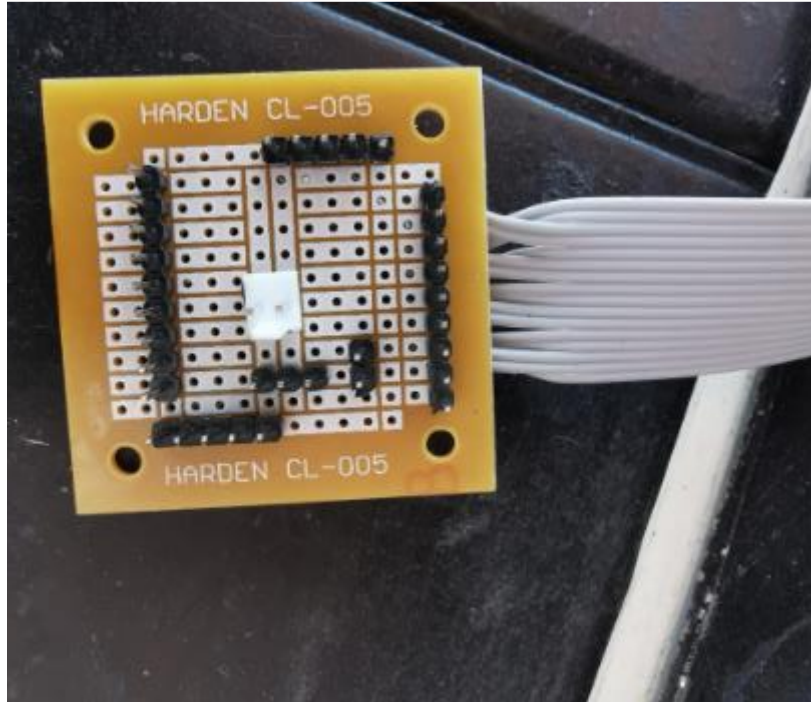


Figura 3.11 Placa de pines.

Los pines especiales para la fuente son los que se encuentran en el centro de la placa, corresponden al conector que tiene se soldó a los cables de voltaje y tierra de la fuente.

El Arduino se mantuvo todo el tiempo en la caja sellada, mostrada en la figura 3.12, para evitar que el ambiente lo dañara, protegiéndolo de la humedad, polvo, insectos y aves.

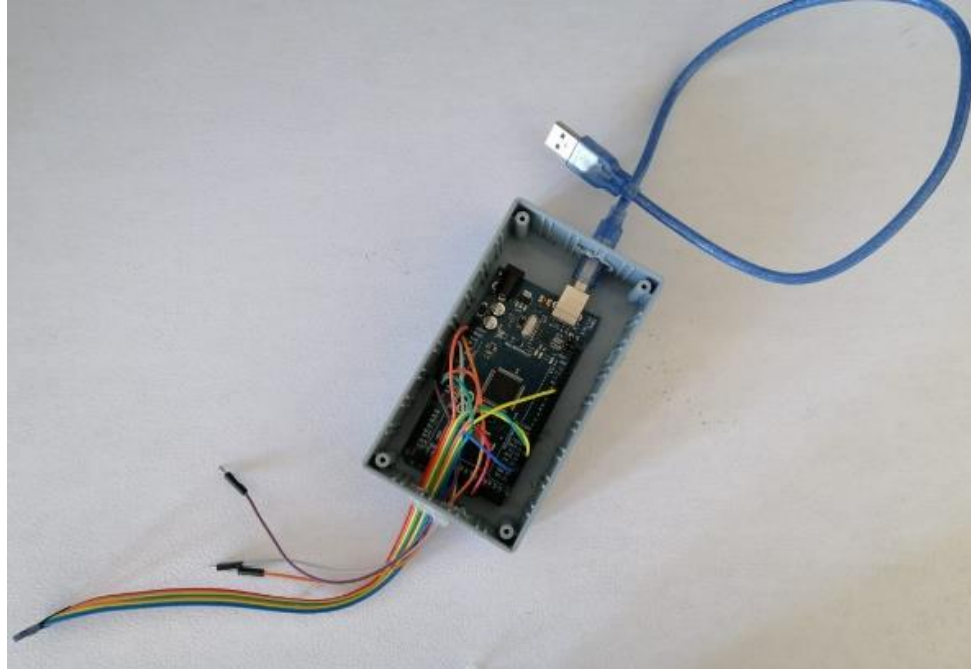


Figura 3.12 Protección del Arduino.

En la parte superior sale de la caja el cable que conecta el Arduino con la computadora y en el inferior están los jumpers que van a la placa de pines.

3.3 Control de temperatura

El control de temperatura se decidió hacer de tipo ON/OFF, es decir de dos posiciones, en donde el controlador en respuesta a la señal de error a su entrada solo tiene dos posiciones fijas a su salida como acción de control, independientemente de que el elemento final pueda tener posiciones intermedias a las anteriores. Se aplicó este tipo de control por los bajos costos que implica y da solución al problema que se plantea, que es poder mantener la temperatura dentro de un rango.

El diagrama mostrado en la figura 3.13 corresponde a la descripción del control que se empleó en las resistencias térmicas, en donde la referencia de entrada es la temperatura registrada por el sensor, a la cual se le resta la diferencia, obteniendo a la salida el error el cual entra al bloque el controlador, que en este caso es pregunta si la temperatura está por debajo de 32° o si es mayor a 35°C ,dependiendo de la respuesta será la acción del control.

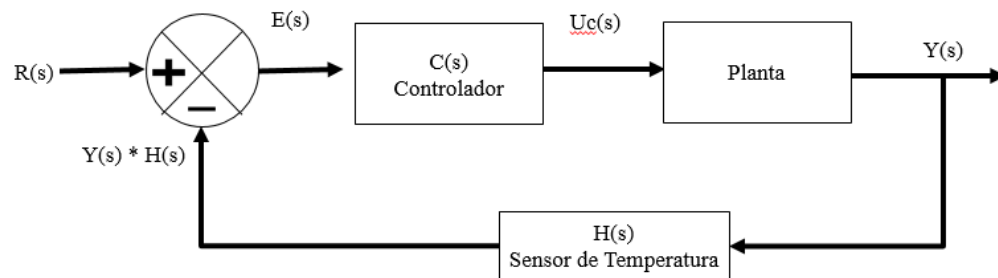


Figura 3.13 Diagrama a bloques de control térmico.

R(s) es la referencia, E(s) el error, el cual es la diferencia de la referencia menos la respuesta retroalimentada, el controlador en este caso son los relevadores, la planta las resistencias dentro del biodigestor y H(s) es la lectura del sensor de temperatura.

El comportamiento del control aplicado se describe matemáticamente en la ecuación (4).

$$U_c(s) = \begin{cases} 100\% & \text{si } E(s) > 32 \\ 0\% & \text{si } E(s) < 35 \end{cases} \quad (4)$$

La respuesta de la ecuación (4) se aprecia mejor si se grafica la acción de control en función de la salida del sistema, tal como se aprecia en la figura 3.14.

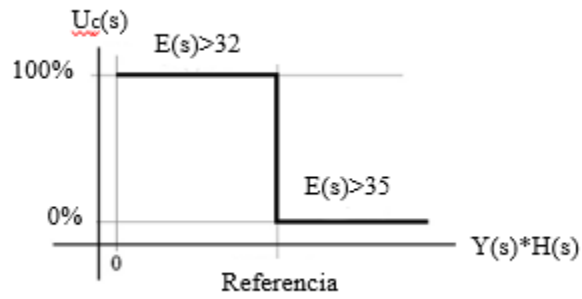


Figura 3.14 Acción del control ON/OFF aplicado a las resistencias térmicas

Al estar en 100% los relevadores se activan para energizar las resistencias térmicas y al estar en 0% se abren para dejar de suministrar energía a las mismas.

El programa que controla los relevadores se realizó en el IDE de Arduino para cargarse posteriormente en un Arduino UNO.

CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Carga y descarga del biodigestor

Para comparar los resultados que se obtiene de un sistema con control de temperatura los de un sistema sin control, fue necesario realizar dos cargas del biodigestor, ambas de 100L con un tiempo de retención hidráulica de 21 días.

El sustrato que se utilizó en ambas cargas fueron veinticinco litros de excremento de vaca con paja, obtenido de una granja lechera ubicada en el municipio de San Andrés Cholula. La mezcla fue agua con excremento en relación 3:1, es decir tres cubetas de 25L de agua por una cubeta de 25L excremento, tal como se puede ver en la figura 4.1.



Figura 4.1 Biodigestor cargado

El sustrato que se utilizó fue excremento de vaca con paja.

4.1.1 Primera carga

En la primera corrida solo se monitorearon los parámetros, para observar su comportamiento en condiciones ambientales.

Una vez cargado el biodigestor, fue necesario sellar la geomembrana, para ello se utilizaron dos marcos de hule y un marco de acero, los tres con entradas para tornillos de acero inoxidable. En total se instalaron 36 tornillos inoxidables con su tuerca correspondiente para fijarlos, tal como se puede notar en la Figura 4.2.



Figura 4.2 Biodigestor sellado

La cochinita se instaló como medida de emergencia en caso de ser necesario la evacuación del biogás durante las corridas del equipo.

Al cargarse el biodigestor en el mes de diciembre, las temperaturas registradas del sustrato fueron bajas por las noches, con una mínima de 9.53°C, y en el transcurso del día fueron aumentando hasta llegar a una temperatura máxima de 25.04°C, la cual se encuentra por

debajo del rango de temperatura óptima que se necesita para llevar a cabo la digestión anaerobia mesofílica que es entre 33 y 37°C.

La temperatura en la ciudad de Puebla varía mucho en el día, tarde y noche, por lo que la temperatura registrada a lo largo de las cuatro semanas en las que se realizaron mediciones no fue constante, tal como se puede notar en la figura 4.3.

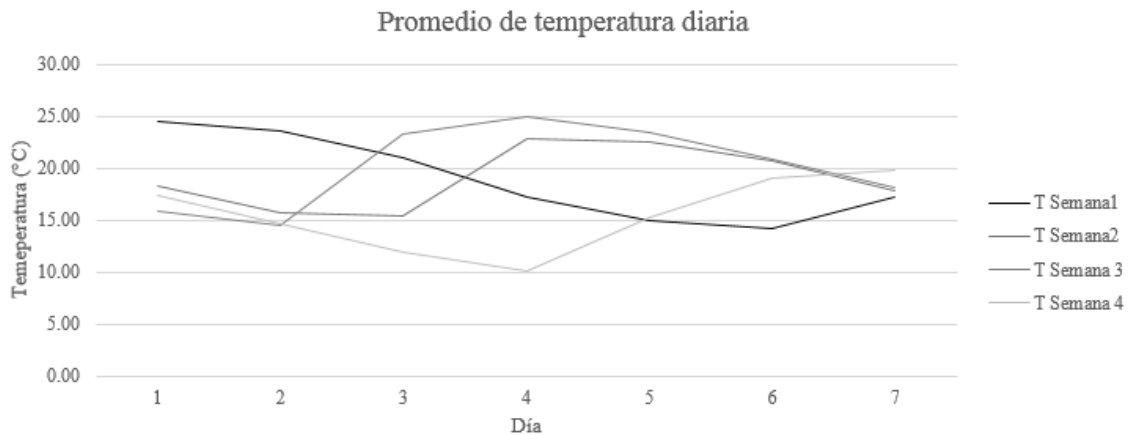


Figura 4.3. Promedio diario de los registros de temperaturas del sustrato dentro del biodigestor.

El registro a lo largo de cuatro semanas; en la última semana de la carga se registraron las temperaturas más bajas.

En cuanto al pH, los cambios también fueron notables, sin embargo, solo oscilaba entre valores de 4.5 a 7, estando también por debajo de los niveles óptimos de producción.

La gráfica de la Figura 4.4 muestra los registros de pH obtenidos durante los 21 días de la primera carga del biodigestor, se pueden notar los cambios constantes en la medición, se puede observar cómo baja el pH por las noches y va aumentando en el transcurso del día.

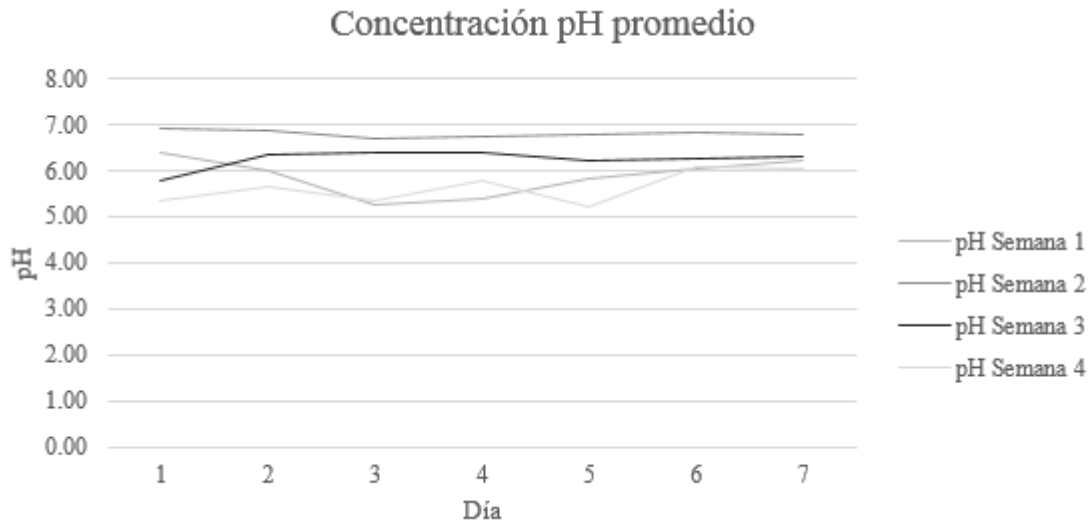


Figura 4.4. pH registrado durante cuatro semanas, sin control de temperatura.

El pH mínimo registrado fue de 4.5 y el máximo de 7.0. Cada línea corresponde a una semana de la corrida.

Los resultados del ácido sulfhídrico mostraron que al paso de los días la concentración de este gas fue aumentando, tal como se muestra en la gráfica de la figura 4.5. Para las concentraciones de gases, se tomaron mediciones cada 15 minutos a lo largo, al final se promediaron las mediciones por día a lo largo de los 28 días de carga, esto para tener una idea más clara del comportamiento de los gases que se produjeron dentro del biodigestor.

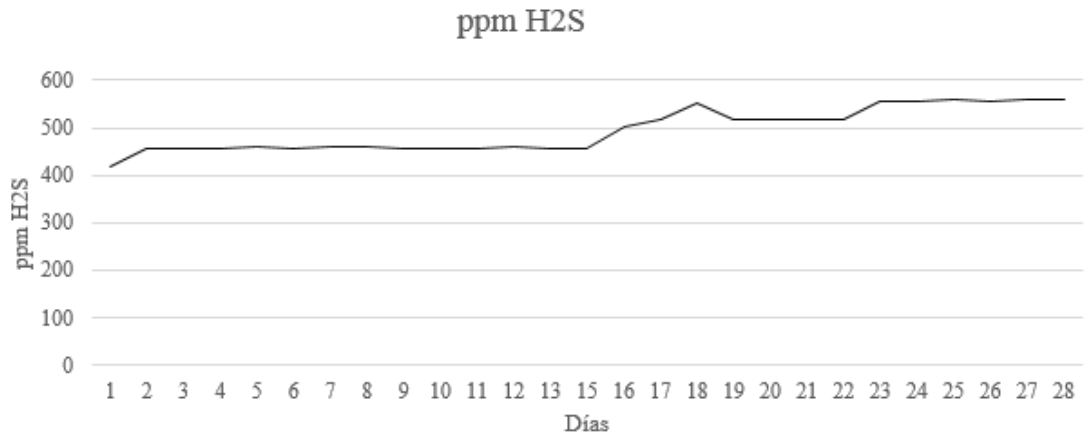


Figura 4.5. Concentración de partículas por millón de ácido sulfhídrico en la primera carga del biodigestor.

Se puede notar que a partir del día 15 la concentración del H₂S comienza a aumentar, esto podría deberse a la baja temperatura y pH registrado en los últimos días de la carga.

Es importante el monitoreo del metano ya que es el parámetro que nos indica cómo incrementa o disminuye la producción de dicho gas. En este caso no se contó con un caudalímetro, sin embargo, se registraron las mediciones de ppm del metano generado en el transcurso de los 28 días de la carga. La figura 4.6 muestra las variaciones de ppm del gas metano generado dentro del biodigestor.

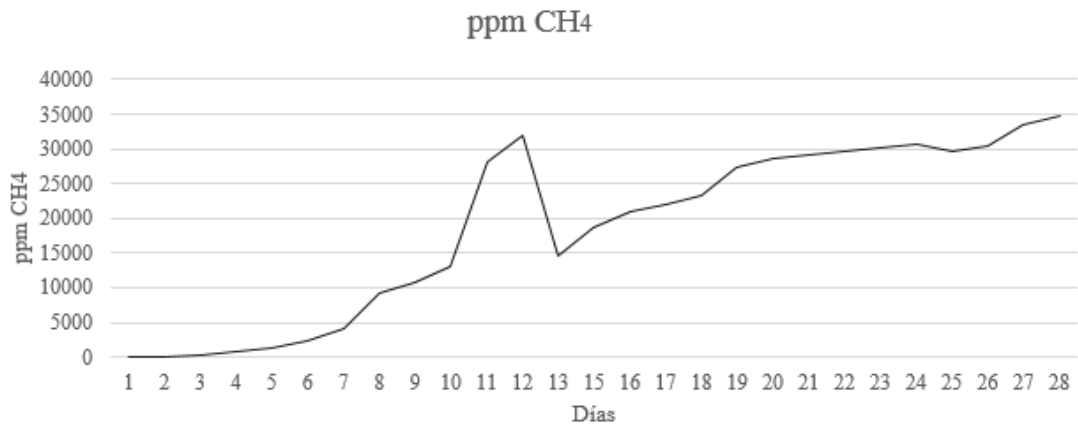


Figura 4.6 Promedio de la concentración de las partículas por millón de gas metano (CH4) registradas diariamente.

La caída de metano es registrada en la semana con las temperaturas más bajas, por lo que, a menor temperatura, menor producción de gas metano se tendrá.

En la figura 4.7 se puede notar cómo en los primeros días no hay presión dentro del biodigestor, lo cual indica que no hay producción de gas hasta el cuarto día.

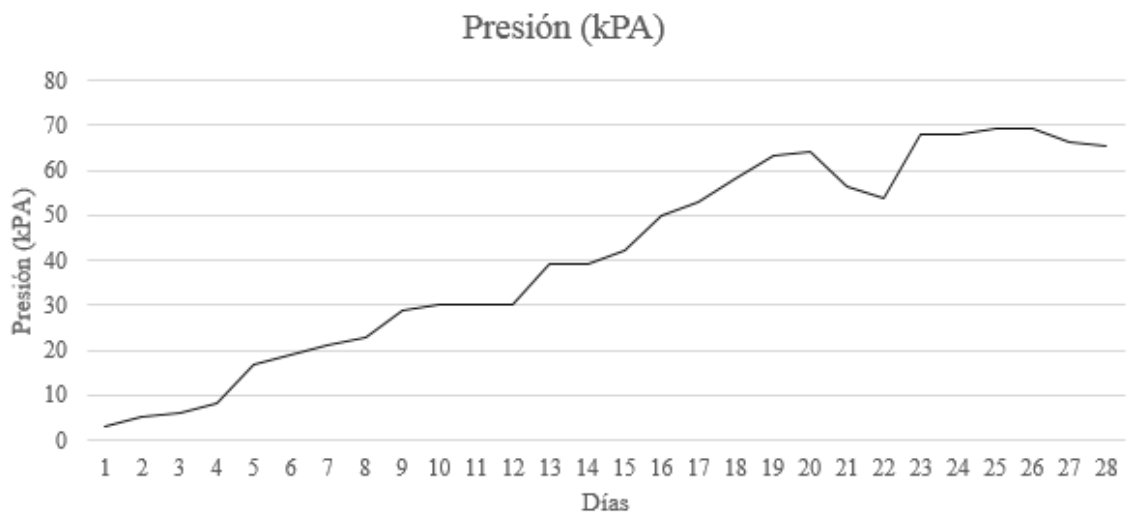


Figura 4.8. Registro de presión dentro del biodigestor.

Registro tomado a lo largo de 28 días de trabajo del biodigestor.

Los primeros días de la carga se registró un valor de 30.5 mg/L de oxígeno disuelto en el sustrato, sin embargo, fue disminuyendo en el transcurso de los días. Al terminar la etapa fermentativa se observó que los mg/L no se disolvieron por completo, dando los últimos registros de 19.09 mg/L lo cual indica que el biogás de esta carga no tiene la calidad necesaria para ser utilizado correctamente.

4.1.2 Segunda carga

La segunda corrida constó en la implementación de control de temperatura, para conocer el comportamiento del proceso en condiciones óptimas de temperatura. La cantidad de excreta que se utilizó para esta corrida fueron 80L, al igual que en la primera.

Para la instalación de las resistencias fue necesario un cable calibre 14AWG para evitar temperaturas altas en el cable, los cuales iban a los relevadores que controlaban la alimentación del sistema térmico y a la toma de corriente.

La temperatura inicial del biodigestor al comenzar la segunda carga fue de 21.4°C y el tiempo que tardó en llegar el sistema térmico a la temperatura que se estableció como la ideal (35°C) fue de 20 minutos, en la figura 4.5 se muestra la rampa de temperatura del sistema.

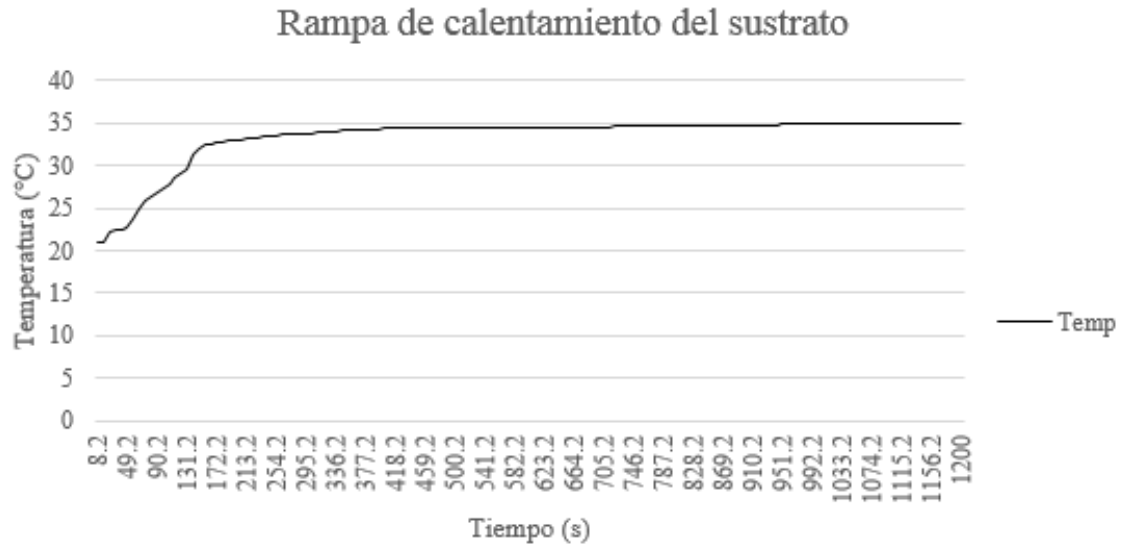


Figura 4.7. Rampa de respuesta inicial del sistema térmico.

La repuesta del sistema térmico al iniciar la corrida es de 20 minutos, los registros de temperatura se realizaron cada 8 segundos.

Al llegar a la temperatura de 35°C, esta se mantuvo siempre en un intervalo de 32°C a 35°C a lo largo de los 28 días de la carga, periodo en el cual se registraron un total de 8,642 muestras. En la figura 4.8 se muestran dichos registros de la segunda corrida. Los datos no se presentan en promedio diario, ya que se lograrían apreciar los cambios en el tiempo que tarda el sistema en llegar a una temperatura alta y cuánto al límite inferior establecido (32°C). El tiempo de calentamiento varía según la etapa de la digestión anaerobia en la que se encuentra tomando la medición.

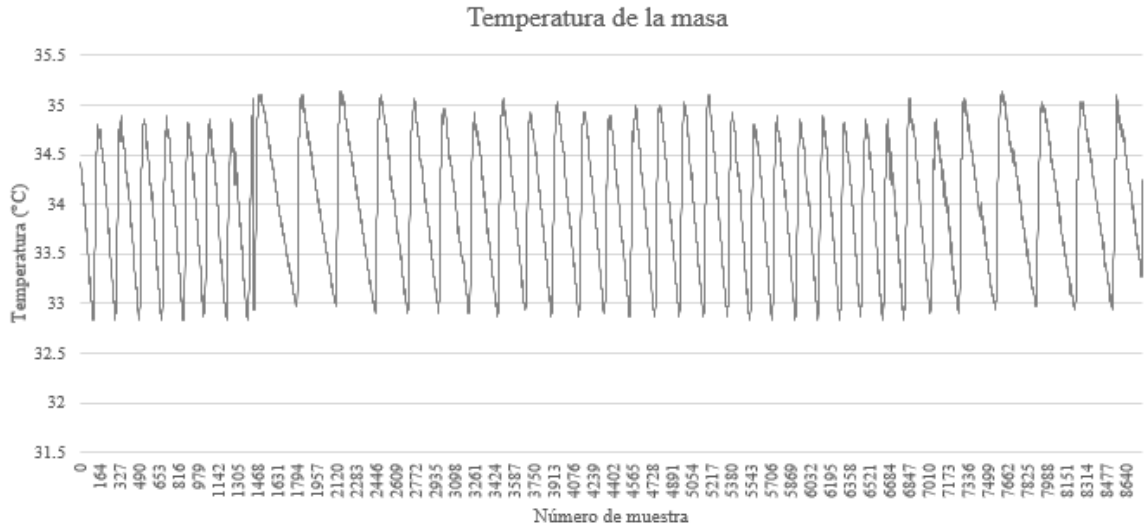


Figura 4.8. Registros de temperatura obtenidos de la segunda corrida del biodigestor.

Se tomó un total de 8,642 mediciones en 28 días, esto para evitar que la temperatura sobrepasara los límites de temperatura establecidos (32°C - 35°C) y hacer que el controlador ON/OFF actúe en el momento oportuno.

El pH en este caso se comportó de la manera esperada, pues al mantener un rango de temperatura constante, la concentración de pH se mantuvo dentro de los rangos en cada etapa de la digestión anaerobia como se puede observar en la figura 4.9.

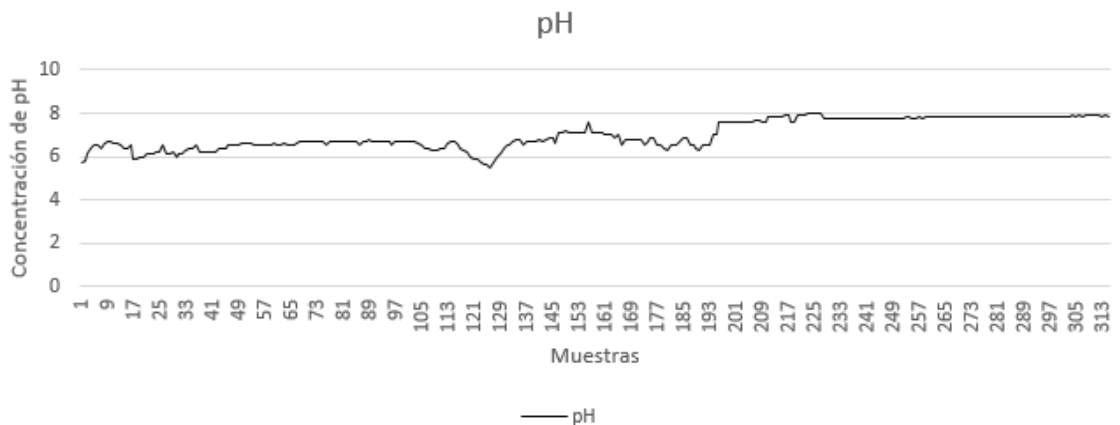


Figura 4.9. Registros de concentración de pH a lo largo de 28 días.

Se tomó un total de 314 muestras de concentración de pH, esto con la finalidad de tener mejor resolución de resultados graficados.

En el caso del metano, el sistema de monitoreo logró registrar el aumento de la concentración de ppm de dicho gas hasta llegar al día 21 en donde se estabiliza la curva como se puede notar en la figura 4.10. Caso contrario del ácido sulfhídrico, el cual fue disminuyendo su concentración hasta llegar a valores por debajo de las 200ppm, como se observa en la figura 4.11, esto significa que es un gas adecuado para su utilización en otros procesos tanto energéticos como térmicos.

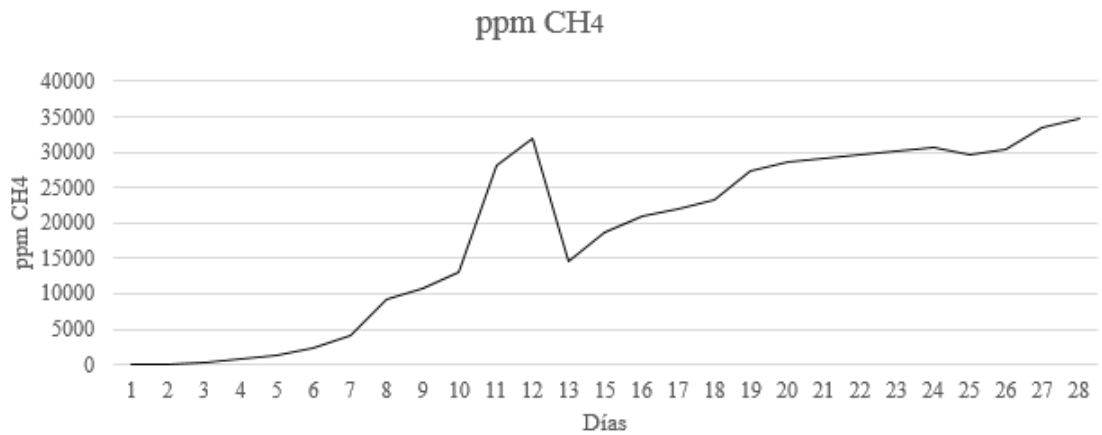


Figura 4.10. Concentración de metano registrada a lo largo de 28 días.

Se puede notar el aumento de concentración en ppm del gas metano producido dentro del biodigestor.

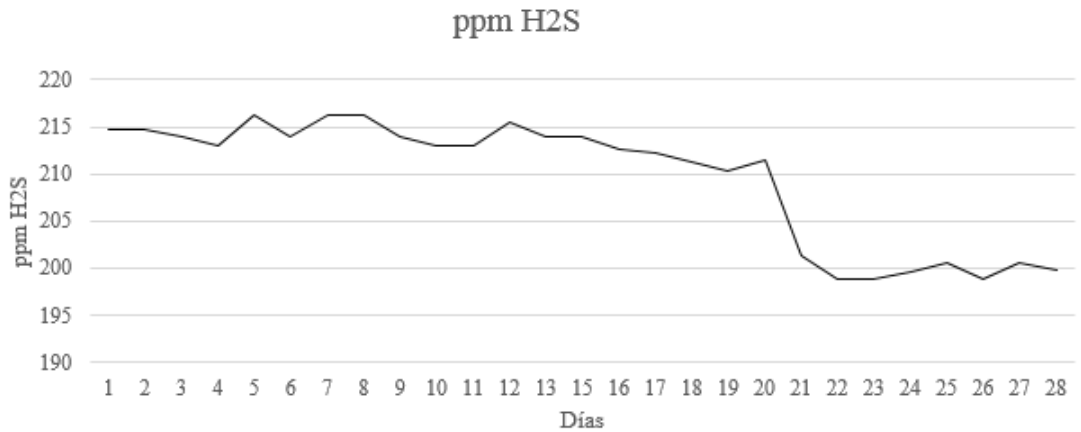


Figura 4.11. Concentración registrada de ácido sulfhídrico.

Se puede notar cómo va disminuyendo la concentración de ppm de H₂S dentro del biodigestor, lo que indica que es un biogás adecuado para su utilización como fuente de energía.

Al mantener una temperatura constante, se aseguró que el sistema trabajara en condiciones favorables de la digestión anaerobia, lo cual significa que se produjo más gas que en la corrida sin control de temperatura, esto se puede deducir al ver la respuesta de los cambios de presión dentro del biodigestor. La curva de respuesta se puede observar en la figura 4.12.

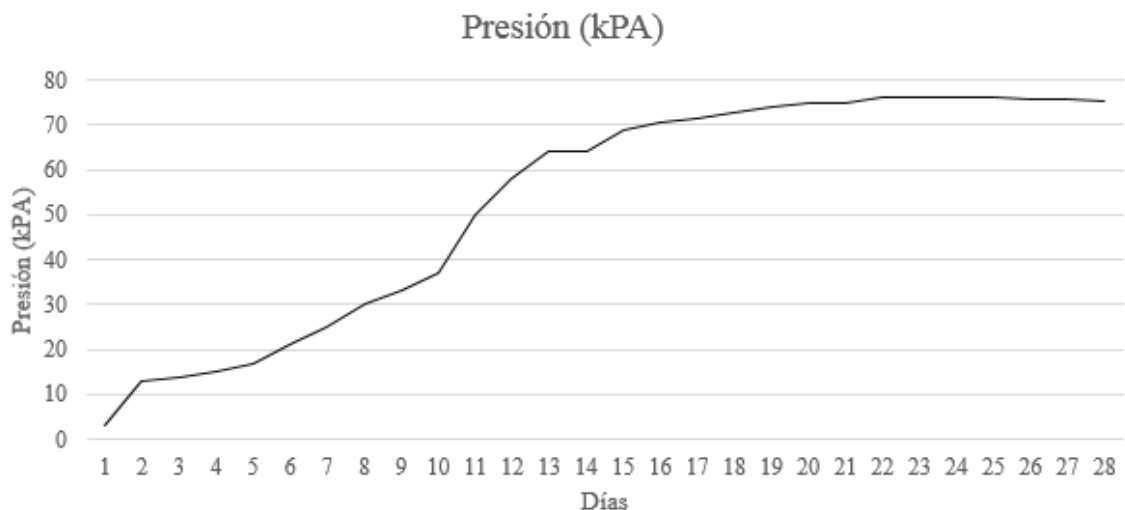


Figura 4.12 Registro de la presión dentro del biodigestor durante 28 días.

La figura muestra la respuesta que se obtuvo del sensor de presión en kPA.

A diferencia de la primera carga, este caso sí se observó que las trazas de oxígeno disuelto en el sustrato desaparecieron, lo cual indica que la etapa fermentativa se realizó exitosamente.

4.2 Interfaz LabView

En el monitor de LabView se pudieron visualizar las mediciones que entregaban los sensores cada 3 minutos, se decidió que ése fuera el tiempo para evitar sobrecalentamiento de las resistencias y, por ende, del sustrato. Al ser una gran cantidad de datos registrados y para facilitar la observación del usuario de las mediciones, en cada una de las gráficas se añadió una barra de desplazamiento (Scroll bar) y así no perder la forma de las curvas.

En la figura 4.13 se muestra parte de la pantalla del monitor de LabView, en el cual se pueden observar las mediciones que se estaban registrando en ese momento.

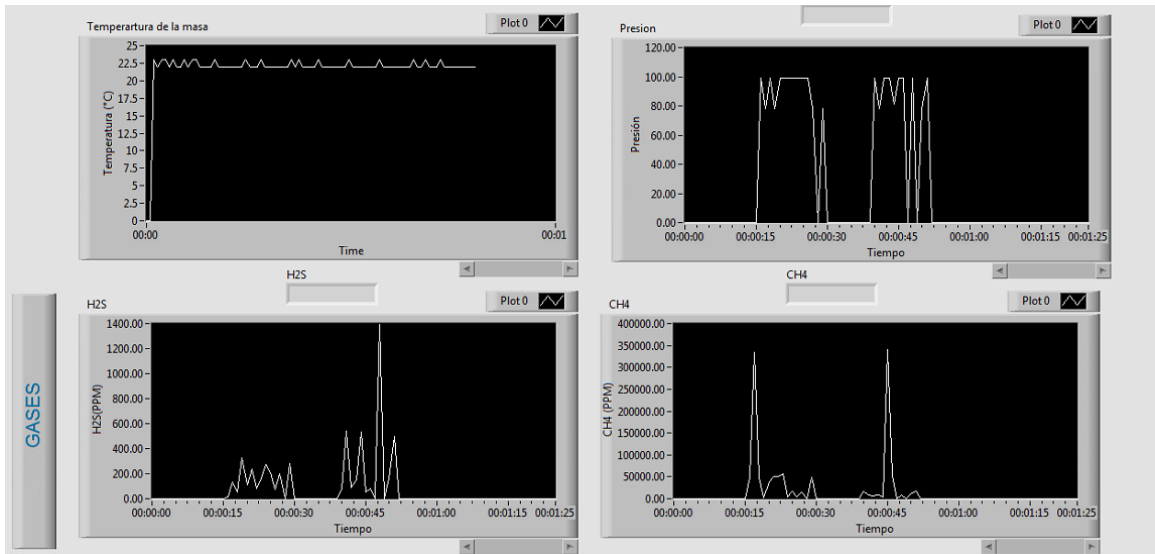


Figura 4.13. Monitor de LabView.

Se optó por un diseño simple, fácil de entender por el usuario y de fácil acceso a los datos, en caso de ser necesario el análisis de los resultados registrados.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de este trabajo han sido exitosos, se logró cumplir con los objetivos establecidos, ya que se diseñó un biorreactor anaerobio experimental que puede ser utilizado para realizar diferentes pruebas monitoreando los parámetros críticos de la reacción anaerobia que sucede dentro del biodigestor, facilitando la comparación de datos obtenidos entre cargas de diferentes sustratos.

El sistema de monitorización entrega las lecturas cada cierto tiempo establecido por el usuario, esto quiere decir que se pueden modificar los tiempos de entrega de datos de los sensores sin complicación alguna y visualizarlos en la interfaz.

En cuanto a los resultados obtenidos de las pruebas experimentales se puede concluir que la temperatura si influye en las variables activas del proceso de digestión anaerobia, sin embargo, no influye en el mismo grado a cada una de ellas. En el pH se observaron cambios a partir de variaciones de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ por lo que, al mantener la temperatura en el rango de 30 a 35°C como se realizó, el pH se mantuvo en el rango favorable para la producción de biogás de las bacterias anaerobias.

La producción de metano también se vio influenciada por la temperatura, al igual que el ácido sulfhídrico, caso contrario del oxígeno disuelto, el cual no tuvo cambios significativos en la corrida con control de temperatura de la corrida sin control.

En cuanto al sistema térmico se notó que se tiene una respuesta con un amplio tiempo de retardo, lo cual ocasiona que se tenga inercias térmicas elevadas; para el proceso dentro del biodigestor es suficiente el control ON/OFF si se considera que el límite máximo sea de 3 grados más del establecido en una operación óptima y si se utiliza solo una resistencia

térmica. Sin embargo, se puede optimizar el consumo de energía si se implementa un sistema de control de potencia PID y ajustado a cada etapa del proceso, ya que cada una de ellas tiene un rango de operación óptimo.

CONCLUSIÓN

A lo largo del trabajo se enfrentaron con diferentes obstáculos, debido a la falta de información en la literatura en cuanto a un procedimiento adecuado para la monitorización de biodigestores, sin embargo, se logró cumplir con los objetivos planteados.

Se comprobó la importancia de que los biodigestores sean instrumentados, ya que se mejora la producción de biogás y, posiblemente, su calidad. Esto último se puede deducir por las concentraciones de ácido sulfhídrico, pH y oxígeno disuelto registrados en la segunda corrida con control de temperatura.

Es importante que se impulsen este tipo de investigaciones, pues nuestro país es potencia en producción de biogás y biofertilizantes por la gran producción agropecuaria que tenemos, sin mencionar que la bioenergía es una excelente fuente energía renovable y aliada de un futuro sustentable.

TRABAJO A FUTURO

A continuación, se muestra un listado de los trabajos a futuro que se proponen realizar con el biodigestor que aquí se presentó.

- Mejorar la instrumentación, mejorando la eficiencia energética del sistema.
- Rediseñar la interfaz gráfica para poder ver todas las variables en una misma gráfica sin tener que exportar datos a otros programas. Así como aproximar el muestreo de las mediciones al tiempo real.
- Implementación del flujo continuo.
- Agregar agitación mecánica automatizada al proceso.
- Realizar corridas con diferentes excretas y comparar los resultados obtenidos de los sensores.
- Implementar un sistema de control PID por etapas de la biodigestión anaerobia.
- Realizar estudios químicos del sustrato al iniciar la carga y al finalizarla, con el objetivo de evaluar la calidad el sustrato como bioabono.

REFERENCIAS

- Águilar, G. (2013). Control de temperatura y pH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala. *Universidad Autónoma de Querétaro*, 98.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones* (Cuarta edición ed.). México: McGraw Hill.
- Corona, I. Z. (2007). Biogigestores. *Universodad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 69.
- Dalai, R. C., Allen., D. E., & Richards, J. L. (2008). Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. *Plant Soil*, 43-76.
- Delgado, C. M. (1997). *Parámetros de control y monitoreo del proceso en digestores anaerobios de pequeña escala y diferentes tecnologías*. Cuba: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from easte and renewable resources*. Deggendorf, Deggendorf, Alemania: Wiley-VCH.
- Díaz H., M., & Bermúdez G., C. (2010). Instrumentación de un biodigestor de estiércol animal para analizar su comportamiento dinámico. *Universidad Industrial de Santander*, 48.

- Dochain, D., & Bastin, G. (1985). Stable adaptive controllers for waste treatment by anaerobic digestion. *Environmental Technology Letters*(6), 584-593.
- European Commission. (1997). *Energy for the future, renewable sources of energy*. Bruselas: White Paper for a Community Strategy and Action Plan COM.
- FAO. (2019). *Energía*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura: <http://www.fao.org/energy/bioenergy/es/>
- Gutiérrez, J. (2018). *Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030*. Morelia: Red Mexicana de Bioenergía A.C.; Red Temática de Bioenergía de CONACYT.
- Mandado, E., Mariño, P., & Lago, A. (1995). *Instrumentación electrónica*. Editorial Marcombo.
- Martínez, G., & Rodríguez, C. (2007). Diseño y construcción de un biodigestor anaerobio de lecho fijo para operación en continuo a escala piloto con control de temperatura y pH. *Universidad Industrial de Santander, Colombia*, 56.
- Moletta, R., Escoffier, Y., Ehlinger, F., Coudert, J., & Leyris, J. (1994). Proc. 7th. *International Symp on Anaerobic Digestion*, 12-20.
- Moreno, M. T. (2001). *Manual de biogás*. Santiago de Chile: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (Vol. Quinta edición). Madrid: Pearson Educación, S.A.

Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of Anaerobic Treatment - a Critical-Review. En *Critical Reviews in Environmental Control* (págs. 411-490).

Pérez, J. M. (Marzo de 2010). ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA APLICACION EN PEQUEÑOS GANADEROS Y LECHEROS. *Universidad de Chile*. Obtenido de https://academia.edu.documents/35562636/tesis_biodigestores.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1528254217&Signature=fHsuWmKir9gLD58XFZklgZBSLfU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DESTUDIO_Y_DISENO_DE_UN_BIODIGESTOR

Pérez, J. M. (Marzo de 2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. *Universidad de Chile*, 83. Obtenido de https://academia.edu.documents/35562636/tesis_biodigestores.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1528254217&Signature=fHsuWmKir9gLD58XFZklgZBSLfU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DESTUDIO_Y_DISENO_DE_UN_BIODIGESTOR

Rivas Lucero, B. A., Zúñiga Avila, G., Sáenz Solis, J. I., Guerrero Morales, S., Segovia Lerma, A., & Morales Morales, H. (Enero-Junio de 2012). Perspectivas de obtención de energía renovable de la biomasa del estiércol del ganado lechero en la región centro-sur de Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, págs. 872-885.

Rivas, B. L., Zúñiga, G. A., Sáenz, J. S., Guerrero, S. M., Segovia, A. L., & Morales, H.

M. (Junio de 2012). LA BIOMASA DEL ESTIÉRCOL DEL GANADO
LECHERO EN LA REGIÓN CENTRO-SUR DE CHIHUAHUA. *Red de
Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.*

SAGARPA. (2012). *México: el sector agropecuario ante el desafío del cambio climático.*

México: Secretaría de Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

SENER, S. d. (2016). *Prospectiva de energías renovables 2016-2030.* México.

Stams, A., S.Oude-Elferink, & Westermann, P. (2003). Metabolic Interactions Between

Methanogenic Consortia and Anaerobic Respiring Bacteria. En *Advances in
Biochemical Engineering / Biotechnology* (pág. 32). Berlin: Springer.

APÉNDICES

Apéndice A. Cálculo de potencia de resistencias térmicas

$$Q = m_{lodo} c_{lodo} \Delta T \quad (1)$$

donde:

$$m_{lodo} = 100L = 100kg$$

$$c_{lodo} = 4.184 \text{ kJ/kgK}$$

Sustituyendo valores, obtenemos que:

$$Q = 100L * 4.184 \text{ kJ/kgK} * 30^\circ C$$

$$Q_{lodo} = 12.552 \times 10^6 J$$

Lo que equivale a 3.486kWh, que es la potencia para calentar el lodo.

Para calcular la $Q_{perdida}$ por conducción y radiación del esquema presentado a continuación (Figura 2.3, 2.4 y 2.5) se emplea la ecuación (2)

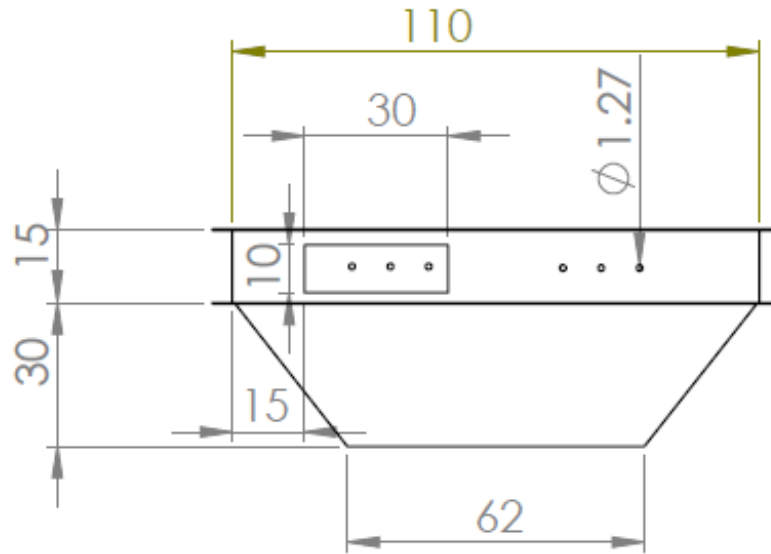


Figura a1.1 Vista frontal del reactor.

Se muestran las cotas de la vista frontal del biorreactor. Todas las medidas están en centímetros. $A_{lomo1}=0.2310m^2$

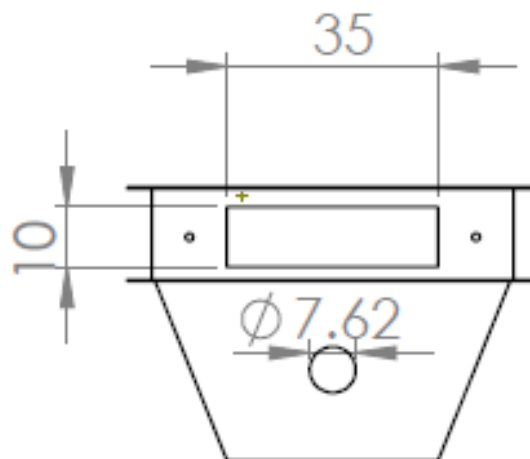


Figura a1.2 Vista lateral del reactor.

En esta vista se puede notar las cotas del lado lateral del reactor. Ambos lados laterales son exactamente iguales en el diseño. Todas las medidas que se muestran están en centímetros. $A_{lomo2}=0.15m^2$

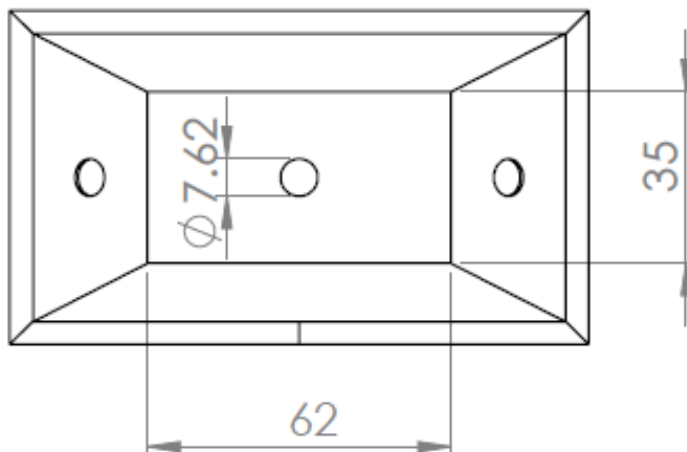


Figura a1.3 Vista superior del reactor

Todas las medidas se encuentran en centímetros. $A_{base} = 0.217m^2$, $A_{tapa} = 0.715m^2$

$$q_{cond} = A \frac{\Delta T}{e/k} \quad (2)$$

En este caso tenemos dos tipos de materiales diferentes que son el acero y la geomembrana, tabla 2.1 por lo que la ecuación (2) tiene dos casos de pérdida de calor por conducción.

Tabla 2.1 Propiedades térmicas de los materiales utilizados en el biodigestor

| Material | Espesor | Coficiente de conductividad (k) | Emisividad e (valor adimensional) | h |
|-----------------|---------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Lámina de acero | 0.0635m | 16.3 W/mk | 0.35 | 10W/m ² k |
| Geomembrana | 0.03m | 0.33 W/mk | 0.85 | 10W/m ² k |

En el caso del acero, tenemos la sustitución de la ecuación (3) :

$$q_{cond(acero)} = (A_T)_{acero} \frac{\Delta T}{\frac{e_{acero}}{k_{acero}}} \quad (3)$$

donde:

$$\Delta T = 35^{\circ}C - 5^{\circ} = 30^{\circ}C$$

$$(q_{cond})_{acero} = (1.714m) \frac{30^{\circ}C}{\frac{0.35}{16.3W/k}} = 2,394.703 J$$

La ecuación (4) corresponde a la sustitución de variables para el material de geomembrana.

$$q_{cond(geom)} = (A_T)_{geom} \frac{\Delta T}{\frac{e_{geom}}{k_{geom}}} \quad (4)$$

$$= (0.715m) \frac{30^{\circ}C}{\frac{0.85}{0.33W/k}} = 8.3276 J$$

Una vez sustituidos los valores en las ecuaciones anteriores, podemos conocer el total de calor perdido por conducción.

$$Q_{cond} = 2394.703J + 8.3276J = 2,403.0305 J$$

Ahora, para calcular la potencia eléctrica de las resistencias es necesario solucionar las siguientes operaciones, en donde Q_{ag} es la potencia necesaria para calentar el agua contenida en el biodigestor y Q_{rec} la potencia necesaria para el lodo.

Sabemos que 1kWh= 862kcal, entonces:

$$Q_{ag} = 100kg * 1kcal * 30^{\circ}C = 3000 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 3.4803kWh$$

$$Q_{rec} = 71.7kg * 0.11kcal * 30^{\circ}C = 236.61 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 0.275kWh$$

Por lo tanto, para calentar un biodigestor con una masa de 100kg, se necesitan:

$$Q_T = 3.4803kWh + 0.275kWh = 3.75479kWh$$

donde $Q_T =$ flujo de calor total

Si el tiempo estimado de calentamiento es de 6 horas, entonces son necesarios:

$$(Q_T)_{6h} = \frac{3.75kWh}{6h} = 0.63kW$$

Pero si se considera que el lodo se encuentra a temperatura ambiente ($20^{\circ}C$), entonces nos queda:

$$Q_{ag} = 75kg * 1kcal * 15^{\circ}C = 1500 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 1.305kWh$$

$$Q_{rec} = 25kg * 0.11kcal * 15^{\circ}C = 157.74 kcal * \frac{1kWh}{862kcal} = 0.047kWh$$

$$Q_T = 1.74kWh + 0.183kWh = \mathbf{1.352 kWh}$$

Apéndice B. Código de calibración y operación de sensores MQ

```
int MG_PIN = 2;

int READ_SAMPLE_INTERVAL = 5;           //Define el número de muestras que se tomarán en la operación normal
int READ_SAMPLE_TIMES = 50;            //Define el intervalo de tiempo (en ms) entre cada muestra

/*****/
char gas[] = "testgas ";

/*****Globales*****/
//      x0_F0 = (400,0.324)  x1_F1 = (1000, 0.304)  ---> MGS11   CO2

float x0 = 400;                          //coordenada x del punto extremo izquierdo
float F0 = 0.324;                         //coordenada y del punto extremo izquierdo

float x1 = 1000;                          //coordenada x del punto extremo derecho
float F1 = 0.304;                         //coordenada y del punto extremo derecho

float Fx = 0;
float val_ppm = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);                     //UART setup, baudrate = 9600bps
}
```

```

void loop()
{
    Fx = MGRead(MG_PIN);

    Serial.print("EMF = ");
    Serial.print(Fx);
    Serial.print(" V ");
    Serial.print("\n");
    Serial.print(" ");

    float cte = ((Fx-F0)/(F1-F0))*log(x1/x0)+log(x0);
    val_ppm = pow(10,cte);
    Serial.print(gas);
    Serial.print(val_ppm);
    Serial.print(" ppm");
    Serial.print("\n");
    Serial.print(" ");

    delay(200);
}
float MGRead(int mq_pin)
{
    int i;
    float rs = 0;
    float adc = 0;

    for (i = 0; i < READ_SAMPLE_TIMES; i++) {
        adc = analogRead(mq_pin)*5.0/1023;
        rs += adc;
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }

    rs = rs / READ_SAMPLE_TIMES;

    return rs;
}

```

Apéndice C. Código del sensor pH

```

#include <Wire.h>
#define address 99

//PH SENSOR CODE

char computerdata[20];
byte received_from_computer = 0;
byte code = 0;
char ph_data[20];
byte in_char = 0;
byte i = 0;
int time_ = 900;
float ph_float;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
}

void loop() {

  if (Serial.available() > 0) {
    received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20);
    computerdata[received_from_computer] = 0;
    computerdata[0] = tolower(computerdata[0]);
    if (computerdata[0] == 'c' || computerdata[0] == 'x')time_ = 900;
    else time_ = 300;
    Wire.beginTransaction(address);
    Wire.write(computerdata);
    Wire.endTransmission();
  }
}

```

```

if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) {
    delay(time_);

Wire.requestFrom(address, 20, 1);
code = Wire.read();

switch (code) {
    case 1:
        Serial.println("Success");
        break;

    case 2:
        Serial.println("Failed");
        break;

    case 254:
        Serial.println("Pending");
        break;

    case 255:
        Serial.println("No Data");
        break;
}

while (Wire.available()) {
    in_char = Wire.read();
    ph_data[i] = in_char;
    i += 1;
    if (in_char == 0) {
        i = 0;
        Wire.endTransmission();
        break;
    }
}
}

```

Apéndice D. Código y control de temperatura

```
#include <Adafruit_MAX31865.h>

// software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(9, 10, 11, 12);

// Valor de referencia dl resistor. Utilizar 430.0 para PT100
#define RREF      430.0
// El valor 'nominal' 0-grados-C de resistencia del sensor es
// 100.0 para PT100
#define RNOMINAL  100.0

#define R1 0
#define R2 1

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  max.begin(MAX31865_3WIRE);
  pinMode(R1, OUTPUT);
  pinMode(R2, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
}
float temp = 0;
float t = 0;

void loop() {

  temp = TomaTemp();
  Serial.print("La temperatura antes de entrar a preguntar es de: ");
  Serial.print(temp);

  while (temp >= 0 && temp <= 35) {
    temp = TomaTemp();
    Serial.print("La temperatura debe estar entre 0 y 35:");
    Serial.print(temp);
    Serial.println();
    delay(1000);
    digitalWrite(R1, HIGH);
    digitalWrite(R2, HIGH);
    digitalWrite(13, HIGH);
  }
}
```

```

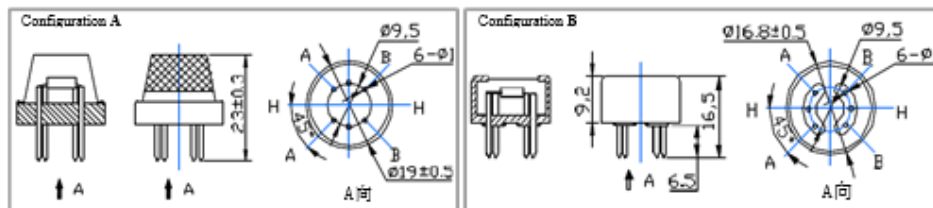
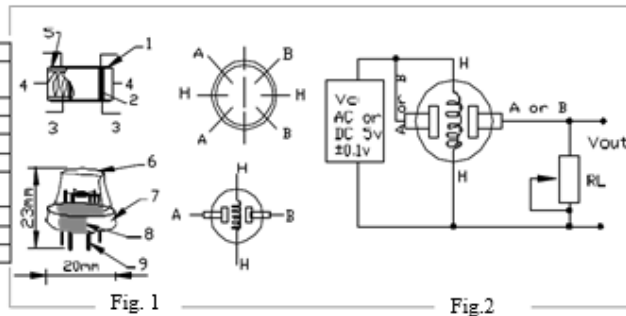
while (temp > 32) {
    digitalWrite(13, LOW);
    temp = TomaTemp();
    Serial.print("La temperatura es mayor a 32: ");
    Serial.print(temp);
    Serial.println();
    delay(1000);
    digitalWrite(R1, LOW);
    digitalWrite(R2, LOW);
}

}

float TomaTemp(){
    uint16_t rtd = max.readRTD();
    float ratio = rtd;
    ratio /= 32768;
    temp = max.temperature(RNOMINAL, RREF);
    return temp;
}

```


| Parts | Materials |
|--------------------------|---|
| 1 Gas sensing layer | SnO ₂ |
| 2 Electrode | Au |
| 3 Electrode line | Pt |
| 4 Heater coil | Ni-Cr alloy |
| 5 Tubular ceramic | Al ₂ O ₃ |
| 6 Anti-explosion network | Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh) |
| 7 Clamp ring | Copper plating Ni |
| 8 Resin base | Bakelite |
| 9 Tube Pin | Copper plating Ni |



Structure and configuration of MQ-136 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

TEL: 86-371-5333098 5333099

FAX: 86-371-5333090

E-mail: sensor@371.net

sensitive components. The enveloped MQ-136 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

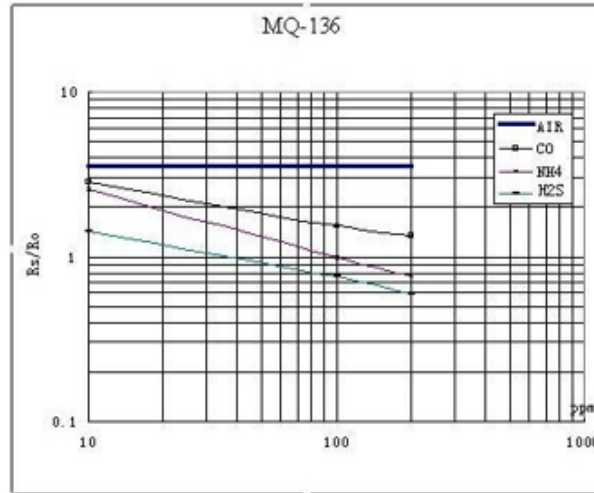


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-136 for several gases. in their: Temp: 20℃ , Humidity: 65% , O₂ concentration 21% , RL=20kΩ
Ro: sensor resistance at 10ppm of H₂S in the clean air.
Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

Fig.3 sensitivity characteristics of the MQ-136

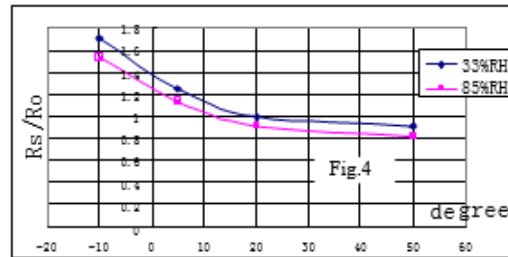


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-136 on temperature and humidity. Ro: sensor resistance at 10ppm of H₂S at 33%RH and 20 degree.
Rs: sensor resistance at 10ppm of H₂S at different temperatures and humidity.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-136 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 10ppm H₂S concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 KΩ (10KΩ to 47 KΩ).

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



Anexo II. Hoja de datos MQ 2

HANWEI ELETRONICS CO.,LTD

MQ-2

<http://www.hwsensor.com>

TECHNICAL DATA

MQ-2 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope
Stable and long life

Fast response and High sensitivity
Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of LPG, i-butane, propane, methane ,alcohol, Hydrogen, smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

| Symbol | Parameter name | Technical condition | Remarks |
|----------------|---------------------|---------------------|----------|
| Vc | Circuit voltage | 5V±0.1 | AC OR DC |
| V _H | Heating voltage | 5V±0.1 | AC OR DC |
| R _L | Load resistance | can adjust | |
| R _H | Heater resistance | 33 Ω ± 5% | Room Tem |
| P _H | Heating consumption | less than 800mw | |

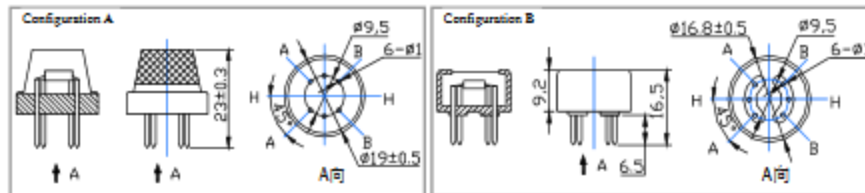
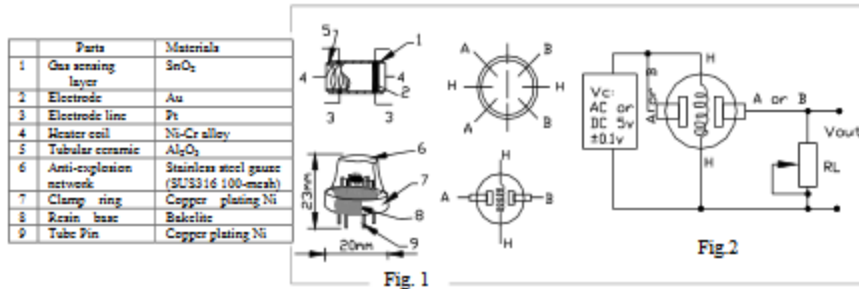
B. Environment condition

| Symbol | Parameter name | Technical condition | Remarks |
|-----------------|----------------------|--|--------------------------|
| T _{ao} | Using Tem | -20℃-50℃ | |
| T _{as} | Storage Tem | -20℃-70℃ | |
| 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. Sensivity characteristic

| Symbol | Parameter name | Technical parameter | Remarks |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| R _s | Sensing Resistance | 3K Ω -30K Ω (1000ppm iso-butane) | Detecting concentration scope: 200ppm-5000ppm LPG and propane 300ppm-5000ppm butane |
| α (3000/1000) isobutane | Concentration Slope rate | ≤0.6 | 5000ppm-20000ppm methane 300ppm-5000ppm H ₂ 100ppm-2000ppm Alcohol |
| Standard Detecting Condition | Temp: 20℃ ± 2℃ Humidity: 65% ± 5% | Vc: 5V ± 0.1 Vh: 5V ± 0.1 | |
| Preheat time | Over 24 hour | | |

D. Structure and configuration, basic measuring circuit



Structure and configuration of MQ-2 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

TEL: 86-371-67169070 67169080 FAX: 86-371-67169090

E-mail: sales@hwsensor.com

crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-2 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

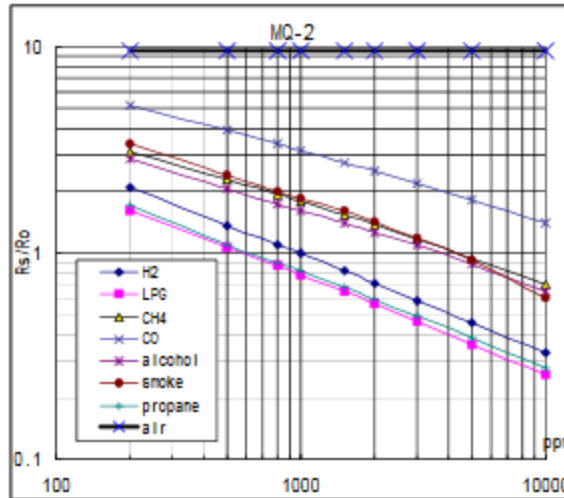


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-2

Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-2 for several gases. in their: Temp: 20℃, Humidity: 65%, O₂ concentration 21%, RL=5kΩ
 Ro: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in the clean air.
 Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

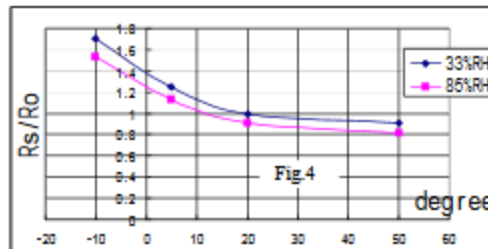


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-2 on temperature and humidity. Ro: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in air at 33%RH and 20 degree.
 Rs: sensor resistance at 1000ppm of H₂ at different temperatures and humidities.

SENSIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-2 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 liquified petroleum gas<LPG>,or 1000ppm iso-butane<i-C₄H₁₀>concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 KΩ (5KΩ to 47 KΩ).

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

Anexo III. Hoja de datos MG 811

HANWEI ELECTRONICS CO., LTD

MG-811

http://www.hwsensor.com

MG811 CO2 Sensor

Features

- Good sensitivity and selectivity to CO₂
- Low humidity and temperature dependency
- Long stability and reproducibility

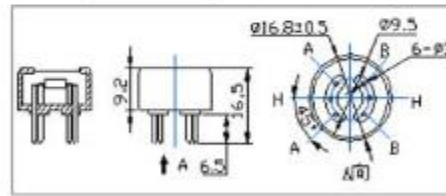
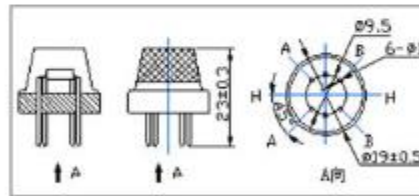
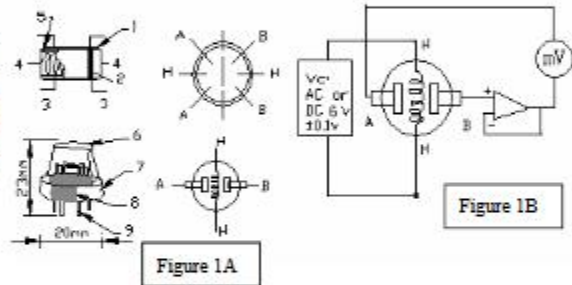
Application

- Air Quality Control
- Ferment Process Control
- Room Temperature CO₂ concentration Detection



Structure and Testing Circuit

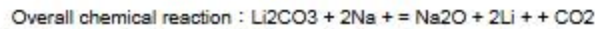
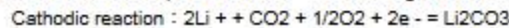
Sensor Structure and Testing Circuit as Figure. It composed by solid electrolyte layer (1), Gold electrodes (2), Platinum Lead (3), Heater (4), Porcelain Tube (5), 100m double-layer stainless net (6), Nickel and copper plated ring (7), Bakelite (8), Nickel and copper plated pin (9).



Working Principle

Sensor adopt solid electrolyte cell Principle. It is composed by the following solid cells :
Air, Au|NASICON|| carbonate|Au, air, CO₂

When the sensor exposed to CO₂, the following electrodes reaction occurs :



The Electromotive force (EMF) result from the above electrode reaction, accord with according to Nernst's

equation :

$$\text{EMF} = E_c - (R \times T) / (2F) \ln (P(\text{CO}_2))$$

P(CO₂)—CO₂— partial Pressure E_c—Constant Volume R—Gas Constant volume

T— Absolute Temperature (K) F—Faraday constant

From Figure 1B, Sensor Heating voltage supplied from other circuit, When its surface temperature is high enough, the sensor equals to a cell, its two sides would output voltage signal, and its result accord with Nernst's equation. In sensor testing, the impedance of amplifier should be within 100—1000GΩ, Its testing

Tel: 86 371 67169070 67169080

Fax: 86 371 67169090

E-mail: sensor@371.net

current should be control below 1pA.

Specifications :

| Symbol | Parameter Name | Technical | Remarks |
|-----------------|-----------------------|-------------|------------------|
| V _H | Heating Voltage | 6.0±0.1 V | AC or DC |
| R _H | Heating Resistor | 30.0±5%Ω | Room Temperature |
| I _H | Heating Current | @200mA | |
| P _H | Heating Power | @1200mW | |
| T _{ao} | Operating Temperature | -20...+50°C | |
| T _{as} | Storage Temperature | -20...+70°C | |
| EM F | Output | 30—50mV | 350—10000ppm CO2 |

Sensitivity :

Figure 2 Shows gas sensor sensitivity curve. :

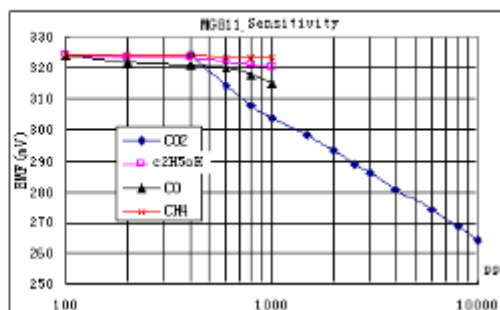
Conditions:

Tem : 28 .

RH : 65%.

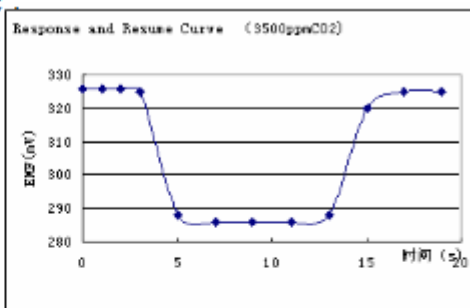
Oxygen : 21%

EMF: sensor EMF under different gas and concentration.

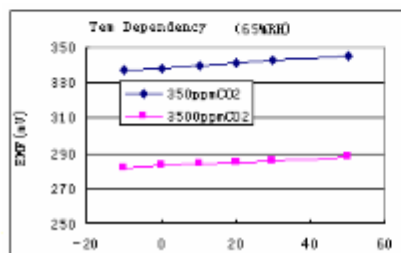


Response and Resume Characteristic :

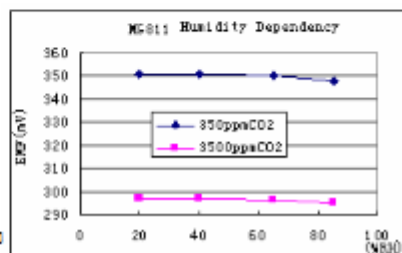
Figure 3 shows Solid electrolyte sensor response and resume characteristics.



Temperature and Humidity Dependency :



67169090



et

Anexo IV. Hoja de datos Probeta medidora de pH

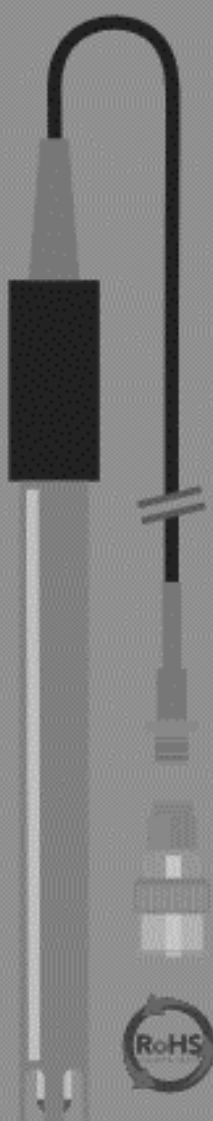
AtlasScientific
Environmental Robotics
V 4.0
Revised 12/11


Gen 2

Lab Grade pH Probe

Double junction silver / silver chloride
with EXR Glass

| | |
|-----------------------------|------------------------------|
| Reads | pH |
| Range | 0 – 14 |
| Resolution | +/- 0.001 |
| Accuracy | +/- 0.002 |
| Response time | 95% in 1s |
| Temperature range °C | -5 – 99 °C |
| Max pressure | 100 PSI |
| Max depth | 60m (197 ft) |
| Connector | Female SMA / Male BNC |
| Cable length | 1 meter |
| Internal temperature sensor | No |
| Time before recalibration | ~1 Year |
| Life expectancy | ~2.5 Years + |





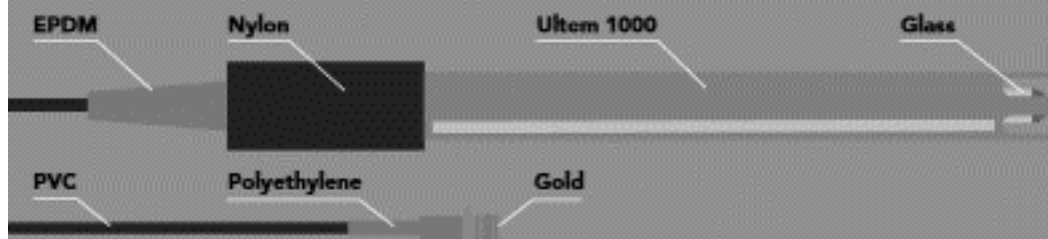
Specifications

| | |
|---------------------|----------------------------|
| Reference electrode | Silver / silver chloride |
| Double junction | Yes |
| Max depth | 60m (197 ft) |
| Cable length | 1 meter |
| Weight | 49 grams |
| Speed of response | 95% in 1 second |
| Isopotential point | pH 7.00 (0 mV) |
| Dimensions | 12mm x 150.6mm (0.5" x 6") |
| SMA connector | Female |
| Sterilization | Chemical only |
| Food Safe | Yes |
| Included with probe | SMA to BNC adapter |



DO NOT FREEZE

Materials



This pH probe can be *fully submerged* in fresh or salt water, up to the SMA connector *indefinitely*.

Typical applications

- Standard lab use
- Field use
- Soil
- High pH solutions (up to 14 pH)
- Samples containing heavy metals
- Hydroponics / aquaponics
- Beer, wine, alcohol, and food production

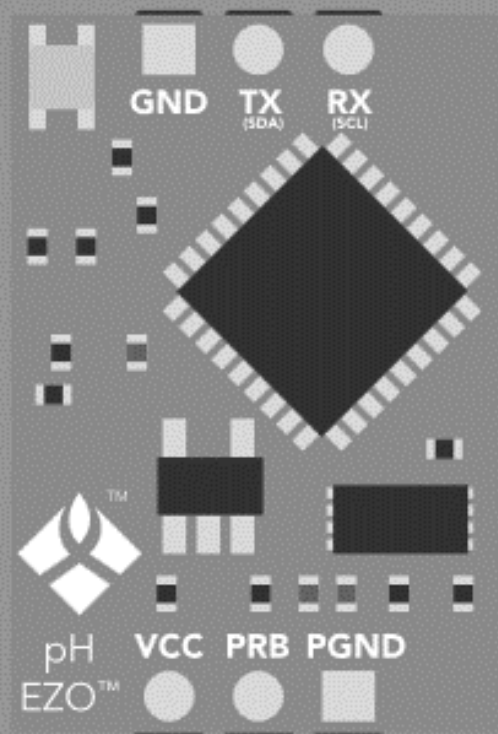
3 Copyright © Atlas Scientific LLC

AtlasScientific
Environmental Products

EZO-pH[™]

Embedded pH Circuit

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Reads | pH |
| Range | .001 – 14.000 |
| Resolution | .001 |
| Accuracy | +/- 0.002 |
| Response time | 1 reading per sec |
| Supported probes | Any type & brand |
| Calibration | 1, 2, 3 point |
| Temp compensation | Yes |
| Data protocol | UART & I ² C |
| Default I ² C address | 99 (0x63) |
| Operating voltage | 3.3V – 5V |
| Data format | ASCII |



PATENT PROTECTED



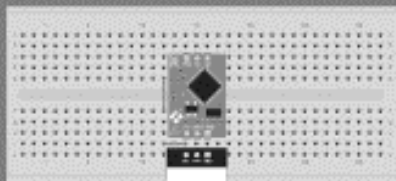
STOP

SOLDERING THIS DEVICE VOIDS YOUR WARRANTY.

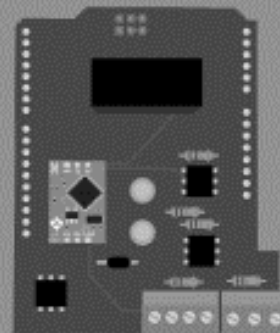
This is sensitive electronic equipment. Get this device working in a solderless breadboard first. Once this device has been soldered it is no longer covered by our warranty.

This device has been designed to be soldered and can be soldered at any time. Once that decision has been made, Atlas Scientific no longer assumes responsibility for the device's continued operation. The embedded systems engineer is now the responsible party.

Get this device working in a solderless breadboard first!



Do not embed this device without testing it in a solderless breadboard!



TELAIRE®

T9602 Humidity & Temperature Sensor for OEM Installation



Features

- Fully calibrated and temperature compensated
- Water resistant (IP 67 Certified)
- Digital or Pulse Density Modulated convertible to analogue
- Available in multiple flexible cable lengths
- Precision & accuracy ($\pm 2\%$ RH, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 14 bit resolution)
- Low current consumption
- Designed for reliability in harsh environments
- Flexible mounting options



Applications

- Energy saving HVAC Control – Air Conditioning, Refrigeration, Indoor Air Quality, Vent Fans, Home Appliances, Humi/Dehumidifiers
- Process Control & Instrumentation - Medical Instruments, Handheld Devices, Weather Stations, Food Processing, printers, RFID's

The T9602 offers the most advanced and cost effective humidity and temperature sensing solution for virtually any type of application.

Based on our own capacitive polymer sensor chip and ASIC integrated into an easy mount OEM package.

Each sensor is individually calibrated and tested. The T9602 is simple and ready to use without further calibration or temperature compensation.

The T9602 provides linearized output signals in one of two interfaces to meet customer requirements.

- I²C interface
- PDM output convertible to an analogue signal
- Refer to Application guide section for more detailed interfacing information

Amphenol Advanced Sensors

Assembly Accuracy Specifications

Relative Humidity (RH%)

| | |
|----------------------------|--|
| Resolution | 14 bit (0.01% RH) |
| Accuracy ¹ | ±2.0% RH (20~80% RH) ±3.5% RH (0% to 20%) and (80% to 100%) (Figure 1) |
| Repeatability | ±0.2% RH |
| Hysteresis | ±2.0% RH |
| Linearity | <2.0% RH |
| Response Time ² | ≤ 29 sec (T 63%) |
| Temp Coefficient | 0.13% RH/°C (at 10~60°C, 10~90% RH) |
| Operating | 0 ~ 96% RH |
| Long Term Drift | <0.5% RH/year (Normal conditions) |

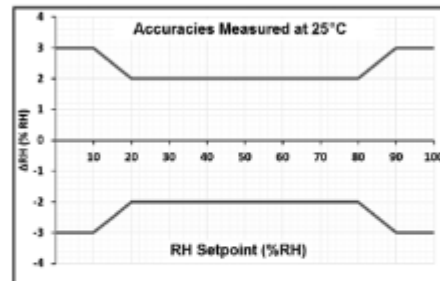
1. Accuracies measured at 25°C, nominal voltage.
2. 30% RH step response, measured at 25°C in a 1 m/sec air flow.

Temperature (°C)

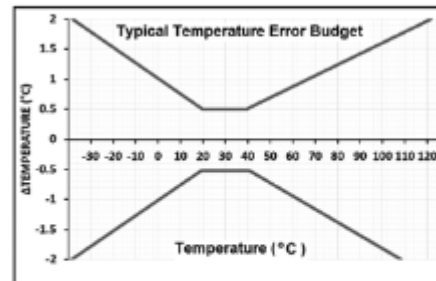
| | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Resolution | 14 bit (0.01°C) |
| Accuracy ¹ | ±0.5°C |
| Repeatability | ±0.1°C |
| Response Time ² | ≤116 sec (T 63) |
| Operating Range ³ | -20°C to 70°C |
| Long Term Drift | <0.05°C/year (Normal conditions) |

1. Accuracies measured at 25°C, nominal voltage.
2. 25°C step response in a 1 m/sec air flow.
3. Minimum design range, documented testing 0°C to 50°C.

Typical %RH Accuracy



Typical Temperature Accuracy



Application Guide

Users can download Application Guide AAG-916-127 at the below link. The user will find the firmware requirements needed to interface to the digital sensors in the update mode, and the processes necessary to convert the Pulse Density Modulated (PDM) outputs to analogue outputs.

Hardware and Environmental Specifications

Method

Capacitive polymer RH Sensor, PTA (Proportional to Absolute) Integrated temperature sensor.

Operating Conditions

- -20°C to 70°C
- 0% to 100% RH

Storage Conditions

- -40°C to 85°C

Output Modes

- Digital Models - I²C
- Analogue Models - PDM (Convertible to analogue)

Power Supply Requirements

- 3.3 VDC or 5.0 VDC ±5% (Nominal voltage is model dependent)

Current Consumption

- 750 µA (typical)

Cable

- Outer Diameter 4.20 ± 0.20 mm, 4 Core, shielded, double insulated and flexible
- Varying lengths dependent on the model. Refer to the ordering information

Connector

- Manufacturer - JST
- Sensor Connector Housing - Part Number EHR-4
- Sensor Connector Header - Part Numbers S4B-EH-A or S4B-EH

Mounting Options

- Grommet or cable P Clamp
- P Clamp - 9.53 mm Hellermann Tyton (MPN T3D03750M4) or equivalent
- Grommet - 11 mm Advanced Antivibration Components (MPN V12R30M16004616) or equivalent.

Approvals and Qualifications

- RoHS / REACH Compliant
- IP67 Certified
- Halogen Free Design
- Cable UL VW-1 Certified

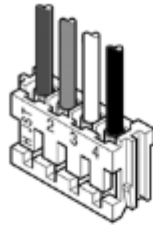
Warranty Terms

- 12 months

Sensor Pin Design

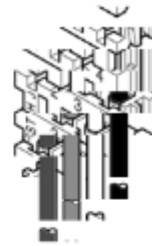
Digital

1. V+
2. Ground
3. SDA
4. SCL

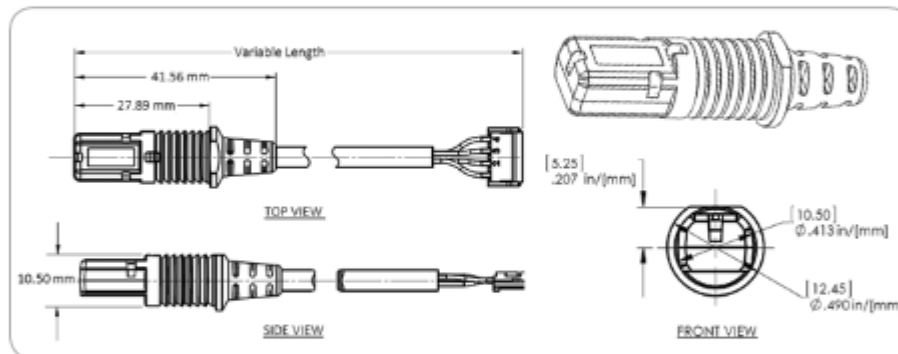


Analogue

1. V+
2. Ground
3. PDM RH
4. PDM Temp



Customer Interface Drawing



Ordering Information

| Part Number | Output | Operating Voltage | |
|-------------|--------------|-------------------|-------------------|
| T9602-3-D | I2C Digital | 3V | 1.8m cable length |
| T9602-6-D | I2C Digital | 5V | 1.8m cable length |
| T9602-3-D-1 | I2C Digital | 3V | 1m cable length |
| T9602-6-D-1 | I2C Digital | 5V | 1m cable length |
| T9602-3-A | PDM Analogue | 3V | 1.8m cable length |
| T9602-6-A | PDM Analogue | 5V | 1.8m cable length |
| T9602-3-A-1 | PDM Analogue | 3V | 1m cable length |
| T9602-6-A-1 | PDM Analogue | 5V | 1m cable length |

