



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Mecatrónica

CONTROL DE TEMPERATURA Y pH APLICADO EN BIODIGESTORES MODULARES DE ESTRUCTURA FLEXIBLE CON RECICLADO DE LODOS A PEQUEÑA ESCALA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Mecatrónica

Presenta:

Gustavo Aguilar Álvarez

Dirigido por:

Luis Morales Velázquez

SINODALES

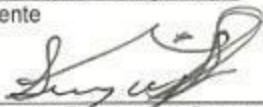
Dr. Luis Morales Velázquez
Presidente

Dr. Roque A. Osornio Ríos
Secretario

M. en C. Manuel García Quijada
Vocal

Dr. Miguel Trejo Hernández
Suplente

Dr. Jesús de Santiago Pérez
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo de 2013
México

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y la construcción de un digester anaerobio constituido por cuatro módulos dispuestos de manera vertical elaborados con geomembrana hdpe (*High Density Polyethylene*) de 1.5mm de espesor que se caracteriza por ser un material flexible. Cada módulo posee capacidad máxima para albergar 400 litros de materia orgánica. Los módulos colocados verticalmente están montados sobre una estructura metálica soportada por seis ruedas, lo cual reduce el espacio que ocupa el biodigestor y favorece la evacuación de sedimentos y al estar montado sobre una estructura con ruedas puede ser agitado y transportado relativamente con mayor facilidad respecto a biodigestores comerciales. La disposición vertical de los cuatro módulos permite el estudio independiente de los tres estados de la digestión anaerobia; cada estado es estudiado en un módulo, además de poder sanear el efluente en el último módulo. La relativa facilidad del mezclado del contenido digestivo asegura una temperatura uniforme dentro de los módulos del biodigestor. Cada módulo posee un controlador difuso de temperatura que satisface las necesidades de control de un sistema no lineal y variante en el tiempo expuesto a cambios de temperatura no previstos debido a las condiciones climáticas y a las diferentes cantidades y calores específicos de las sustancias con que se alimenta al biodigestor. El estudio de los estados de la biodigestión de manera independiente brinda la posibilidad de establecer las condiciones óptimas de operación para cada estado. En esta investigación se establecen las condiciones de temperatura óptimas para una mezcla de residuos de alimentos en proporciones iguales a excretas bovinas utilizadas para inocular el contenido digestivo del digester anaerobio.

(Palabras clave: digester anaerobio, vertical, temperatura uniforme, estados de la biodigestión, sanear, controlador difuso)

SUMMARY

This work presents the design and construction of an anaerobic digester constituted by four modules disposed vertically which are made of geomembrana hdpe (*High Density Polyethylene*) with thickness of 1.5mm, this material is characterized because it is a flexible material. Each module has capability to keep 400 liter of organic waste. The modules vertically disposed are mounted in a metallic structure supported by six wheels, which results in reducing the space occupied by the digester and make easy the evacuation of sediments and by being mounted on a metallic structure supported by wheels it could be mixed and transported easily in relation with commercial biodigesters. The vertical disposition of the four modules allows the independent study of the three stages of the anaerobic digestion; each stage is studied en one module, furthermore the effluent could be sanitized in the last module. The relative easiness to mix the digestive content guarantees a homogenized temperature inside the modules of the biodigester. Each module has an fuzzy controller for temperature that satisfies the needs of control of a non linear and variant in time system exposed to no prevised temperature changes due to climatic conditions and to the different quantities and specific heats of the substances with the biodigester is fed. The independent study of the stages of the biodigestion offers the possibility of establish the optimum conditions for the operation in each stage. In this work are established the optimum condition of temperature for a mixture of residues of foodstuff mixed in equal quantities with bovine manure used to inoculate the digestive content of the anaerobic digester.

(Key words: anaerobic digester, disposed vertically, homogenized temperature, stages of the biodigestion, sanitized, fuzzy control)

AGRADECIMIENTOS

Extiendo mi agradecimiento por el apoyo otorgado para la realización de esta tesis al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por las becas otorgadas y el financiamiento para desarrollar esta investigación.

INDICE

	Página
Resumen	ii
Summary	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de cuadros	vii
Índices de figuras	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Justificación	6
1.3. Objetivo	9
1.4. Descripción del problema	10
II. REVISIÓN DE LITERATURA	13
2.1 Terminología y conceptos básicos de la digestión anaerobia	13
2.2 Estados de la digestión anaerobia	15
2.3 Efectos de la temperatura en el proceso de digestión	19
2.4 Efectos del pH en el proceso de digestión	20
2.5 Desperdicios propicios para la digestión anaerobia	21
2.6 Mezclado	22
2.7 Saneamiento	24
2.8 Tipos de biodigestores	26
2.9 Tipos de invernaderos	31
2.10 Control difuso	32

III.	METODOLOGÍA	38
3.1	Diseño del biodigestor	38
3.1.1	Estados de la biodigestión	39
3.1.2	Saneamiento	40
3.1.3	Mezclado	40
3.1.4	Otras ventajas del diseño	41
3.2	Metodología general	42
3.2.1	Diseño mecánico	42
3.2.2	Diseño electromecánico	46
3.2.3	Diseño electrónico	48
3.3	Elementos de instrumentación	49
3.3.1	Temperatura	49
3.3.2	Presión	50
3.3.3	Potencial de Hidrógeno	50
3.3.4	Actuadores	51
3.3.5	Acondicionamiento de señales	52
3.4	Control	53
3.4.1	Control difuso	54
3.5	Comunicación USB	56
IV.	RESULTADOS	58
V.	CONCLUSIONES	64
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	65
	APENDICE A	68
	APENDICE B	74
	APENDICE C	79

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Resumen de las características más significativas de los sustratos agroindustriales más habituales	5
2.1	Desperdicios industriales propicios para la digestión anaerobia	22
2.2	Desperdicios químicos propicios para la digestión anaerobia	22
2.3	Ventajas del mezclado de la biomasa	23
2.4	Requisitos de saneamiento para sustancias de riesgo en plantas de biogás en Austria	25
2.5	Saneamiento equivalente a una hora a 70 °C como es requerido en la notificación Danish No. 823 (Ministerio de energía y protección del medio ambiente)	25

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	La cadena alimenticia anaeróbica consiste de varios grupos de anaerobios facultativos y anaerobios que degradan y transforman compuestos orgánicos complejos en compuestos orgánicos simples	18
2.2	Esquema de digestor de mezcla completa	27
2.3	Esquema de digestor de flujo-pistón	28
2.4	Esquema de digestor reciclado de lodos	28
2.5	Arquitectura de un controlador difuso	33
2.6	Bloque de Fuzificación	34
2.7	Bloque de Máquina de inferencias	36
3.1	Invernadero como aislante térmico para biodigestores	38
3.2	Típica zanja cavada para un biodigestor tipo salchicha	41
3.3	Diseño biodigestores tipo salchicha y ferrocemento	42
3.4	Metodología propuesta	43
3.5	Diseño de los módulos fabricados con PEAD	44
3.6	Conexión entre módulos	45
3.7	Diseño de la estructura metálica (cotas en mm.)	46
3.8	Mecanismo electromecánico para el mezclado	47
3.9	Circuito puente H I298 para mezclado	47
3.10	Circuito de conexión pic18f4550 con ds1307	48
3.11	Sensor de temperatura ds18b20	49
3.12	Sensor de presión MPX4250GP	50
3.13	Electrodo de pH C2451C-12 ^a -A10BC	51
3.14	Diagrama del control de temperatura	51

3.15	Circuito acondicionador de la señal analógica para el electrodo de pH	52
3.16	Circuito de acoplamiento sensor analógico de presión MPX4250GP	53
3.17	Variables y valores lingüísticos del controlador difuso	54
3.18	Circuito de conexión del sensor digital de temperatura bs18b20	55
3.19	Diagrama de conexiones para el control de temperatura	55
3.20	Diagrama de conexiones protocolo USB	56
3.21	Interfaz gráfica en <i>Visual C#Sharp</i>	57
4.1	Biodigestor modular	58
4.2	Estructura metálica montada sobre llantas	59
4.3	Válvula para desazolve	60
4.4	Gráfica del comportamiento del sistema sin control	60
4.5	Gráfica del comportamiento del sistema con control general a 35°C	61
4.6	Gráfica del comportamiento de la presión con la hidrólisis a 37°C	62
4.7	Gráfica del comportamiento de la presión con la acetogénesis a 30°C	62
4.8	Gráfica del comportamiento de la presión con la hidrólisis a 37°C y la acetogénesis a 30°C	63

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una compleja situación en términos energéticos, cuya causa se debe al uso indiscriminado y excedido de las fuentes de energía no renovables. Es precisamente esta realidad la que nos impulsa al estudio de las energías alternativas ya que se hace necesario en un mundo responsable y consiente, apoyar un desarrollo tecnológico alternativo, sustentable y futurista, Cabello (2006). La utilización de biodigestores es una solución rentable y ecológica para dejar atrás el uso del gas L.P. como combustible de uso diario, producir fertilizante ecológico y reducir la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. El proceso de digestión anaeróbica consiste en una serie de eventos bacterianos que (en ausencia de oxígeno) convierten los compuestos orgánicos en metano, dióxido de carbono y células bacterianas nuevas. Estos eventos son comúnmente considerados como un proceso de 3 estados. Hidrólisis (producción de ácidos volátiles y alcoholes), acetogénesis (conversión de los ácidos volátiles y alcoholes a substratos como el ácido acético o acetato (CH_3COOH) y gas de hidrógeno) y metanogénesis (producción de metano y dióxido de carbono). En el proceso de digestión anaeróbica la temperatura influye no solo en las bacterias productoras de metano sino también en las bacterias productoras de ácidos. Por lo tanto, las fluctuaciones en la temperatura pueden ser ventajosas para ciertos grupos de bacterias y desventajosas para otros. Por ejemplo, un incremento de temperatura de 10°C puede parar la producción de metano o la actividad de las bacterias productoras de metano en un plazo de 12 horas, mientras la producción de ácidos volátiles aumenta. Cambios en la actividad de diferentes grupos de bacterias productoras de ácidos volátiles resulta en cambios en las cantidades relativas de ácidos orgánicos y alcoholes producidos durante la fermentación. Cambios en las cantidades de ácidos orgánicos y alcoholes que son usados directamente e indirectamente como substratos por las bacterias productoras de metano afecta el desempeño digestivo global, Gerardi (2003).

1.1. Antecedentes

Como se menciona anteriormente, cada estado de la biodigestión es independiente y por lo tanto requiere de condiciones de operación independientes. Debido a esto, cada uno de los tres estados que conforman la digestión anaerobia, deben ser estudiados de manera independiente para determinar las condiciones de temperatura óptimas propias para cada estado, cabe mencionar que en ninguna de las investigaciones presentadas existe un estudio independiente de cada estado. Se describen los antecedentes encontrados en materia de biodigestores con y sin automatización, y por otra parte, antecedentes enfocados al control difuso aplicado a temperatura, que es eficaz para sistemas no lineales y variantes en el tiempo como es el caso de un sistema expuesto a cambios climáticos y mixturas de diferentes sustancias en diferentes cantidades como un biodigestor.

Buenrostro et al., (2000) publicaron por parte de la Universidad Autónoma de México (UNAM) para la Revista Internacional de Contaminación Ambiental, una investigación para determinar la eficiencia de la digestión anaerobia al tratar los residuos orgánicos generados en los mercados municipales y tianguis; efectuaron determinaciones físicas y químicas cuyos resultados sugieren que este tipo de fermentación es eficiente para tratar estos residuos, por su alto contenido de humedad, el carácter ácido y la consistencia fibrosa del material. Evaluaron el proceso a nivel laboratorio en un digestor anaerobio, fabricado con lámina galvanizada y recubierto con antioxidante en el interior de 70 cm de altura y 40 cm de diámetro. Las muestras de residuos orgánicos se obtuvieron de los 6 mercados establecidos en la ciudad de Morelia. Los mercados Revolución, Nicolás Bravo, Vasco de Quiroga, Independencia, Benito Juárez y el mercado de abastos. El reactor se cargó inicialmente con 40 kg de materia orgánica que incluyó residuos de frutas, vegetales, legumbres, madera, plumas, vísceras, hueso, excretas,

cuero, etc. Durante la investigación se controló la temperatura a 35°C dentro del digestor y se mantuvo en condiciones anaerobias. En esta investigación se determinó un tiempo de retención óptimo de 7 días para la digestión de la materia orgánica proveniente de mercados municipales y tianguis.

Magaña et al., (2006) aplicaron en la Universidad de Guanajuato (UGTO) el proceso de digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de estiércol de cabras, implementaron dos tipos de experimentos: el primero se efectuó mediante dos lotes utilizando matraces *kitazato* de cristal con capacidad de 1 litro como receptáculo de biomasa e introdujeron los matraces en una tina llena con agua calentada por una resistencia eléctrica para mantener la temperatura entre 35 y 36°C con el objeto de determinar la producción diaria de biogás. El segundo experimento con un biodigestor a escala laboratorio pesaron las excretas de cabra para luego homogeneizarlas con agua y luego cargar el biodigestor, esto para cuantificar la cantidad de metano en el biogás.

En 2010, Bermúdez et al., implementaron en la Universidad Industrial de Santander, un biodigestor a nivel laboratorio (elaborado con un tanque usado para almacenar bebidas carbonatadas de acero inoxidable con capacidad para 19 litros) usado en la producción de gas metano basado en temperatura, presión y nivel de pH de la composta (excretas de cerdo). Monitorearon la presión dentro del biodigestor y el pH de la composta, controlaron la temperatura en tres diferentes referencias, 34, 37.85 y 40°C usando un serpentín con agua calentada por una resistencia de 1500W en su interior ciclada por una bomba de 40W. De las tres referencias fijas observaron que, a mayor temperatura se obtuvo una mayor presión dentro del tanque en menor tiempo respecto a las otras temperaturas. Concluyeron que el efecto de la temperatura sobre el pH es mínimo cuando la bacteria usada en el proceso es mesofílica además de observar que en las tres

pruebas el rango de pH se mantuvo entre 5.5 y 6.0 También afirmaron que la bacteria mesofílica (37°C) no se ve afectada por cambios de temperatura $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Huerta (2010), construyó y operó un reactor anaerobio para desechos de restaurantes procedentes de ciudad universitaria en la Universidad Nacional Autónoma de México, esto a escala laboratorio, utilizando una botella de politereftalato de etileno (PET) con capacidad de 3L (asilada térmicamente con una bolsa hecha de tela polar), unida con silicón a una manguera de hule para canalizar el gas producido hacia un lado del reservorio (botella de PET con capacidad de 2.5L). En el reactor no se aplicó ningún tipo de control de temperatura y se mostró una temperatura promedio de 24°C , se registró las mediciones del pH y el dato interesante fue el re-circulado de lodos y la metodología para el arranque del proceso digestivo que utilizó estiércol de vaca para inocular (contagiar de bacterias) la biomasa.

Hernández (2012) construyó en LA Universidad Nacional Autónoma de México una planta piloto generadora de biogás con capacidad de 10 litros, construida con politereftalato de etileno (PET) y aislada con unicel, alimentada con desechos de frutas y verduras, sin control de ningún tipo, pero con medición de pH de la biomasa, presión del reactor y del reservorio, temperatura del reactor, nivel de ácido y nivel de alcalinidad.

Por otra parte, para estimar la cantidad de producción de biogás, existen algunos modelos matemáticos que requieren se realicen pruebas de extracción de biogás y en otros se requiere conocer la composición de los residuos y los parámetros de funcionamiento de los rellenos sanitarios (RESA) o sitio de disposición final. El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 desarrollado en la Universidad Autónoma de Baja California brinda la posibilidad de estimarla con

conocer algunos de los parámetros de funcionamiento del relleno, sin necesidad de pruebas de extracción de biogás, ni conocimiento de la composición de los residuos. Sin embargo, es necesario aclarar que la predicción de la generación con información *in situ* disminuye la incertidumbre a la toma de decisiones, Aguilar et al. (2011).

Para conocer que residuos producen mayor cantidad de biogás, se hace referencia al cuadro 1.1 publicado en el artículo El sector del biogás agroindustrial en España, donde se afirma que uno de los residuos que produce más metros cúbicos de biogás por cada kilogramo de sólidos volátiles (S.V. porcentaje de sólidos totales (ST porcentaje de sólidos que forman la materia fresca) que se volatilizan mediante calcinación a 550°C) son los restos de alimentos con una producción de 0.5 a 0.6 m³/Kg de S.V. y también posee un tiempo de retención más corto que la mayoría de los residuos (10-20 días). Sumado a esto están los residuos de frutas que también poseen un tiempo de retención corto (8-20 días) y producen de 0.12 a 0.5 m³/Kg de S.V. (Mesa de biogás, 2010).

Residuo	ST(%)	SV(% ST)	C:N	Producción de biogás (m ³ /Kg de SV)	Tiempo de retención (días)	CH ₄ (%)	Sustancias NO deseables	Sustancias Inhibidoras	Problemas frecuentes
Purín de cerdo	3 a 8	70 a 80	3 a 10	0.25 a 0.50	70 a 80	70 a 80	Virutas de madera, arena, cerdas, cuerdas	Antibióticos, desinfectantes	Espumas, sedimentos
Estiércol	5 a 12	75 a 85	6 a 20	0.20 a 0.30	55 a 75	55 a 75	Cerdas, tierra, pajaj, madera	Antibióticos, desinfectantes	Espumas
Gallinaza	10 a 30	7 a 80	3 a 10	0.35 a 0.60	60 a 80	60 a 80	Piedras, arena, plumas	Antibióticos, desinfectantes	Inhibición por NH ₄ y espumas
Residuos de frutas	15 a 20	75	35	0.25 a 0.50	8 a 20	ND	Partes poco biodegradables	AGV, Pesticidas	Acidificación
Restos de alimentos	10	80	8 a 12	0.50 a 0.60	10 a 20	70 a 80	Huesos, metales, plásticos	AGV, Desinfectantes	Acidificación, sedimentos mecánicos
Vinazas	1 a 5	80 a 95	4 a 10	0.35 a 0.55	3 a 10	55 a 75	Partes poco biodegradables	AGV	Acidificación
Paja	70	90	90	0.35 a 0.45	10 a 50	ND	Arena		Espumas, biodegradabilidad

Cuadro 1.1. Resumen de las características más significativas de los sustratos agroindustriales más habituales. Fuente: Adaptación de Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. (1998). Feedstocks for Anaerobic Digestion.

Ahora bien, se aborda el tema del control difuso aplicado al control de temperatura donde se requiere de gran exactitud y precisión. Ya que el sistema de biodigestión propuesto aunque cubierto con plástico para invernadero está expuesto a cambios climáticos y sujeto a mezclas de diferentes sustancias en diferentes cantidades lo convierte en un sistema no lineal y variante en el tiempo, así pues, tratar de obtener el modelo matemático de un sistema como este resulta tedioso e innecesario, por lo tanto las técnicas de control clásico resultan menos precisas e inapropiadas para sistemas donde se requiere de un control preciso, como lo muestra Ferreyra (SOMI XV) en su trabajo en el cual presentó la comparación del desempeño entre un controlador P difuso y un controlador convencional PID aplicado al control de temperatura de un bloque de cobre con dimensiones 13.59cm de largo, 3.81 cm de ancho y 2.34 cm de alto, calentado por convección del calor disipado por transistores de potencia. En el trabajo demuestra que el controlador difuso excede el desempeño de un controlador PID cuando se requiere controlar sistemas donde es fundamental la precisión.

Por otra parte, Avilés (XXII JIEE) diseñó un circuito para el monitoreo y control difuso de temperatura de una incubadora, sistema donde se requiere de una gran precisión al tratarse de una aplicación médica, utilizando un microcontrolador Atmel AT59C52, un sensor de temperatura digital STH11 y comunicación con la PC mediante puerto serial. En su trabajo comprobó que existe una gran ventaja en cuanto tiempo de respuesta y error en estado transitorio y estacionario, además de ser un control robusto, es decir, poco susceptible a perturbaciones.

1.2. Justificación

Según la página oficial del Instituto Nacional de Ecología (INE) la política ambiental de México intenta frenar las tendencias históricas de deterioro del medio ambiente y de los recursos naturales, contribuir a lograr un crecimiento económico significativo mediante procesos productivos más limpios, y desarrollar servicios que mejoren, en alguna medida, las condiciones de vida de los cerca de 26 millones de habitantes que padecen extrema pobreza, sobre todo en las zonas rurales. Esta política, consecuente con la búsqueda de un patrón de desarrollo sustentable, presenta dos facetas relevantes para las acciones que emprende el país para enfrentar el cambio climático global.

La economía de México necesita crecer a mayor ritmo que su población, cuyo dinamismo se rige ahora por un proceso de transición demográfica. Sólo podrá crecer la economía nacional si lo hace también la producción de energía y, por consiguiente, las emisiones de gases de efecto de invernadero, consecuencia que debe ser mermada por medio de la utilización de energías renovables.

Por otra parte, muchas de las acciones de mitigación del cambio climático pueden generar efectos benéficos para los objetivos de política ambiental antes reseñados, al contener las tendencias de deterioro en el sector forestal, fomentar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, en particular de los bosques y selvas, contribuir a combatir la pobreza rural extrema, mejorar la eficiencia energética y reducir la contaminación ambiental.

Adyacente a la compleja situación debido a la sobreexplotación de los recursos naturales no renovables, la contaminación ambiental y la eficiencia energética en México, se multiplica la creciente necesidad del desarrollo, utilización y optimización de las energías alternativas y al mismo tiempo la

necesidad de que la instrumentación y el control influyan en este proceso de cambio.

La utilización de biodigestores es una solución rentable y ecológica para dejar atrás el gas L.P. como combustible de uso diario, producir fertilizante ecológico y reducir la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera.

En el contexto de producción de energía, la generación de biogás es una solución autosustentable, limpia y barata para frenar la emisión de gases de efecto invernadero y dejar atrás el uso del gas L.P. como combustible de uso diario. Hasta el momento, sólo se cuenta con pocas investigaciones en el ramo de la automatización de biodigestores, algunos de ellas utilizan control en lazo cerrado de temperatura para mejorar el proceso de digestión anaerobia, mediciones de presión y pH, además de tratarse de biodigestores a nivel laboratorio.

En ninguno de los antecedentes presentados existe un estudio independiente de cada estado del proceso de biodigestión anaerobia, además, todos los trabajos presentados están enfocados a biodigestores a nivel laboratorio lo que resulta un tanto alejado de la realidad del proceso. En estos antecedentes tampoco hay registro de que exista el estudio del reciclado de lodos para la facilitación de la población microbiana.

Por las menciones anteriores nace la inquietud y necesidad de desarrollar e implementar un control mexicano en lazo cerrado para temperatura aplicado a biodigestores aislados en invernaderos a pequeña escala para la producción de biogás a partir de desechos orgánicos procedentes de residuos alimenticios

provenientes de todo tipo de establecimientos de este ramo como lo son restaurantes, mercados, tianguis, casa-habitación, cafeterías, etc.

1.3. Objetivo

Desarrollar un sistema de control de temperatura y pH dentro de un invernadero tipo parral para un biodigestor a pequeña escala utilizado para la descomposición anaerobia de desechos orgánicos principalmente excretos bovinos y en menor proporción residuos de cocina.

Los objetivos particulares son:

- Construir un invernadero tipo parral modificado de las dimensiones más aproximadas a las dimensiones del cuerpo del biodigestor a pequeña escala, con estructura metálica y cubierta de polietileno para brindar aislamiento térmico al proceso de digestión anaerobia y facilitar el control de la temperatura además de proteger la estructura flexible contra animales y objetos punzocortantes.
- Diseñar e implementar un control difuso en un microcontrolador para el control de temperatura dentro de los módulos del biodigestor utilizando un sensor digital DS18B20 encapsulado en acero inoxidable para medir temperaturas dentro de líquidos con rango de medición de -35 a 105°C y precisión de $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ y lograr con ello exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- Estudiar los cambios de operación para la variable temperatura en los diferentes módulos según la etapa de digestión en la que se encuentre la biomasa.

- Diseñar e implementar un controlador ON/OFF para el control del pH de la mezcla (sólo en la primera etapa de la biodigestión), para neutralizar la acidez de desechos orgánicos mediante la adición de sustancias básicas, antes de ser introducida al proceso de biodigestión, la técnica ON/OFF es suficiente para controlar la variable con una resolución de 1 pH. Para la medición del potencial de hidrógeno se utilizará el sensor de pH modelo C2451C-12A-A10BC con rango de medición de 0-12pH en el intervalo de temperatura de -5° a 80°C.
- Desarrollar e implementar un medidor de presión con rango de 0 a 36 psi para medir la presión dentro del reservorio donde se almacenará el biogás generado, se usa un sensor de presión con número de parte “MPX4250GP” y rango de medición de 0 a 36.3psi.

1.4. Descripción del problema

Gran parte del problema yace en el consumo de combustibles fósiles, en particular el gas licuado de petróleo que libera hacia la atmósfera una gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂) (acusado de ser la causa principal del calentamiento global) y además es un recurso natural finito.

Sumado a lo anterior, los residuos sólidos pueden tener varios efectos ambientales negativos. Cuando son vertidos en cuerpos de agua superficiales alteran la estructura física del hábitat e impactan negativamente la calidad del agua; el agua subterránea de los acuíferos puede contaminarse por la infiltración de lixiviados derivados de los residuos que contienen materiales tóxicos depositados. Los residuos también afectan la calidad del aire, ya que están asociados frecuentemente a la generación de malos olores, así como a la

producción de humos, gases y partículas en suspensión, por la quema intencional o espontánea de la basura.

Otro problema importante es la presencia de ratas, cucarachas e insectos entre otros animales asociados a los tiraderos puede provocar la transmisión de enfermedades como el cólera, disentería, leptospirosis y amebiasis, entre otras.

México ocupa uno de los primeros lugares en la generación de residuos sólidos de América Latina. La producción per cápita varía de acuerdo con la zona geográfica y con el grado de desarrollo. La generación de residuos sólidos urbanos continúa aumentando. Mientras que en 2001 se producían 31.48 millones de toneladas, en 2010 aumentó a 39.05, lo que implica un incremento de 840 mil toneladas por año.

En 2010, los residuos orgánicos, tales como los restos de comida, de jardines y otros materiales similares, representaron poco más del 52.4% del total de desechos urbanos. Mientras que otro tipo de residuos, entre los que se encuentran los residuos finos y los pañales desechables, redujeron su participación de 18.8% en 2001 a 12.1% en 2010. El papel y el cartón integran el 13.8% de los residuos; el vidrio representa el 5.8% y los metales el 3.4% (INEGI, 2011).

Aunque los residuos sólidos municipales (RSM) son tan sólo una parte de los residuos generados, su recolección, manejo y disposición consumen alrededor de la tercera parte de los recursos invertidos por el sector público para abatir y controlar la contaminación.

Aunque la implementación de biodigestores va en aumento, hasta ahora no existe alguno que controle y estudie de forma independiente la principal variable (temperatura) que rigen el proceso, lo que impide que se determinen las condiciones óptimas de operación para cada estado y se limite la cantidad y calidad de biogás producido.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El diseño, instrumentación y control de un biodigestor de este tipo requiere de conocimientos en los principios básicos del proceso de digestión anaerobia, la terminología y las principales características de los tres estados que rigen el proceso además de conocimientos ingenieriles en instrumentación y control, conocimientos que se abordan enseguida.

2.1 Terminología y conceptos básicos de la digestión anaerobia

En los siguientes cinco párrafos se presentan las definiciones necesarias para la comprensión de los conceptos de digestión anaerobia que son enunciados en los párrafos posteriores.

Sólidos totales (ST): porcentaje de sólidos que forman la materia fresca.

Sólidos Volátiles (SV): porcentaje de sólidos totales (ST) que se volatilizan mediante calcinación a 550°C. Representa la medida de la materia orgánica que se transforma en biogás mediante la digestión anaerobia mesófila (37°C) o termófila (55°C) de los compuestos orgánicos. La producción de biogás de un sustrato suele referirse a los sólidos volátiles, y una manera de expresar la biodegradabilidad es como porcentaje de sólidos volátiles eliminados.

Nutrientes: una adecuada proporción de nutrientes en las materias primas tiene un efecto fundamental sobre la producción de biogás, la formación de la

biomasa microbiana, la concentración de enzimas y coenzimas necesarias en el proceso y la creación de las denominadas sustancias buffer. Las sustancias buffer son aquellas que favorecen las condiciones del proceso, aportando capacidad tampón o reguladora a la mezcla, estabilizando el pH, Mesa de biogás (2010).

Tiempo de retención hidráulica (TRH): cociente entre el volumen del digestor y el caudal, o volumen de carga diaria. La unidad en la que se expresa es “día”. Indica el tiempo que el sustrato permanece por término medio en el digestor. Esta definición es válida para digestores continuos y semicontinuos, que funcionan en condiciones estacionarias.

Velocidad de carga orgánica (VCO): cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen útil de digestor y tiempo. La unidad en la que se expresa es “kg SV/m³ y día” o “DQO/m³ y día”. Valores bajos implican baja concentración en el *input* y/o elevado tiempo de retención, Pascual et al. (2011).

El contenido orgánico de fangos y desperdicios solubles pueden ser reducidos por actividad bacteriana controlada. Si la actividad bacteriana es anaerobia, la reducción en contenido orgánico es lograda a través de la digestión del fango. Si la actividad bacteriana es aerobia, la reducción en contenido orgánico es lograda a través de la estabilización del fango, Gerardi (2003). Para propósito de este trabajo se estudia únicamente la actividad bacteriana anaerobia.

Los objetivos de los digestores anaeróbicos son destruir biológicamente una porción significativa de sólidos volátiles en fangos y para minimizar la putrescibilidad de los fangos. Los principales productos de los digestores

anaeróbicos son biogás y sólidos de fango digerido inocuos. El biogás consiste mayormente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

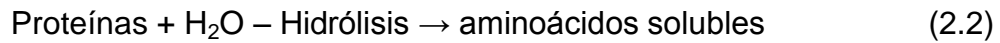
La digestión anaeróbica de lodos consiste de una serie de eventos bacterianos que convierten los compuestos orgánicos en metano, dióxido de carbono y células bacterianas nuevas. Estos eventos son comúnmente considerados como un proceso de 3 estados. Para entender a grandes rasgos cada proceso se desarrolla el siguiente subtema.

2.2 Estados de la digestión anaerobia

El primer estado del proceso consiste en la hidrólisis de sólidos. La hidrólisis de esos desperdicios resulta en la producción de compuestos orgánicos simples solubles (ácidos volátiles y alcoholes). El segundo estado del proceso, acetogénesis, consiste en la conversión de los ácidos volátiles y alcoholes a substratos como el ácido acético o acetato (CH_3COOH) y gas de hidrógeno que puede ser usado por las bacterias productoras de metano. El tercer y último estado del proceso, metanogénesis, consiste en la producción de metano y dióxido de carbono.

Hidrólisis es la solubilización de partículas de compuestos orgánicos como la celulosa (Ecuación 5.2.1) y compuestos orgánicos disueltos como las proteínas (Ecuación 5.2.2) en compuestos solubles simples que pueden ser absorbidos por las células bacterianas. Una vez absorbidos, estos compuestos experimentan degradación bacteriana que resulta en la producción de ácidos volátiles y alcoholes como el etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) y propionato ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$). Los ácidos volátiles son convertidos a acetato y gas hidrógeno. La producción de

metano ocurre de la degradación de acetato (Ecuación 5.2.3) y la reducción de dióxido de carbono a hidrógeno (Ecuación 5.2.4).



En la acetogénesis o estado productor de ácidos, compuestos solubles producidos a través de la hidrólisis son degradados por una gran diversidad de facultades anaerobias a través de muchos procesos fermentativos. La degradación de estos compuestos resulta en la producción de dióxido de carbono, hidrógeno, alcoholes, ácidos orgánicos, algunos compuestos nitrógeno-orgánicos y algunos compuestos sulfuro-orgánicos. El más importante de los ácidos es el acetato. El acetato es el principal ácido orgánico ácido volátil usado como substrato por las bacterias productoras de metano.

En el estado metanogénesis, el metano es formado en su mayoría de acetato y dióxido de carbono e hidrógeno. El metano también es formado por algunos otros compuestos aparte del acetato. Por consiguiente, todos los demás productos fermentativos deben ser convertidos a compuestos que pueden ser usados directamente o indirectamente por las bacterias productoras de metano. Los ácidos, alcoholes y compuestos nitrógeno-orgánicos que no son degradados por las bacterias se acumulan en el digestor en forma de nata.

En hábitats naturales que están desprovistos de iones de oxígeno molecular y iones de nitrato, los compuestos orgánicos complejos e insolubles son degradados por diferentes grupos de bacterias a través de una variedad de reacciones bioquímicas fermentativas o anaerobias. Estas reacciones resultan en la producción de compuestos orgánicos simples y solubles. Estos compuestos no se acumulan en hábitats naturales. A medida que un grupo de bacterias produce compuestos solubles ellos son rápidamente degradados como un sustrato por otro grupo de bacterias. Las bacterias forman una cadena, (una cadena alimenticia anaerobia) en la cual grandes compuestos complejos son degradados a compuestos más simples a medida que estos son pasados a lo largo de la cadena alimenticia. En la figura 2.1 se muestra dicha cadena alimenticia.

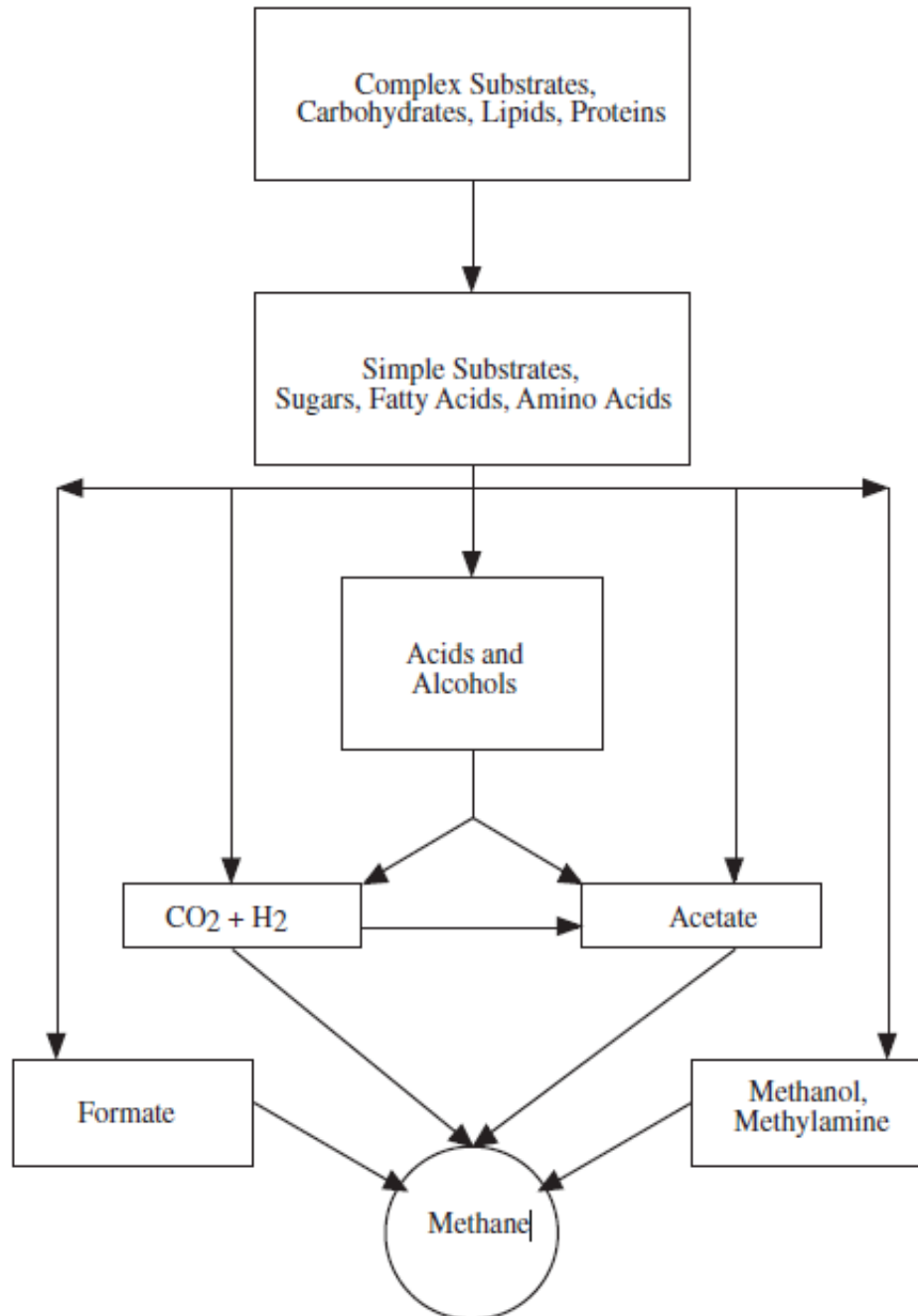


Figura 2.1. La cadena alimenticia anaeróbica consiste de varios grupos de anaerobios facultativos y anaerobios que degradan y transforman compuestos orgánicos complejos en compuestos orgánicos simples. El compuesto orgánico final producido en la cadena alimenticia anaeróbica es el metano. Este compuesto es la forma más reducida de carbono.

2.3 Efectos de la temperatura en el proceso de digestión

Los problemas recurrentes más comunes asociados con los digestores anaeróbicos son la pérdida de la capacidad de calentamiento y el mantenimiento de la temperatura digestiva óptima. Una temperatura uniforme y aceptable se debe mantener completamente en el digestor para prevenir cavidades localizadas de disminución en la temperatura y actividad bacteriana indeseada. Variaciones en la temperatura de incluso pocos grados afectan casi toda la actividad biológica incluyendo la inhibición de algunas bacterias anaeróbicas, especialmente las bacterias productoras de metano. La mezcolanza adecuada del contenido digestivo impide el desarrollo de zonas de variación de temperatura.

La mayoría de las bacterias productoras de metano son activas en dos rangos de temperatura. Estos rangos son el rango mesofílico de 30 a 35°C y el rango termofílico de 50 a 60°C. A temperaturas entre 40 y 50°C, las bacterias productoras de metano son inhibidas. La acción digestiva se debilita cerca a los 42°C, ya que esto representa la transición de organismos mesofílicos a termofílicos.

La temperatura es uno de los factores más importantes que afectan la actividad microbiana dentro de un digestor anaeróbico, y la producción de metano es fuertemente dependiente de la temperatura. Las fluctuaciones en la temperatura afectan la actividad de las bacterias productoras de metano a un rango mayor que la temperatura de trabajo.

La temperatura influye no solo en las bacterias productoras de metano sino también en las bacterias productoras de ácidos. Por lo tanto, las fluctuaciones en la temperatura pueden ser ventajosas para ciertos grupos y desventajosas para otros. Por ejemplo, un incremento de temperatura de 10°C puede parar la producción de metano o la actividad de las bacterias productoras de metano en un plazo de 12 horas, mientras la producción de ácidos volátiles aumenta. Cambios en la actividad de diferentes grupos de bacterias productoras de ácidos volátiles resulta en cambios en las cantidades relativas de ácidos orgánicos y alcoholes producidos durante la fermentación. Cambios en las cantidades de ácidos orgánicos y alcoholes que son usados directamente e indirectamente como sustratos por las bacterias productoras de metano afecta el desempeño digestivo global.

2.4 Efectos del pH en el proceso de digestión

La suficiente alcalinidad es esencial para el adecuado control del pH. La alcalinidad sirve como un amortiguador que previene los cambios rápidos en el pH. La actividad enzimática (o el desempeño digestivo) es influenciado por el pH. Una actividad enzimática aceptable de bacterias productoras de ácidos ocurre por encima de 5.0pH, pero una actividad enzimática aceptable de bacterias productoras de metano no ocurre por debajo de 6.2pH. La mayoría de las bacterias anaerobias, incluyendo las bacterias productoras de metano, se desempeñan adecuadamente dentro del rango de 6.8 a 7.2.

El pH en un digester anaeróbico inicialmente decrecerá con la producción de ácidos volátiles. Sin embargo, como las bacterias productoras de metano consumen los ácidos volátiles y la alcalinidad es producida, el pH del digester incrementa y después se estabiliza. En un tiempo de retención hidráulica mayor a

5 días, las bacterias productoras de metano comienzan rápidamente a consumir los ácidos volátiles.

En un digestor anaeróbico operado apropiadamente un pH de entre 6.8 y 7.2 ocurre a medida que los ácidos volátiles son convertidos a metano y dióxido de carbono. El pH de un sistema anaeróbico es significativamente afectado por el contenido de dióxido de carbono del biogás.

La estabilidad de los digestores es incrementado por una concentración de alcalinidad alta. Un decremento en la alcalinidad por debajo del nivel de operación normal ha sido usado como un indicador de falla por resolver. Un decremento en la alcalinidad pues ser causado por 1) una acumulación de ácidos orgánicos debido a la falla de las bacterias productoras de metano al convertir los ácidos orgánicos a metano, 2) una descarga de golpe de ácidos orgánicos hacia el digestor anaeróbico, o 3) la presencia de desperdicios que inhiben la actividad de las bacterias productoras de metano. Un decremento en la alcalinidad usualmente precede a un cambio rápido en el pH.

Las bacterias productoras de metano son estrictamente anaerobias y son sumamente sensibles a los cambios en la alcalinidad, pH, y temperatura, Gerardi (2003).

2.5 Desperdicios propicios para la digestión anaerobia

Vinaza de alcohol	Destilería	Mariscos y crustáceos
Frijol	Huevo	Matadero y empaclado de

		carne
Producción de bebidas	Fruta	De azúcar
Cervecería	Lixiviados	Verduras
De conservas	Pectinas	Trigo y granos o cereales
Queso	Petroleros	Vinatería
Químicos	Farmacéuticos	Lana
Maíz	Papas	Levadura
Lácteos	Papel y pulpa de papel	

Cuadro 2.1. Desperdicios industriales propicios para la digestión anaerobia.

Acetona	Formiato
Acrilatos	Glicerol
Alcoholes	Glicoles
Aldehídos	Cetonas
Aminoácidos	Metilo acetato
Anilinas	Nitrobenceno
Catecolaminas	Ácidos orgánicos
Cresol	Fenoles
Formaldehido	Quiñones

Cuadro 2.2. Desperdicios químicos propicios para la digestión anaerobia.

2.6 Mezclado

El contenido digestivo anaeróbico debe ser mezclado. El mezclado enriquece el proceso de digestión distribuyendo las bacterias, los sustratos y los nutrientes a lo largo del digestor así como también iguala la temperatura. Las actividades metabólicas de las bacterias formadoras de acetato y las bacterias formadoras de metano requieren que estos estén en contacto espacial estrecho.

Un mezclado lento asegura ese contacto. Las ventajas del mezclado se enlistan en el cuadro 2.3.

Eliminación o reducción de espuma
Eliminación de la estratificación térmica o bolsas de depresión de temperatura
Mantenimiento del fluido física y químicamente uniforme a lo largo del digestor
Rápida dispersión de desechos metabólicos producidos durante la digestión de sustratos
Rápida dispersión de cualquier material tóxico (minimización de toxicidad)
Prevención de la deposición de lodos

Cuadro 2.3. Ventajas del mezclado de la biomasa.

El mezclado puede ser logrado a través de métodos mecánicos o recirculación de gas. Estos métodos requieren de bombas externas, inyección de gas o recirculación del piso al techo de digesto, impulsores o turbinas y tuberías. Mezcladores mecánicos son más eficientes que la recirculación de gases, pero muchas veces son obstruidos con componentes sólidos.

El mezclado no debe ser continuo para lograr la destrucción aceptable de sólidos volátiles. El mezclado continuo es costoso y requiere una instalación de que favorezca la separación de sólidos digeridos de la fase líquida. Programar periodos de tiempo para el mezclado del contenido digestivo, por ejemplo, de tres a seis periodos de mezclado al día con duración de una a tres horas de duración para cada periodo, debería ser una alternativa eficiente en vez del mezclado continuo.

Las bacterias formadoras de metano son muy sensibles a un mezclado rápido, si hay un mezclado rápido el tiempo de retención hidráulico se incrementa, Gerardi (2003).

2.7 Saneamiento

Los desechos de origen animal o humano pueden contener una amplia variedad de bacterias patógenas, parásitos y virus. Estos pueden ser diseminados a lo largo de caminos creados por los sistemas de producción, las rutas de transportación de animales vivos y por la transformación, distribución y consumo de productos de origen animal. El transporte de desechos animales, su mezcla en conjunto en las plantas de digestión anaerobia y el regreso del efluente tratado y mezclado para foliar tierras de cultivo crean un nuevo camino potencial para la transferencia de enfermedades. La inclusión de residuos de mataderos, procesadoras de pescado, el fango de aguas negras y la fracción orgánica de desperdicios sólidos municipales en la materia prima de plantas de digestión anaerobia incrementa potencialmente la diversidad de patógenos que pueden ser esparcidos y pueden introducirse en las cadenas alimenticias animales y humanas. Estudios detallados en Dinamarca han dado como resultado el desarrollo de procedimientos prueba indicadores de organismos y la implementación de regulaciones las cuales garanticen el estatus de saneamiento de la materia prima tratada en digestión anaerobia. Estas regulaciones también conducen a la operación más eficiente de plantas de digestión anaerobia centralizadas, Colleran (1999). Se presentan las estipulaciones de saneamiento en los cuadros 2.4 y 2.5.

<i>Tipo digestivo</i>	<i>Tratamiento térmico antes de la digestión anaerobia</i>		<i>Saneamiento durante la digestión anaerobia</i>	
	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo (h)</i>
<i>Plantas de biogás mesofílicas (20 a 40°C)</i>	70	1	-	-
<i>Plantas de biogás termofílicas (55°C o más)</i>	70	0.5	55	24

Cuadro 2.4. Requisitos de saneamiento para sustancias de riesgo en plantas de biogás en Austria. Fuente: Amon & Boxberger (1999).

Temperatura	MGRT ¹ en un tanque de digestión termofílica ²	MGRT ¹ en un tanque separado de saneamiento	
		Antes o después de la digestión en un tanque de digestión termofílica ²	Antes o después de la digestión en un tanque de digestión mesofílica ³
52.0 °C	10 h	-	-
53.5 °C	8 h	-	-
55.0 °C	6 h	5.5 h	7.5 h
60.0 °C	-	2.5 h	3.5 h
65.0 °C	-	1.0 h	1.5 h

1.- MGRT es el tiempo de retención mínimo garantizado de la materia prima en el tanque de digestión o saneamiento.
2.- Digestión termofílica es definida a 52 °C o más. El tiempo de retención hidráulica debe ser de al menos 7 días.
3.- Digestión mesofílica entre 20°C y 52°C. El tiempo de retención hidráulica debe ser de al menos 14 días.

Cuadro 2.5. Saneamiento equivalente a una hora a 70 °C como es requerido en la notificación Danish No. 823 (Ministerio de energía y protección del medio ambiente). Fuente: Bendixen (1999).

2.8 Tipos de biodigestores

Digestores discontinuos

También llamados sistemas de “primera generación”. La característica principal de este grupo de fermentadores es, como su propio nombre indica, la carga discontinua, la cual se efectúa de una vez y se inocular con biomasa microbiana de la digestión precedente para favorecer el arranque de la fermentación. Estos digestores se han diseñado preferentemente para tratar residuos orgánicos con alto contenido en sólidos y, por tanto, los periodos de retención hidráulica son bastante prolongados. Dentro de este sistema se encuentran los digestores de tipo familiar de China y de la India usados desde la antigüedad.

Uno de los problemas que presenta esta tecnología, es la producción discontinua de biogás y, con objeto de eliminar en lo posible este inconveniente, las instalaciones se han proyectado dividiendo la capacidad total de digestión en tres o más fermentadores, los cuales funcionan de una manera escalonada, para solapar las curvas de producción de biogás y obtener una curva integral de producción uniforme de combustible. Actualmente este tipo de reactores son típicos en el tratamiento de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU).

Digestores continuos

Estos nuevos tipos de digestores de “segunda generación”, presentan en común la particularidad de obtener un flujo continuo de biomasa activa en su interior. En este grupo se incluye una amplia gama de digestores desarrollados con objeto de alcanzar una mejora en la producción energética. Las principales tecnologías de este tipo existentes en el mercado son:

- a. Mezcla completa.- Constituyen la tecnología más clásica para el tratamiento de todo tipo de residuos orgánicos semi-sólidos. Su característica principal es que la biomasa se elimina periódicamente a medida que lo hace el residuo orgánico digerido. Esta mecánica de funcionamiento no permite una alta concentración de bacterias en el interior del digestor y, por tanto, la producción de biogás por unidad de volumen del digestor es reducida (Figura 2.1).

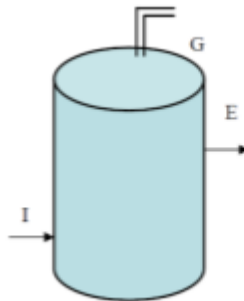


Figura 2.2. Esquema de digestor de mezcla completa. Fuente: Monografía Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). I.- Influyente; E.- Efluente; G.- Biogás.

- b. Flujo-pistón.- Se basan en el desplazamiento horizontal a través de una sección longitudinal, del sustrato a digerir, mezclándose mínimamente en este sentido, pues las distintas secciones tienen estados de fermentación diferentes. Son aptos para el tratamiento de residuos con elevada materia en suspensión.

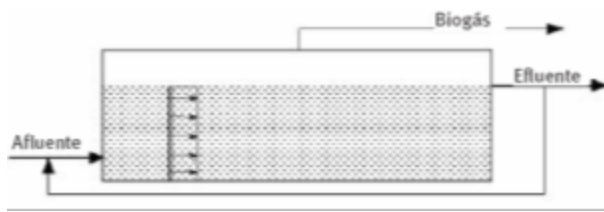


Figura 2.3. Esquema de digester de flujo-pistón. Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007.

c. Contacto o reciclado de lodos.- Uno de los problemas importantes que se presentan en los digestores hasta ahora mencionados es el “arrastre” de microorganismos por el efluente desde el interior del digester. La pérdida de biomasa bacteriana influye negativamente en el rendimiento de la digestión. En los digestores de contacto se procede a realizar una decantación de la biomasa arrastrada por el efluente, para introducirlos de nuevo en el interior del digester, con lo que se consigue una mayor población microbiana activa, que posibilita una disminución del tiempo de retención.

d.

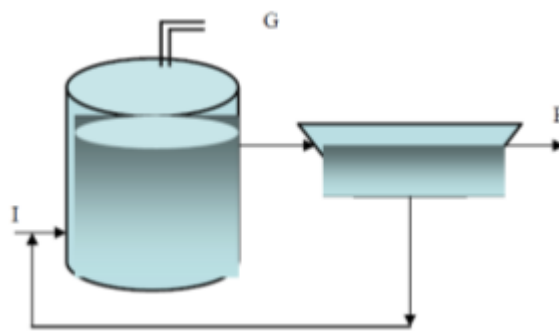


Figura 2.4. Esquema de digester reciclado de lodos. Fuente: Monografía Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). I.- Influyente; E.- Efluente; G.- Biogás.

Digestores de tercera generación

En este grupo se incluye una generación de digestores que se han desarrollado en los últimos años y que tienen como objetivo común, aumentar la concentración de la biomasa activa para aumentar el rendimiento energético por unidad de volumen del digestor. Sin embargo, este tipo de digestores, por su configuración, se utilizan principalmente para líquidos. Muchos de ellos no serían aplicables para residuos ganaderos.

- a) Filtro anaerobio.- La disminución del arrastre se logra al introducir dentro del digestor un lecho o soporte encargado de que sobre él se fijen los microorganismos. Los soportes más utilizados actualmente son de tipo plástico (poliuretano y policloruro de vinilo (PVC)) o silicatos (vermiculita, bentonita y sepiolita). Los filtros anaerobios permiten altas sobrecargas sin disminución apreciable en su eficacia. El inconveniente es que no toleran apenas sólidos en suspensión que colmatan la matriz, siendo sólo adecuados para residuos solubles y bastante diluidos. La figura 4 muestra un esquema de este tipo de digestor.

- b) Lecho de lodos.- En este sistema el incremento de la población bacteriana dentro del digestor se basa en proporcionar a los lodos las características físico-químicas más adecuadas para favorecer la floculación y coagulación de los mismos sin necesidad de intervención de ningún tipo de soporte. El digestor tiene un lecho de lodo floculado o granulado en el fondo, previsto para que permita el movimiento ascendente del influente a su través y actúe como filtro de la biomasa. La agitación se produce, durante la ascensión del biogás a través de toda la masa del digestor al liberarse el gas de los flóculos.

- c) Película fija.- Sistema parecido al filtro anaerobio, pero en este caso el material inerte está constituido por placas paralelas fijas y en el que el flujo es descendente. De esta forma se previenen los peligros de colmatación y de formación de vías preferenciales que se presentan en los filtros ascendentes. Puede trabajar con altas cargas, tanto hidráulicas como de concentración de sólidos y residuos diluidos.
- d) Película fija sobre soporte libre.- Esta tecnología tiene una mecánica de funcionamiento similar a la del "Reactor de película fija", y la única diferencia es que el soporte de policloruro de vinilo (PVC), al cual se fijan las bacterias, está totalmente libre en el interior del digestor y por tanto permite su movimiento, evitando de esta forma los riesgos de entupimiento y/o la formación de vías preferenciales.
- e) Lechos fluidizados o expandidos.- El procedimiento que se utiliza en este sistema está enfocado a maximizar la población microbiana en el digestor, maximizando para ello la superficie de adherencia de la biomasa al soporte. Para lograrlo, se introduce un material en partículas muy pequeñas, inerte y móvil (arena o alúmina) que se mantienen en lecho fluidizado y con una expansión relativamente pequeña con objeto de lograr una buena uniformidad en la distribución del efluente, que se mezcla con la alimentación. Se habla de lechos expandidos cuando la expansión del lecho es de 10-35%, mientras que cuando se recupera el 35% se habla de lecho fluidizado. La eficacia demostrada por este tipo de reactor, es bastante superior a cualquier otro tipo hasta ahora desarrollado, con la particularidad de presentar una gran estabilidad frente a cambios, incluso bruscos, de sus parámetros de operación. No obstante, la aplicación de esta tecnología a

nivel industrial es actualmente más problemática que en el resto de los sistemas (Mesa de biogás, 2010).

2.9 Tipos de invernaderos

Puede intentarse una clasificación según diferentes criterios (por ej. materiales para la construcción, tipo de material de cobertura característica, características de la techumbre, etc.) no obstante, se prefiere enumerar los más importantes obviando algunas características para su clasificación. Dentro de los tipos de invernaderos más comunes en el mundo se encuentran:

1. Invernadero-túnel
2. Invernadero capilla (a dos aguas)
3. Invernaderos en diente de sierra.
4. Invernadero capilla modificado (tipo chileno)
5. Invernadero con techumbre curva
6. Invernadero tipo “parral” ó “almeriense”
7. Invernadero “holandés” (tipo Venlo)

El utilizado en esta investigación debido a sus características es el invernadero tipo parral con algunas modificaciones ya que para este caso será un invernadero rectangular.

El invernadero tipo parral posee alta resistencia a los vientos y es de fácil instalación, relativamente pequeño volumen de aire retenido. Alta transmitancia de la luz solar. Apto tanto para materiales de cobertura flexibles como rígidos.

2.10 Control difuso

En un biodigestor que es alimentado diariamente con diferentes sustancias en diferentes cantidades que poseen diferentes calores específicos y que al momento de ingresarlos pueden poseer diferentes temperaturas, por ejemplo excretas tibias con agua fría del grifo o residuos de alimentos aún calientes con agua, todo esto en diferentes proporciones, resulta muy difícil tratar de obtener un modelado matemático diario que describa el comportamiento del contenido digestivo actual teniendo en consideración el comportamiento del contenido digestivo que se va a agregar a la digestión anaerobia. Además, un biodigestor de pequeña escala es difícil, por sus dimensiones, poder aislarlo en una cámara de temperatura controlada por lo que está expuesto a cambios climáticos y por tanto a situaciones no previstas en un modelado matemático.

Teniendo lo anterior en consideración, el control difuso es una alternativa práctica para una variedad de aplicaciones de control cada día más desafiantes ya que éste provee un método conveniente para estructurar controladores no lineales por medio del uso de información heurística. Tal información heurística puede provenir de un operador que ha actuado como un controlador humano en el lazo para un proceso. En la metodología de diseño de control difuso, se requiere que este operador escriba una serie de reglas sobre la manera de controlar el proceso, para luego incorporarlas en un controlador difuso que emula el proceso de toma de decisiones del ser humano. En otros casos, la información heurística puede provenir de un ingeniero de control que ha realizado intensos modelados

matemáticos, análisis y desarrollo de algoritmos de control para un proceso en particular. Nuevamente, tal experticia es cargada en el controlador difuso para automatizar las acciones y procesos razonadores del experto. A pesar de dónde proviene el conocimiento del control heurístico, el control difuso provee un protocolo de fácil manejo para representar e implementar las ideas que se tienen acerca de cómo lograr control de alto rendimiento. Para tener una clara idea del comportamiento de un control difuso se explica a continuación la estructura de éste y las funciones desarrolladas por cada bloque que lo compone.

Estructura de un controlador difuso

Un controlador basado en un modelo difuso puede verse como un sistema no lineal de múltiples entradas concretas y múltiples salidas concretas, Tanaka (2001). En la figura 2.5 se muestra la arquitectura de un controlador difuso.

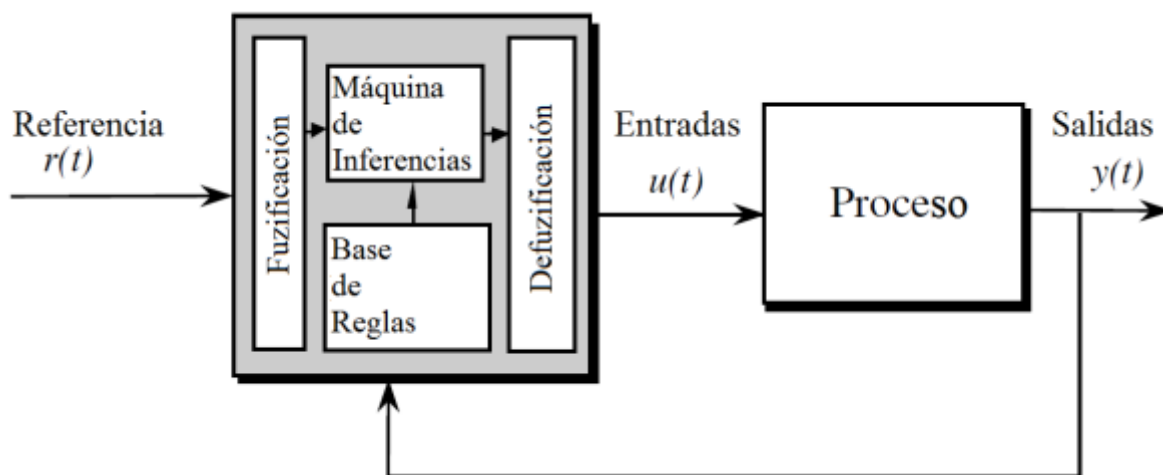


Figura 2.5. Arquitectura de un controlador difuso.

Fuzificación

Permite obtener los valores de pertenencia de la señal de entrada a cada uno de los conjuntos difusos de la entrada, transformando las p variables de entrada del modelo en variables difusas. Para esta interfaz se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia, Sáez (2002). Transforma la información de entrada al controlador en información lingüística que es interpretada por la base de reglas y la máquina de inferencias, figura 2.6.

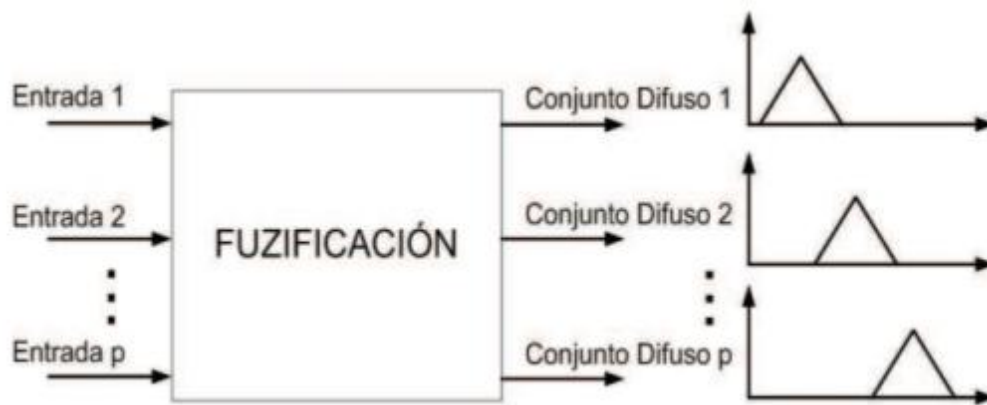


Figura 2.6. Bloque de Fuzificación.

Base de reglas

Es un conjunto de m reglas, cada una de las cuales es de la forma:

R_i : IF(E_1 esta en CD_1 AND E_2 esta en CD_2 AND ... AND E_p esta en CD_p) THEN (S_1 esta en CMI_1 AND S_2 esta en CMI_2 AND ... AND S_q esta en CMI_q)

En donde la i -ésima regla de R_i , $1 \leq i \leq m$, contiene a CD_j , $1 \leq j \leq p$, el cual es uno de los valores lingüísticos que puede tomar la variable de entrada j .

Si las m reglas cubren todas las posibles combinaciones de valores lingüísticos de los antecedentes, se dice que la base de reglas está completa. En ningún caso puede permitirse que exista dos reglas con el mismo antecedente, Pérez (1997).

Existen varias formas de derivar las reglas, entre las que destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de reglas se determina a partir de entrevistas con el operador o a través del conocimiento de la dinámica del proceso.
- La modelación del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso, Sáez (2002).

Para concluir, la base de reglas considera el conocimiento del experto resumido en un conjunto de reglas del tipo *if_then_*.

Máquina de inferencias

Se encarga de aplicar el mecanismo de inferencia seleccionado a las reglas, almacenadas en la base de reglas. Calcula las variables de salida a partir

de las variables de entrada, mediante las reglas del controlador y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida. Es decir la máquina de inferencia recibe los p conjuntos difusos producidos por la fuzificación, y los aplica a cada una de las m reglas de la base de reglas, para producir $m \cdot q$ conjuntos difusos (un conjunto difuso por cada variable de salida en cada una de las reglas) definidos sobre los universos de discurso de las variables lingüísticas de salida como se muestra en la figura 2.7.

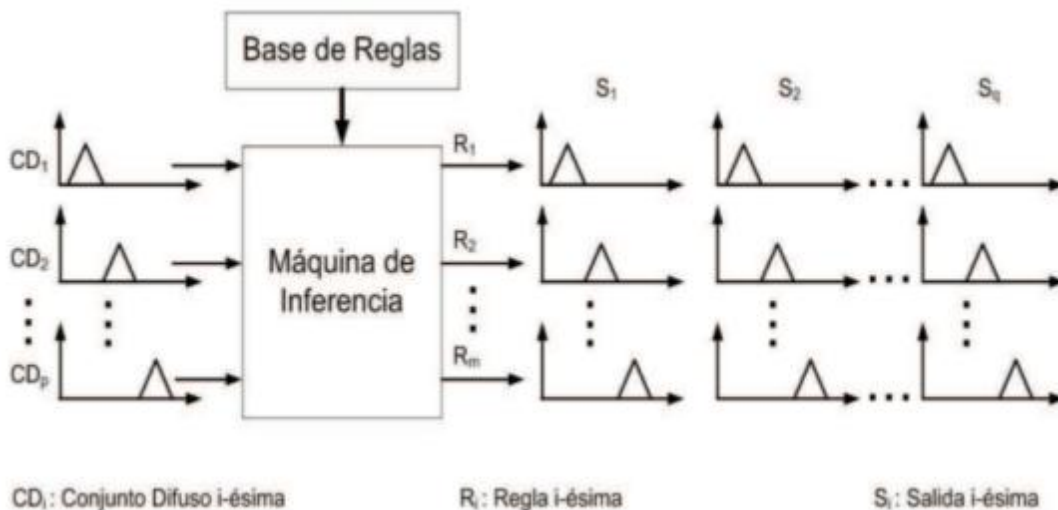


Figura 2.7. Bloque de Máquina de inferencias.

De forma resumida, la máquina de inferencias simula el proceso de de toma de decisiones del experto teniendo en cuenta la base de reglas del proceso.

Defuzificación

Obtiene el valor concreto de la señal de control. Este elemento provee salidas discretas y determinísticas a partir de los conjuntos difusos obtenidos como resultado de la inferencia, Sáez (2002).

Existen diferentes métodos de defuzificación, se describen tres de ellos:

- Método del máximo. La salida corresponde al valor para el cual la función de pertenencia alcanza su máximo.
- Media del máximo. La salida es el promedio entre los elementos del conjunto C que tienen un grado de pertenencia máximo.
- Centro de área o centroide (COG). Genera como salida el valor correspondiente al centro de gravedad de la función de pertenencia del conjunto de salida, Saez (2002).

El defuzificador convierte las conclusiones de la máquina de inferencias en acciones de control.

Con el último subtema del capítulo II abordado, se dan por sentados los conocimientos multidisciplinarios necesarios para la comprensión y el desarrollo de un biodigestor modular con control de temperatura difuso.

III. METODOLOGÍA

3.1 Diseño del biodigestor

Los biodigestores de tipo continuo, como es el caso de esta investigación, requieren de una alimentación constante de desechos orgánicos y/ó excretas provenientes de cerdos, vacas, gallinas, conejos e incluso humanos, excretas que son portadoras de las diferentes bacterias que se requieren para lograr la degradación anaerobia, los desechos orgánicos generalmente provienen de cafeterías, restaurantes, fondas, tianguis, mercados, florerías, establos, gallineros y mataderos entre otros. La alimentación del biodigestor propuesto en este trabajo de investigación es continua para lograr una continua producción de biogás basado en su mayor parte por excretas bovinas.

La mayoría de los digestores anaerobios para pequeñas y medianas granjas no tienen ningún control sobre la temperatura, en algunos lugares donde la temperatura desciende bruscamente por las noches, los digestores son aislados térmicamente mediante invernaderos como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Invernadero como aislante térmico para biodigestores.

El biodigestor propuesto posee un controlador de temperatura difuso para cada módulo que lo conforma, esto con el fin de producir mayor cantidad y mejor calidad de biogás; además el biodigestor propuesto cuenta con un aislante térmico (invernadero tipo parral) para aprovechar la energía solar por el día y reducir la energía requerida para mantener las temperaturas adecuadas por la noche.

Por otra parte, debido a que las bacterias en cada estado de la digestión anaerobia son diferentes y requieren diferentes condiciones de temperaturas para su óptimo desempeño, se busca determinar la temperatura óptima para cada estado de la biodigestión sabiendo que la temperatura óptima para el estado de metanogénesis es de 35°C, queda determinar las temperaturas de los otros dos estados.

Para determinar la temperatura óptima de los estados de hidrólisis y acetogénesis se realizan pruebas que registran mediciones del potencial de hidrógeno y de la temperatura de la composta en los tres primeros módulos del digestor, módulos que albergan los tres estados de la digestión anaerobia y así mismo se registra la presión del reservorio.

Ya que el efecto del proceso de mezclado en un biodigestor es tan importante como la temperatura, se adopta un proceso de mezclado automatizado.

3.1.1 Estados de la biodigestión

Cada uno de los estados de la digestión anaerobia es diferente ya que es llevado a cabo por diferentes bacterias, los biodigestores comúnmente utilizados en pequeñas y medianas granjas como lo son el tipo salchicha o los de ferrocemento carecen de la posibilidad de separar los estados de la digestión, por lo que el diseño del biodigestor considera una etapa de almacenamiento del contenido digestivo para cada estado de la biodigestión y así brindar la posibilidad de estudiar cada estado de manera independiente.

3.1.2 Saneamiento

Ya que el saneamiento es requerido en la digestión anaerobia, es necesario incluir una etapa de almacenamiento para este fin y así brindar al operador la posibilidad de sanear el efluente procedente de la biodigestión con el método que éste prefiera y de esta manera evitar el riesgo de diseminar bacterias patógenas, parásitos y/o virus, posibilidad que los sistemas convencionales no ofrecen.

3.1.3 Mezclado

Los digestores anaerobios antes mencionados regularmente son mezclados manualmente moviendo el contenido digestivo de manera superficial o dentro del biodigestor, en algunos casos de mayor escala se utilizan costosos equipos de inmersión como turbinas o bombas para la recirculación del contenido

digestivo, el biodigestor vertical modular ofrece la capacidad de realizar el mezclado con un sistema electromecánico de bajo costo (Aguilar et al. 2012).

3.1.4 Otras ventajas del diseño

El diseño del biodigestor evita la necesidad de cavar zanjas en la tierra (figura 3.2), lo cual es una tarea tediosa y ocupa una mayor superficie en el terreno, por otra parte, el aislamiento térmico que ofrece al biodigestor estar enterrado puede ser también proporcionado al biodigestor mediante un invernadero alrededor del cuerpo del digestor.



Figura 3.2. Típica zanja cavada para un biodigestor tipo salchicha.

Además, otra de las desventajas de los biodigestores mencionados es la sedimentación de sólidos en el fondo por el diseño que presentan como se ilustra en la figura 3.3, lo que ocasiona que el volumen ocupado por el contenido digestivo sea menor a medida que pasa el tiempo, lo que conlleva a una menor producción de biogás y a la salida anticipada de contenido digestivo. El diseño del biodigestor ofrece la posibilidad de liberar la sedimentación de sólidos mediante válvulas de escape en el fondo de cada módulo del digestor y así evitar las consecuencias negativas que este problema trae consigo y evadir los costos que requiere la renta de una pipa de desazolve.

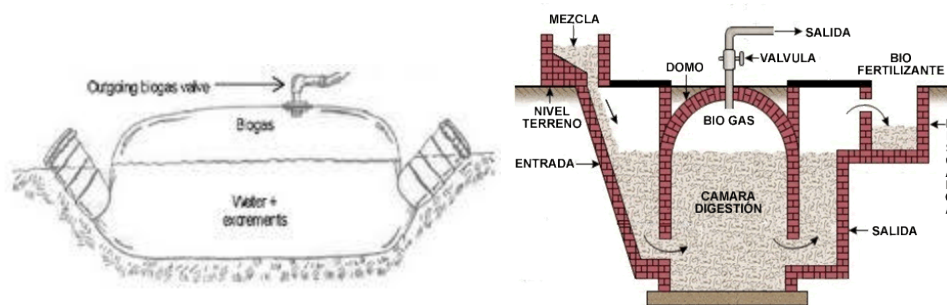


Figura 3.3. Diseño biodigestores tipo salchicha y ferrocemento.

En lugares con amplios espacios, la necesidad de cambiar la ubicación del digestor anaerobio es prescindible pero en lugares con espacios reducidos es una ventaja útil por lo que el diseño de esta investigación presenta una solución al problema de traslado mediante llantas en la base de la estructura del digestor anaerobio.

3.2 Metodología general

3.2.1 Diseño mecánico

La metodología propuesta se muestra en la figura 3.4 dónde se ilustran los cuatro módulos BD1 (hidrólisis), BD2 (acetogénesis), BD3 (metanogénesis) y BD4 (saneamiento), el reservorio, denominado en la imagen por R donde se almacena el biogás producido dentro de BD1, BD2, BD3 y BD4. Los cuatro módulos están montados sobre una estructura metálica para evadir la necesidad de cavar zanjas en el suelo, la estructura está soportada por seis ruedas para brindar la posibilidad de trasladar el digestor.

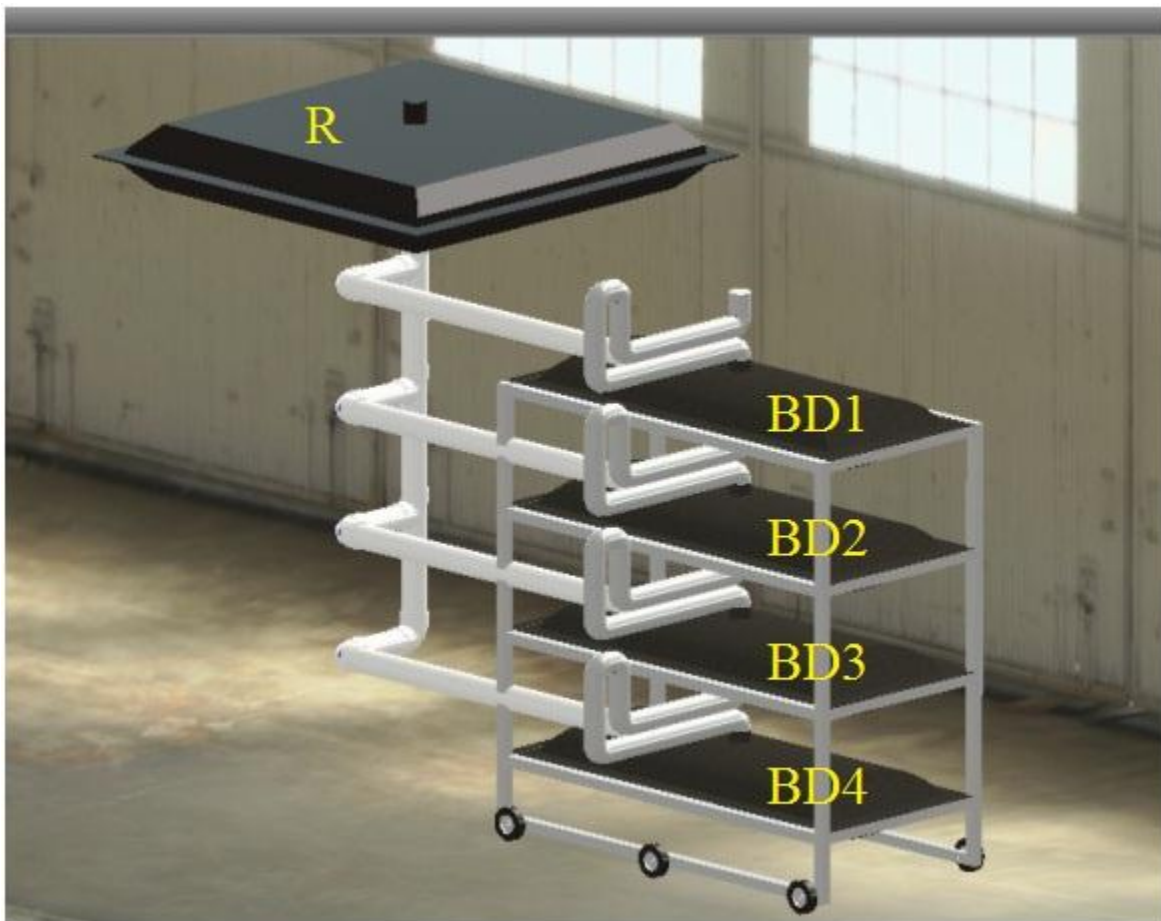


Figura 3.4. Metodología propuesta.

Los módulos están fabricados con bolsas de polietileno de alta densidad (PEAD), el diseño de las bolsas de PEAD se muestra en la figura 3.5, que fue sellado mediante soldadura de termofusión, al centro de cada bolsa se hizo un agujero de 4" para hacer la conexión con la siguiente bolsa y en el caso del reservorio la conexión para el almacenamiento del biogás. Cada agujero es sellado con dos bridas de 4" de pvc, una externa y otra interna para dar apriete a la unión, 8 tornillos de 2"x1/2" de acero inoxidable, 16 rondanas de acero inoxidable, 8 internas y 8 externas, silicón en ambos lados y 16 anillos de goma, 8 por dentro y 8 por fuera, colocados entre el tornillos y las rondanas. En la brida superior se coloca un codo de 4" con salida lateral de 2" para la instrumentación, en la brida inferior se coloca un "T" de pvc de 4" para un lado dirigirlo al sifón y a la válvula respectivamente.

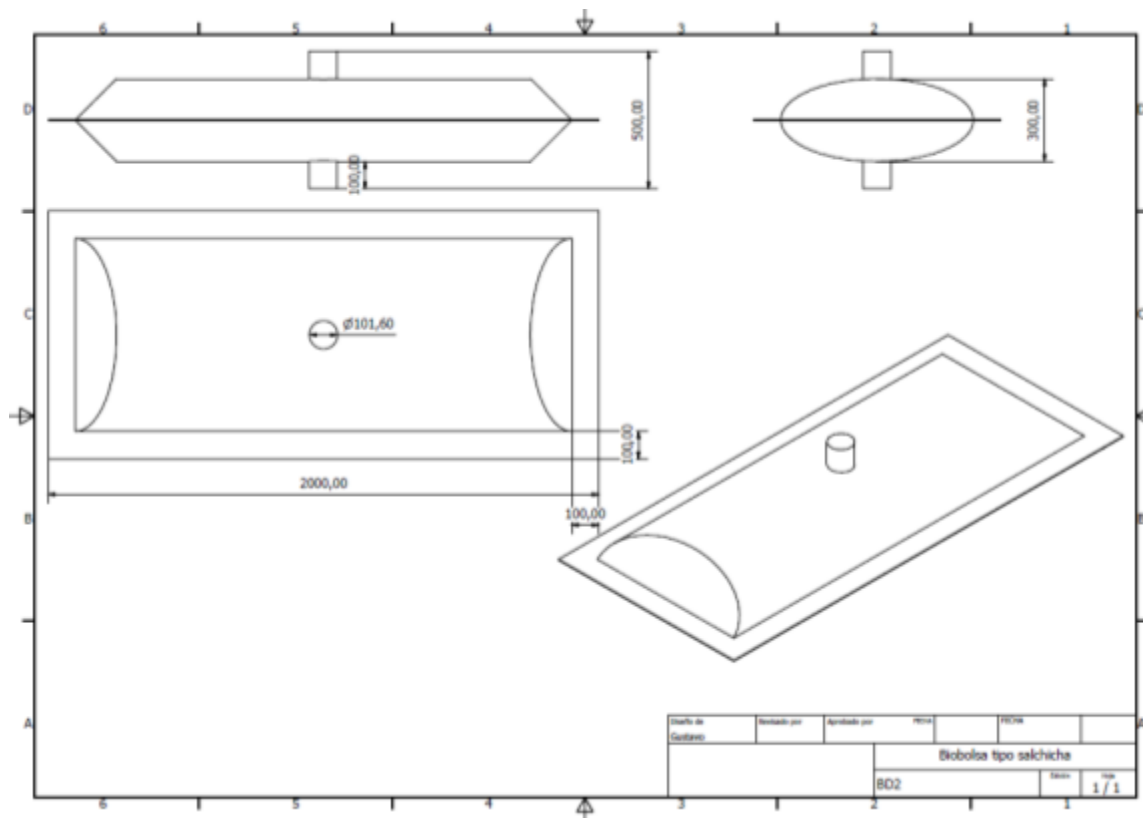


Figura 3.5. Diseño de los módulos fabricados con PEAD (cotas en mm).

La conexión entre cada módulo se lleva a cabo mediante un sifón hecho con tubería de 4" de policloruro de vinilo (pvc), en esta misma conexión se encuentra una válvula de pvc de 2" para llevar a cabo el desazolve de la acumulación de lodos (figura 3.6).

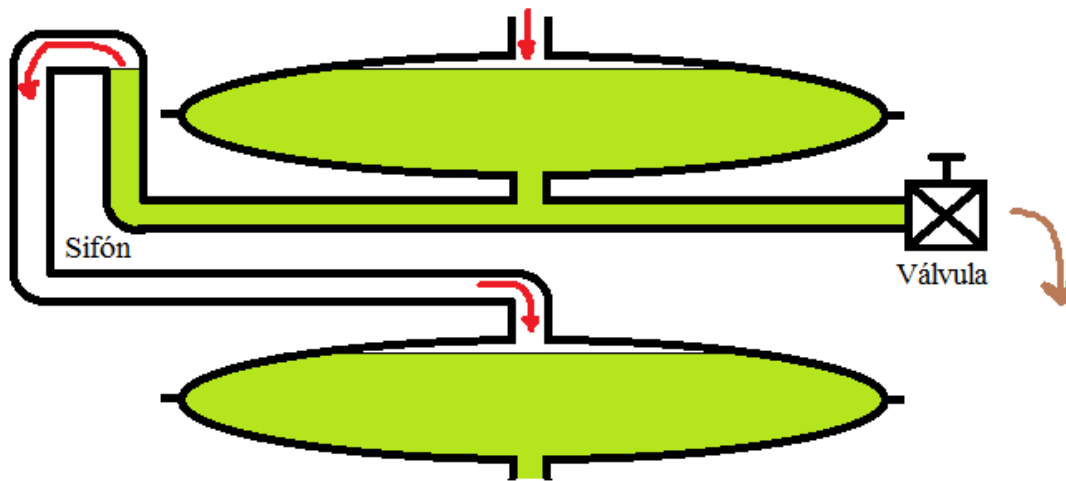


Figura 3.6. Conexión entre módulos.

La estructura metálica (figura 3.7) está hecha con perfil tubular rectangular (PTR) de 2" de calibre 14, soldado mediante de arco eléctrico con electrodo E6013, las llantas que tienen 4" de diámetro y se unen a la estructura mediante una tuerca soldada a la estructura.

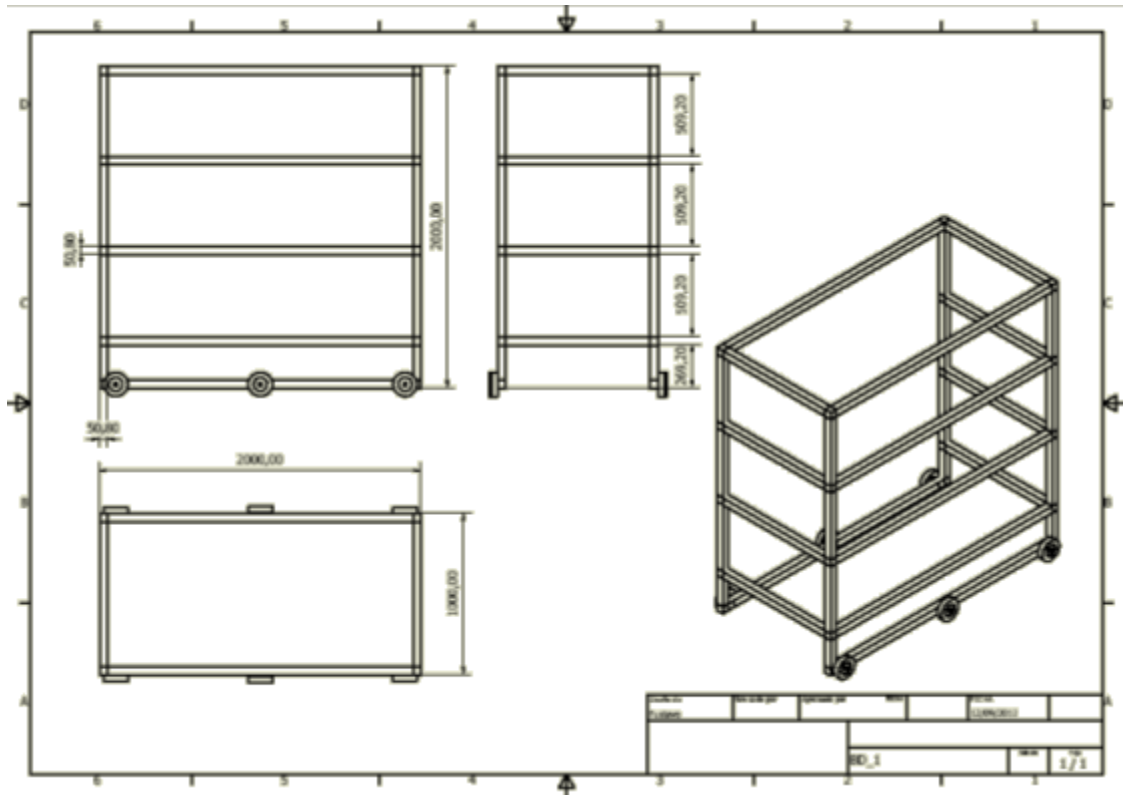


Figura 3.7. Diseño de la estructura metálica (cotas en mm.).

3.2.2 Diseño electromecánico

Ya que el mezclado del contenido digestivo se lleva a cabo mediante un pistón eléctrico de 12Vdc, es necesario describir la parte eléctrica y mecánica del mismo.

Como se ilustra en la figura 3.8 el pistón eléctrico está sujeto a un elemento mecánico para transmitir un movimiento de vaivén a la estructura metálica que soporta los cuatro módulos. La estructura completa debe estar suspendida para evitar fricción de las llantas de goma y el suelo debido al peso que oscila entre los 1300 y 1700 kg.



Figura 3.8. Mecanismo electromecánico para el mezclado.

Para la activación/desactivación del pistón eléctrico se utiliza la siguiente configuración de un circuito puente H, figura 3.9.

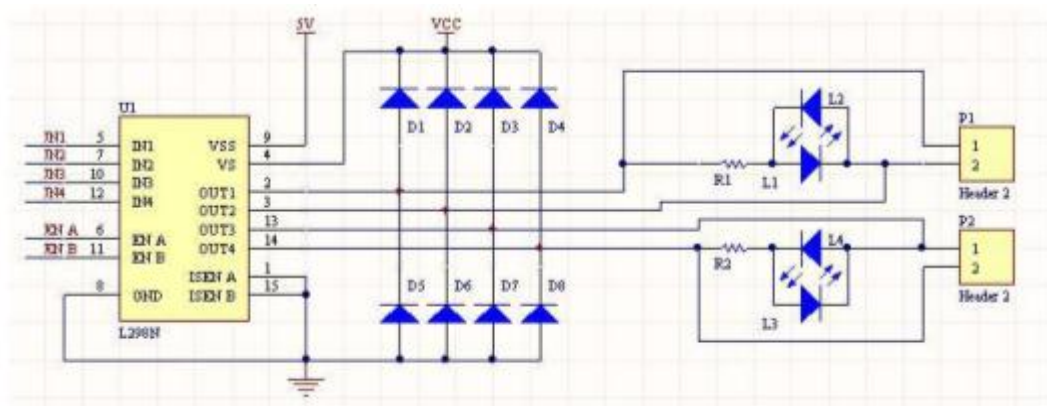


Figura 3.9. Circuito puente H I298 para mezclado.

3.2.3 Diseño electrónico

El mezclado del contenido digestivo requiere de ciclos de trabajo programados, un mezclado continuo perjudica las bacterias, para un biodigestor de pequeña escala se recomienda agitar de dos a tres veces por semana durante dos minutos según datos obtenidos de la página oficial de sistema biobolsa. Por lo tanto se requiere de un reloj de tiempo real que mantenga la información de los horarios de agitación, por su fácil uso se emplea el encapsulado con número de parte ds1307, reloj que cuenta segundos, minutos, horas, fecha del mes, mes, día de la semana y año considerando año bisiesto, consume menos de 500nA de una batería de soporte que mantiene el oscilador del integrado contando el tiempo. En la figura 3.10 se muestra el diagrama de conexión del circuito que emplea un microcontrolador pic18f4550 para el manejo de los datos y la selección del horario de la agitación mediante librerías de MikroC se programa la hora una sola vez y lee la hora, los códigos utilizados están disponibles en el anexo A.

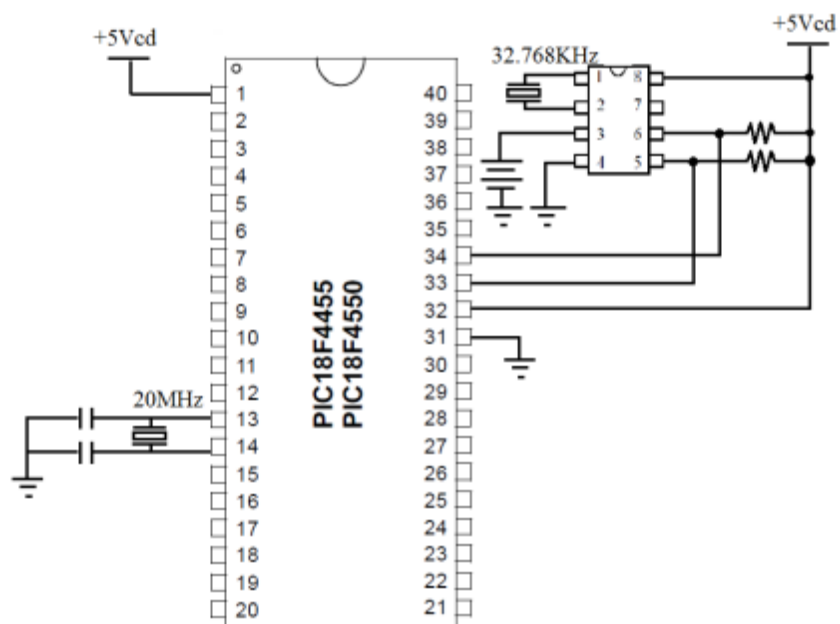


Figura 3.10. Circuito de conexión pic18f4550 con ds1307.

Los horarios de agitación se seleccionan con condiciones if_then_ tomando los días domingo martes y viernes en horarios de 12:00pm a 12:02pm.

3.3 Elementos de instrumentación

3.3.1 Temperatura

Los sensores de temperatura utilizados son sensores digitales adecuados para inmersión en líquidos con número de parte DS18B20 que poseen una resolución de 12 bits y un rango de operación de -55°C a 125°C y precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, figura 3.11.



Figura 3.11. Sensor de temperatura ds18b20.

3.3.2 Presión

El sensor de presión utilizado para medir la presión del reservorio es un sensor analógico con número de parte MPX4250 que posee una resolución de 18.8mV/kPa y tiene un rango de operación de 0 a 36.6 *psi* con precisión de +- 1.4%, figura 3.12.



Figura 3.12. Sensor de presión MPX4250GP.

3.3.3 Potencial de Hidrógeno

Los electrodos de pH utilizados son transductores analógicos con un rango de operación de 0 a 12 con número de parte C2451C-12^a-A10BC, poseen un rango de operación de temperatura de -5°C a 80°C lo que los favorece para la aplicación en esta investigación, donde los rangos de temperatura oscilan entre 30°C y 40°C, figura 3.13.



Figura 3.13. Electrodo de pH C2451C-12^a-A10BC.

3.3.4 Actuadores

Cada biodigestor tiene como actuador una resistencia eléctrica de 800W de CA, que son activadas por medio de un TRIAC BTA16 que tiene como señal de activación una señal PWM proveniente del controlador difuso como se ilustra en la figura 3.14.

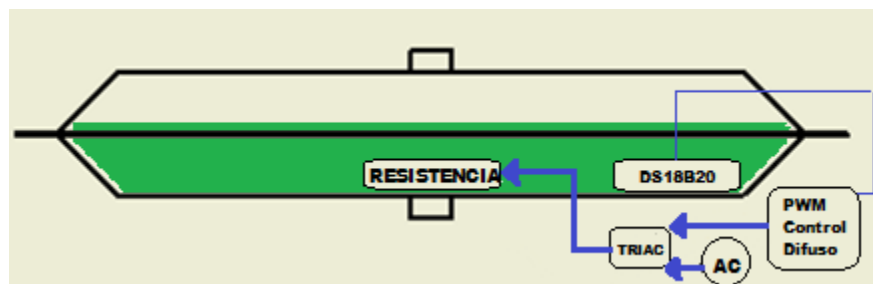


Figura 3.14. Diagrama del control de temperatura.

Por otra parte, el actuador de pH para el primer estado de la biodigestión, se planteó ser un tanque y una válvula, en el tanque se almacenaría agua mezclada con cal en relación 5:1, cuando la válvula se abre la mezcla baja y entra al primer módulo. Durante el desarrollo de esta investigación se determinó que no es necesario ningún tipo de control de pH en ninguno de los estados del proceso.

3.3.5 Acondicionamiento de señales

Para acondicionar la señal proveniente del electrodo de pH, que entrega -20mV a 20mV de 0 a 12pH, se utiliza un amplificador operacional TL081CP en la siguiente configuración (figura 3.15).

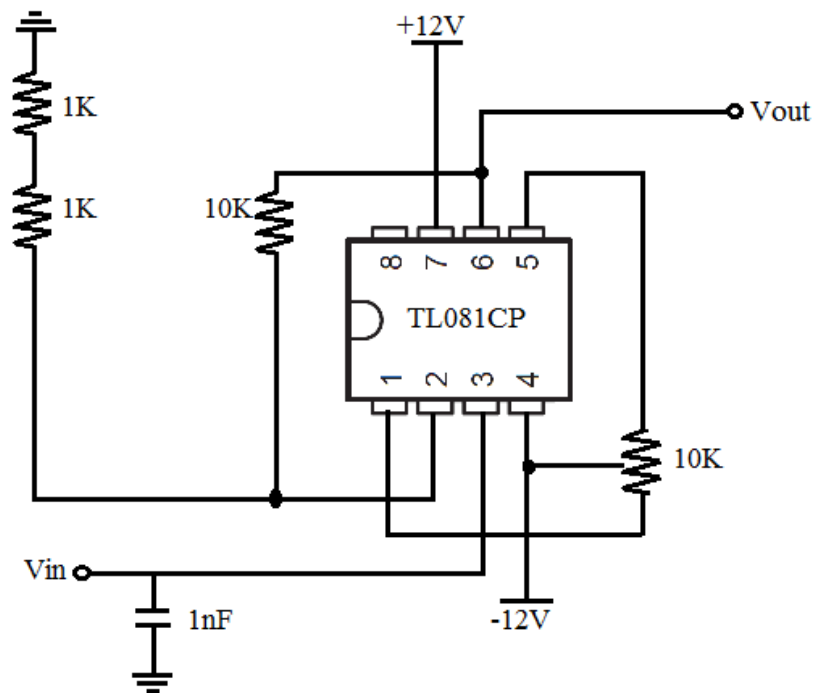


Figura 3.15. Circuito acondicionador de la señal analógica para el electrodo de pH.

A continuación se muestra el circuito que se utiliza para realizar las mediciones de presión dentro del biodigestor. El sensor con número de parte MPX4250GP entrega de 0.2 a 4.9 V de 0 a 36.3 psi.

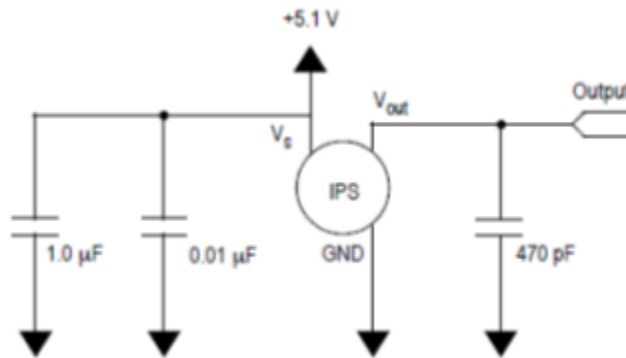


Figura 3.16. Circuito de acoplamiento sensor analógico de presión MPX4250GP.

3.4 Control

En cada uno de los cuatro módulos, la temperatura se controla mediante controladores difusos implementados en un *dsPIC30f4011*. Los horarios de agitación se controlan mediante un *pic18f4550* y un reloj de tiempo real *ds1307* como se mostró anteriormente, la apertura y cierre de la válvula de control de pH también está implementada en el *pic* de la familia 18, esto mediante un control *on-off* desarrollado con condiciones *if_then_* que evalúan el pH del primer módulo de la digestión y agregan agua con cal en caso de que el pH se registre por debajo de 5. Se cuenta también con una interfaz grafica la cuál recibe información mediante comunicación *Universal Serial Bus (USB)*. Se describen enseguida.

3.4.1 Control difuso

El controlador difuso está diseñado con dos variables lingüísticas, error y cambio en el error mostradas en la figura 3.17. El criterio para el defuzificador es el centro de gravedad mostrado en la ecuación 3.1.

$$F(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i \int U(F(t)))}{\sum_{i=1}^n \int U(F(t))} \text{ donde } \int U(F(t)) = w \left(h - \frac{h^2}{2} \right) \quad (3.1)$$

$w = \text{ancho de la base}$ $h = \text{altura calculada}$

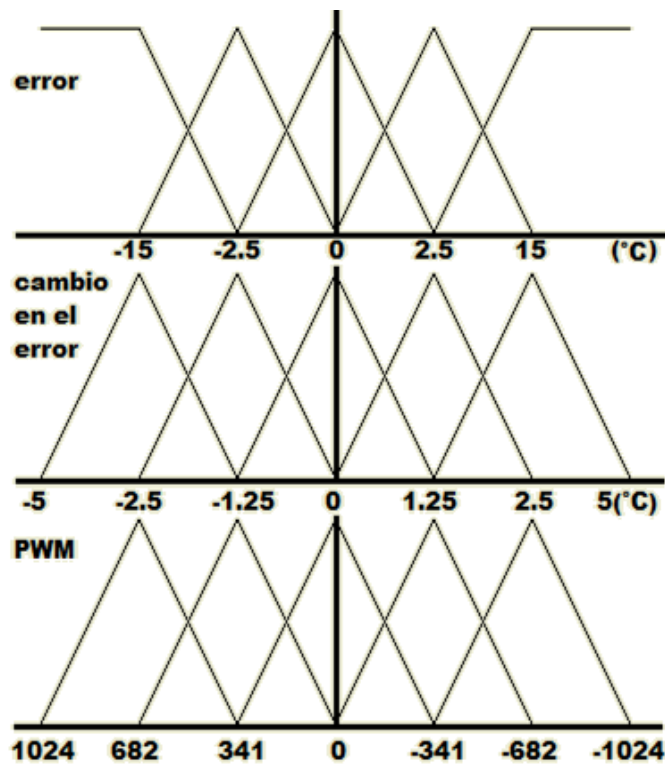


Figura 3.17. Variables y valores lingüísticos del controlador difuso.

Para realizar las mediciones de temperatura del sensor ds18b20 el μC utiliza una librería llamada *onewire* desarrollada en el programa *mikroC* para leer los dispositivos de este tipo. En la figura 3.18 se muestra la conexión externa del circuito.

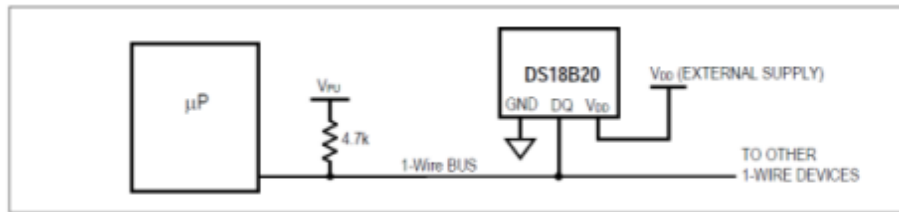


Figura 3.18. Circuito de conexión del sensor digital de temperatura bs18b20.

A continuación se ilustra el diagrama de las conexiones y los circuitos utilizados para el control de temperatura.

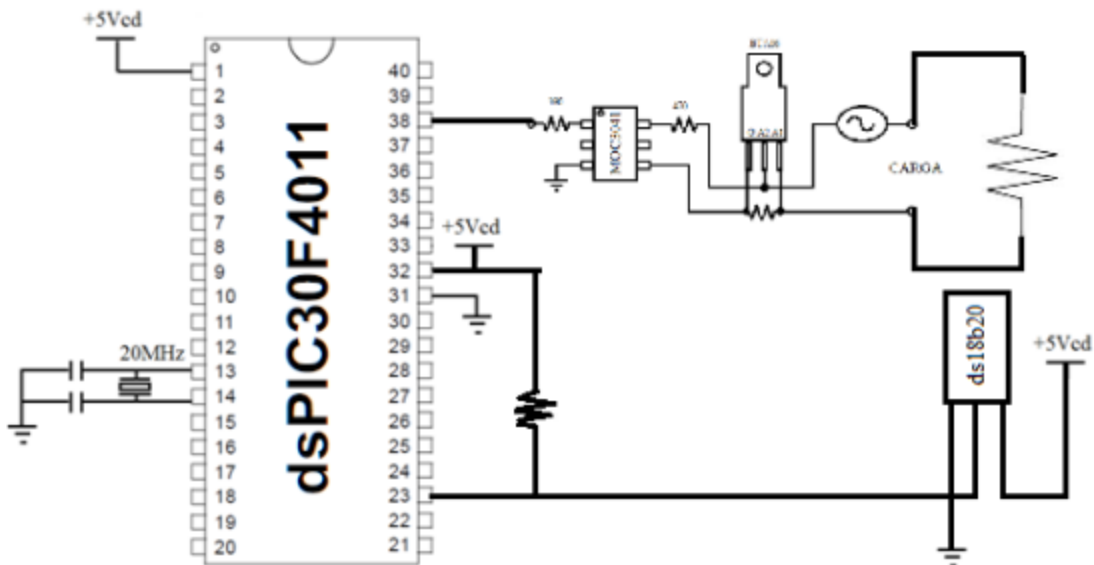


Figura 3.19. Diagrama de conexiones para el control de temperatura.

3.5 Comunicación USB

El microcontrolador (μC) PIC18F4550 es utilizado para establecer comunicación USB con un programa (figura 3.21) desarrollado en *Visual C#Sharp*, esto con el fin de brindar información gráfica del completo estado del biodigestor, el μC envía información de la temperatura de los cuatro módulos, el pH de los tres primeros módulos y la presión de reservorio de biogás así como el estado del mezclador y el triturador de alimentos que es utilizado para reducir el tamaño de los desechos orgánicos provenientes de residuos de comida e ingresarlos al biodigestor. En la figura 3.20 se ilustra el diagrama de conexiones del PIC18f4550 para establecer comunicación mediante el protocolo USB.

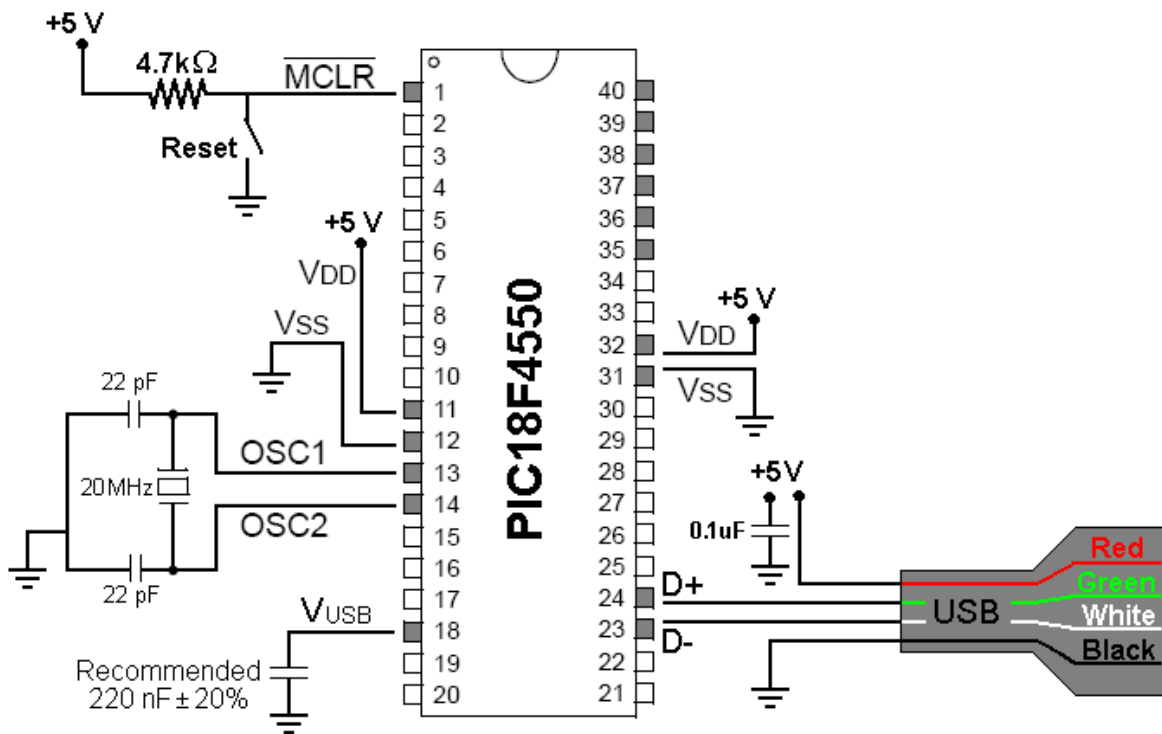


Figura 3.20. Diagrama de conexiones protocolo USB.

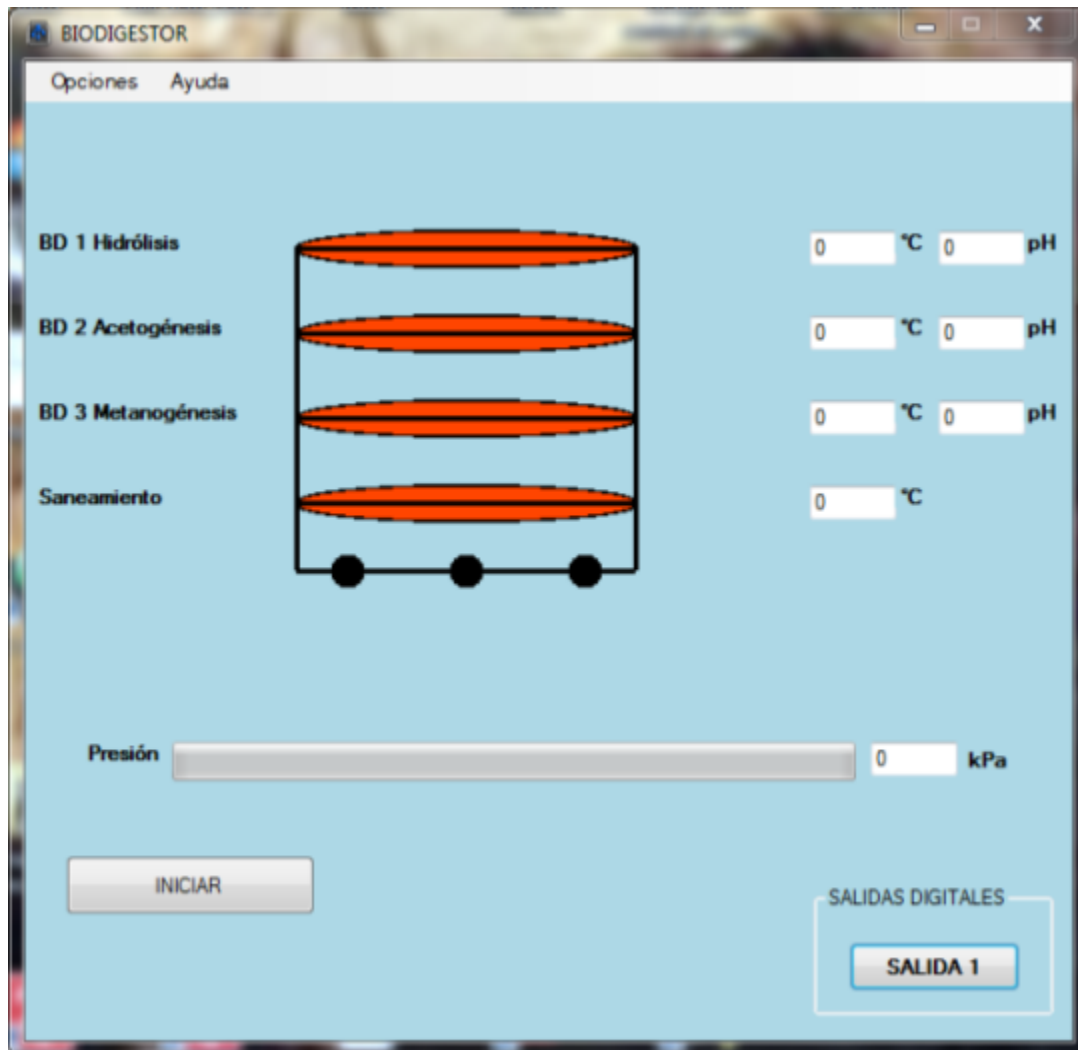


Figura 3.21. Interfaz gráfica en *Visual C#Sharp*.

La interfaz gráfica muestra las mediciones de temperatura de los cuatro estados de y las mediciones del pH de los tres primeros estados además de mostrar la presión contenida en el reservorio. El dibujo muestra los cuatro módulos en tres diferentes colores, rojo si la temperatura se encuentra 5°C por debajo o encima de la referencia, amarillo si se encuentra 3°C por debajo o encima de la referencia y verde si la temperatura se encuentra 0.5°C por debajo o encima de la referencia. La presión del reservorio se ilustra mediante una barra de progreso. Todos los valores numéricos se muestran en las ventanillas blancas.

IV. Resultados

El biodigestor cuenta con cuatro etapas, las primeras tres son para poder estudiar de manera independiente cada estado de la biodigestión y la última etapa es para llevar a cabo el proceso de saneamiento (figura 4.1).



Figura 4.1. Biodigestor modular.

Todos los módulos están montados sobre una estructura metálica que a su vez está soportada por 6 llantas de 6" con capacidad para 250 kg cada una lo que brinda la posibilidad de cambiar la ubicación del biodigestor.



Figura 4.2. Estructura metálica montada sobre llantas.

La disposición vertical de los módulos y las válvulas de escape, que se muestra en la figura 4.3, ofrecen la posibilidad de vaciar uno o todos los módulos para limpiar los sedimentos que se pudieran acumular durante la operación del biodigestor.



Figura 4.3. Válvula para desazolve.

La figura 4.4 muestra el comportamiento de la temperatura, el pH y la presión del sistema sin control y expuesto a la luz solar durante un periodo de 7 días, en la gráfica se ven los efectos del medio ambiente como crestas y valles de temperatura y presión, el pH no se ve afectado por los cambios de temperatura y permanece constante una vez arrancado el proceso en todos los estados. El aumento de la presión es casi imperceptible teniendo un máximo de 0.5KPa.

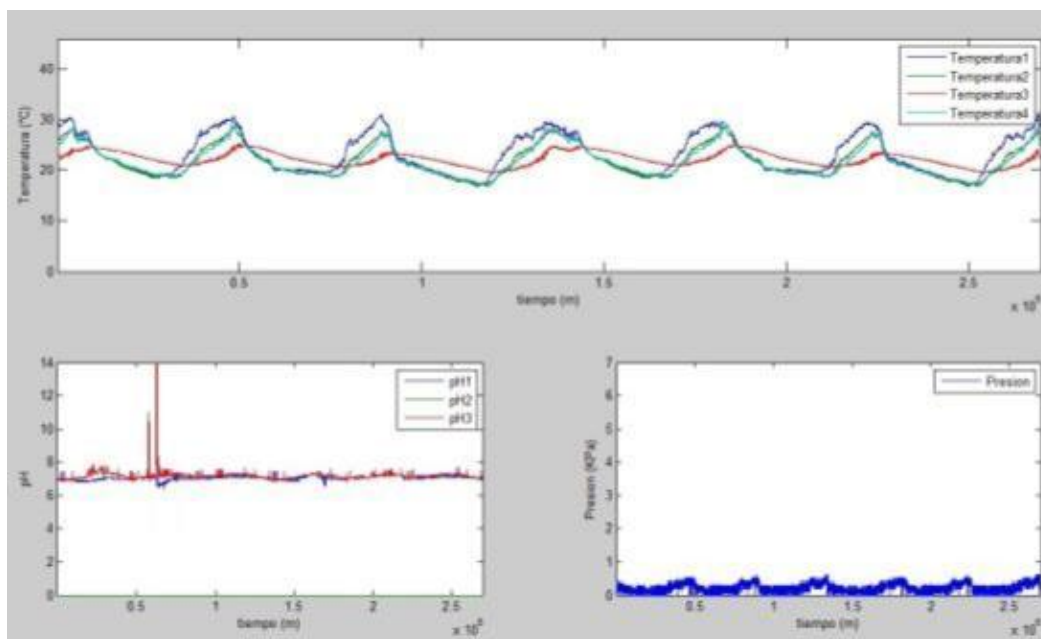


Figura 4.4. Gráfica del comportamiento del sistema sin control.

En la figura 4.5 se observa el comportamiento del sistema con control general de temperatura a 35°C. El comportamiento de la temperatura con el controlador difuso resulta ser eficaz, el error no supera $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, el biodigestor se encuentra a la sombra. El pH permanece constante en los tres estados de la biodigestión, muy cercano a 7. La presión aumenta relativamente rápido con respecto al desempeño sin control de temperatura, presentando un máximo de 1.5KPa. A partir del cuarto día resulta difícil el alimentar el biodigestor por efecto de la presión.

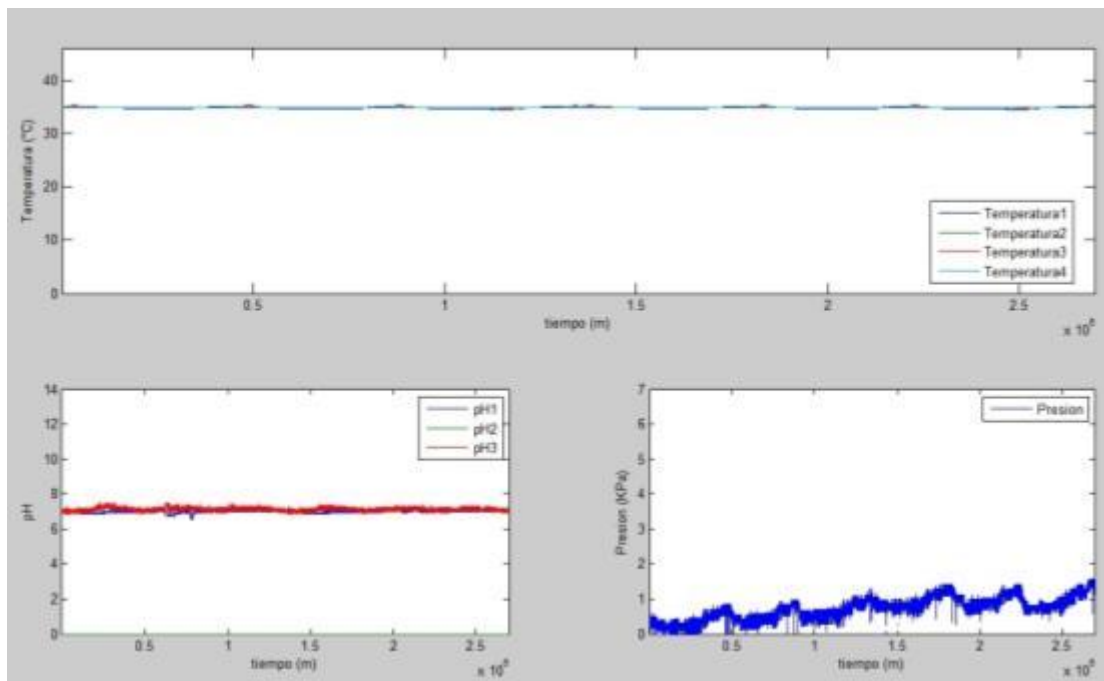


Figura 4.5. Gráfica del comportamiento del sistema con control general a 35°C.

Para obtener las condiciones de temperatura óptimos del estado de hidrólisis y acetogénesis, basados en referencias de temperatura de otros procesos donde se llevan a cabo estados de hidrólisis y acetogénesis, se fijaron temperaturas cercanas a las de esos procesos. Para la hidrólisis se fijaron

temperaturas de 36, 37 y 38°C, el desempeño de la presión se vio mejorado a 37°C, la presión máxima alcanzada fue de 2.4KPa, figura 4.6; mientras que en las otras referencias de temperatura el desempeño fue muy similar al mostrado a 35°C.

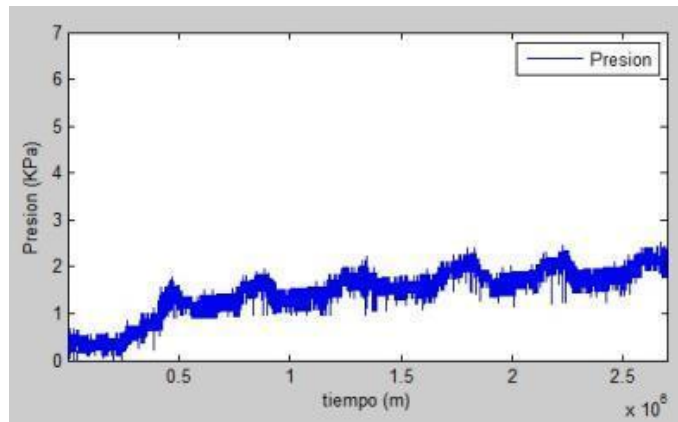


Figura 4.6. Gráfica del comportamiento de la presión con la hidrólisis a 37°C.

Por otra parte, las referencias de temperatura para el estado de acetogénesis se fijaron a 30, 31 y 32°C, resultando muy similar el comportamiento en las tres condiciones, por lo que se opta por la que requiere menor gasto energético. La figura 4.7 muestra el resultado obtenido sobre la presión.

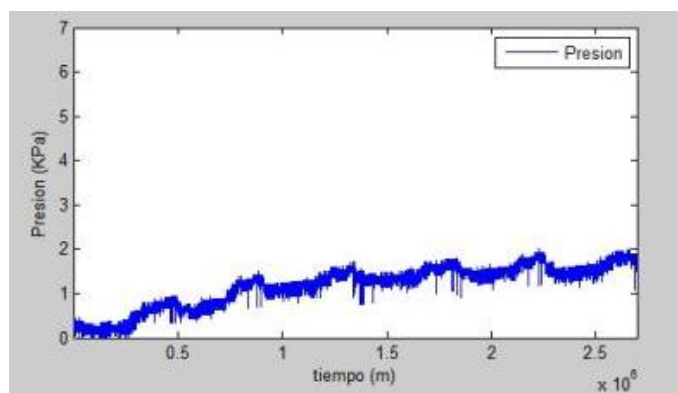


Figura 4.7. Gráfica del comportamiento de la presión con la acetogénesis a 30°C.

La figura 4.8 muestra el comportamiento de la presión con las condiciones óptimas de la hidrólisis y la acetogénesis a 37 y 30°C respectivamente, la presión máxima alcanzada fue de 3.2KPa y a partir del cuarto día fue imposible alimentar el biodigestor. Aunque la ingesta de materia orgánica cesó al cuarto día, se observa que la presión siguió aumentando casi linealmente hasta el séptimo día.

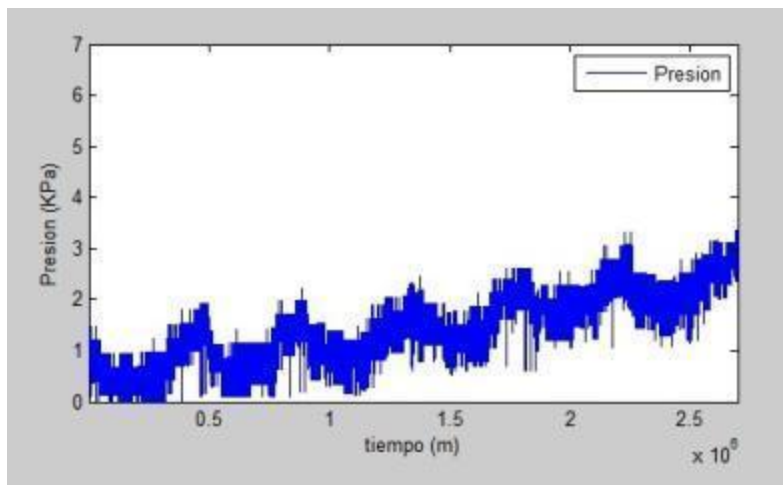


Figura 4.8. Gráfica del comportamiento de la presión con la hidrólisis a 37°C y la acetogénesis a 30°C.

V. Conclusiones

El diseño de un biodigestor vertical modular de estructura flexible reduce las desventajas de un biodigestor común como el tipo salchicha o el tipo ferrocemento, facilita la operación del digestor, ofrece la posibilidad de estudio de los estados de la digestión anaerobia y ayuda a optimizar el proceso de biodigestión.

El biodigestor presenta las ventajas antes mencionadas con respecto a otros biodigestores utilizados en granjas de pequeña y mediana escala. Siendo las principales ventajas la posibilidad de cambiar de ubicación, realizar el mezclado del contenido digestivo de manera más eficiente, poder estudiar los tres estados de la biodigestión y realizar el saneamiento de manera independiente, la fácil remoción de sedimentos acumulados en el fondo o bien la liberación del contenido en caso de falla, no requiere de zanja en el suelo y puede ser cubierto con algún plástico para invernadero.

Se pudo comprobar que la temperatura en el proceso de biodigestión es el parámetro más importante a considerar al momento del diseño de un biodigestor. Además, se estableció una temperatura óptima de 37°C para el estado de hidrólisis, de 30°C para la acetogénesis y se reafirmó una temperatura óptima de 35°C para el estado de metanogénesis.

También se comprobó que la actividad bacteriana no se ve afectada por cambios significativos en temperatura cuando las bacterias utilizadas son las mesofílicas, además de establecer que para sistemas de pequeña escala como este no es necesario un control de pH en ninguno de los estados de la biodigestión.

VI. Referencias Bibliográficas

Aguilar G., Morales Hernández L. Morales Velázquez L., Saucedo J., 2013, *Design and control of a mechatronic system for homogenization of the compost in anaerobic digesters*, CONIELECOMP, pp. 198, ISBN: 978-1-4673-6154-5.

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., Ojeda-Benítez, S. 2011. Modelo mexicano para la estimación de la generación biogás. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-1, pp. 37-45, ISSN: 1665-529-X.

Bermúdez Gómez Carlos Rodolfo, Miguel Ángel Díaz Hernández, 2010, "Instrumentation of an animal manure biodigester to analyze its dynamic behavior".

Buenrostro Otoniel, Silke Cram, Gerardo Bernache, Gerardo Bocco, 2000, "La digestión anaerobia como alternativa de tratamientos a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales", Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Año/Vol. 16, número 001 Universidad Autónoma de México Distrito Federal, México, pp. 19-26.

Cabello Quiñones Ana María, 2006, "Energías alternativas: Solución para el desarrollo sustentable".

Colleran Emer, 1999. "Hygienic and sanitation requirements in biogas plants treating animal manures or mixtures of manures and other organic wastes".

CONCYTEG, 2006, "Biogás y biometanación".

FIRCO SAGARPA, 2009, "Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México".

Gerardi Michael H., 2003." The microbiology of Anaerobic digesters".

Hernández Hernández Horacio Aldo, 2012, Tesis de maestría, "Diseño de un biodigestor instrumentado electrónicamente para la generación de biogás en casa habitación".

Huerta Gallegos Nadia, 2010, Tesis "Degradación Anaerobia de Residuos de restaurantes de Ciudad Universitaria".

INEGI, 2011, "Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente".

Magaña R. J. Luis, Ernestina Torres R., Martín T. Martínez G., Carmen Sandoval Juárez, Rosalía Hernández Cantero, 2006, "Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras", Acta Universitaria, Mayo-Agosto, Año/Vol. 16, número 002, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, pp. 27-37.

Mesa de biogás, 2010, "El sector del biogás agroindustrial en España".

Novas Peña Despradel, 2008, "Microcontroladores, Arquitectura, programación y aplicación".

Pascual Andrés, Begoña Ruiz, Paz Gómez, Xavier Flotats, Belén Fernández, 2011, "Situación y potencial de generación de biogás Estudio Técnico PER 2011-2020".

Passino Kevin M., 1998, "Fuzzy control".

Pérez, G. H., 1997, "Control con sistemas difusos".

Sáez, D., 2002, "Fundamentos de la lógica difusa".

Tanaka, K. and Wang, H., 2001, "Fuzzy control systems design and analysis".

APENDICE A Galería de imágenes













APÉNDICE B

Código C Control Difuso

```
void onewire_reset() { output_low(ONE_WIRE_PIN); delay_us(500);
output_float(ONE_WIRE_PIN); delay_us(500); output_float(ONE_WIRE_PIN);}

void onewire_write(int8 data) {
    int8 count;
    for(count = 0; count < 8; ++count)
        { output_low(ONE_WIRE_PIN); delay_us(2); output_bit(ONE_WIRE_PIN, shift_right(&data, 1,
0)); delay_us(60); output_float(ONE_WIRE_PIN); delay_us(2); }
}

int onewire_read() {
    int count, data;
    for(count = 0; count < 8; ++count)
        { output_low(ONE_WIRE_PIN); delay_us(2); output_float(ONE_WIRE_PIN); delay_us(8);
shift_right(&data, 1, input(ONE_WIRE_PIN)); delay_us(120); }
    return data;
}

int16 ds1820_read_1() {
    int8 busy=0, temp1, temp2;
    signed int16 temp3;
    onewire_reset(); onewire_write(0xCC); onewire_write(0x44); while(busy == 0) busy =
onewire_read();
    onewire_reset(); onewire_write(0xCC); onewire_write(0xBE); temp1 = onewire_read(); temp2 =
onewire_read(); temp3 = make16(temp2, temp1); delay_ms(200);
    return(temp3);
}

void onewire_reset_2() {output_low(OWP_2); delay_us(500); output_float(OWP_2);
delay_us(500);output_float(OWP_2);}

void onewire_write_2(int8 data) {
    int8 count; for(count = 0; count < 8; ++count)
        { output_low(OWP_2); delay_us(2); output_bit(OWP_2, shift_right(&data, 1, 0));
delay_us(60); output_float(OWP_2); delay_us(2); }
}

int onewire_read_2() { int count, data;
    for(count = 0; count < 8; ++count)
        { output_low(OWP_2); delay_us(2); output_float(OWP_2); delay_us(8); shift_right(&data, 1,
input(OWP_2)); delay_us(120); }
    return data;
}

int16 ds1820_read_2() {int8 busy=0, temp1, temp2; signed int16 temp3;
```

```

    onewire_reset_2(); onewire_write_2(0xCC); onewire_write_2(0x44); while(busy == 0) busy =
onewire_read_2();
    onewire_reset_2(); onewire_write_2(0xCC); onewire_write_2(0xBE); temp1 =
onewire_read_2(); temp2 = onewire_read_2(); temp3 = make16(temp2, temp1); delay_ms(200);
    return(temp3);
}

```

```

float y_recta(float y2, float y1, float x2, float x1, float x)
{ return ((y2-y1)/(x2-x1))*x+y1-((y2-y1)/(x2-x1))*x1;
}

```

```

int16 t1=0;
int16 t2=0;
int i=0;
float yng_e=0,ynp_e=0,ycero_e=0,ypp_e=0,ypg_e=0;
float yng_ce=0,ynp_ce=0,ycero_ce=0,ypp_ce=0,ypg_ce=0;
float e1=-15,e2=-2.5,e3=0,e4=2.5,e5=15,e,ep=0;
float cex=-0.75,ce1=-0.5,ce2=-0.25,ce3=0,ce4=0.25,ce5=0.5,cey=0.75,ce;
float aux[25] = { 0,0,0,0,0,
                 0,0,0,0,0,
                 0,0,0,0,0,
                 0,0,0,0,0,
                 0,0,0,0,0};
float FUERZA[25]={ 0,0,0,0,0,
                  0,0,0,0,0,
                  0,0,0,0,0,
                  0,0,0,0,0,
                  0,0,0,0,0};
float A[25]={ 0,0,0,0,0,
             0,0,0,0,0,
             0,0,0,0,0,
             0,0,0,0,0,
             0,0,0,0,0};
float area = 0,F;
int16 ff;
float ref;

```

```

void main()
{ setup_compare(1,COMPARE_PWM | COMPARE_TIMER2 );
  //setup_timer2(TMR_INTERNAL|TMR_DIV_BY_256,1023);
  setup_timer2(TMR_INTERNAL|TMR_DIV_BY_64,1023);

  setup_adc_ports(sAN0 | sAN1 | sAN2 | sAN3);
  setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL | ADC_TAD_MUL_8);

  setup_spi( FALSE );

  setup_wdt(WDT_ON);
}

```

```

setup_timer1(TMR_DISABLED|TMR_DIV_BY_1);

lcd_init();

set_adc_channel(0);

while(TRUE)
{ ref = read_adc();
  t1 = ds1820_read_1();
  //t2 = ds1820_read_2();
  e = 35.0 - (float)(t1)/16.0;
  ce = e-ep;
  ep = e;
  // error
  yng_e=0;ynp_e=0;ycero_e=0;ypp_e=0;ypg_e=0;
  if(e<=e1)
  { yng_e=1; ynp_e=0; ycero_e=0; ypp_e=0; ypg_e=0;}
  else if(e>=e5)
  { yng_e=0; ynp_e=0; ycero_e=0; ypp_e=0; ypg_e=1;}
  else
  { if(e<=e2 && e>e1)
    { yng_e = y_recta(1,0,e1,e2,e);
      ynp_e = y_recta(0,1,e1,e2,e);}
    else if(e<=e3 && e>e2)
    { ynp_e = y_recta(1,0,e2,e3,e);
      ycero_e = y_recta(0,1,e2,e3,e);}
    else if(e<=e4 && e>e3)
    { ycero_e = y_recta(1,0,e3,e4,e);
      ypp_e = y_recta(0,1,e3,e4,e);}
    else
    { ypp_e = y_recta(1,0,e4,e5,e);
      ypg_e = y_recta(0,1,e4,e5,e);}
  }
  // cambio en el error
  yng_ce=0;ynp_ce=0;ycero_ce=0;ypp_ce=0;ypg_ce=0;
  if(ce<=ce1)
  { yng_ce = y_recta(0,1,cex,ce1,ce);
    if(yng_ce<=0) yng_ce = 0;
  }
  else if(ce>=ce5)
  { ypg_ce = y_recta(1,0,ce5,cey,ce);
    if(ypg_ce<=0) ypg_ce = 0;
  }
  else
  { if(ce<=ce2 && ce>ce1)
    { yng_ce = y_recta(1,0,ce1,ce2,ce);
      ynp_ce = y_recta(0,1,ce1,ce2,ce);}
    else if(ce<=ce3 && ce>ce2)

```

```

{ ynp_ce = y_recta(1,0,ce2,ce3,ce);
  ycero_ce = y_recta(0,1,ce2,ce3,ce);}
else if(ce<=ce4 && ce>ce3)
{ ycero_ce = y_recta(1,0,ce3,ce4,ce);
  ypp_ce = y_recta(0,1,ce3,ce4,ce);}
else
{ ypp_ce = y_recta(1,0,ce4,ce5,ce);
  ypg_ce = y_recta(0,1,ce4,ce5,ce);}
}

if(yng_e!=0)
{ if(yng_ce!=0){ FUERZA[0] = yng_e * yng_ce;   aux[0]=-2;}
  if(ynp_ce!=0){ FUERZA[1] = yng_e * ynp_ce;   aux[1]=-2;}
  if(ycero_ce!=0){ FUERZA[2] = yng_e * ycero_ce;   aux[2]=-2;}
  if(ypp_ce!=0){ FUERZA[3] = yng_e * ypp_ce;   aux[3]=-2;}
  if(ypg_ce!=0){ FUERZA[4] = yng_e * ypg_ce;   aux[4]=-1;}
}
if(ynp_e!=0)
{ if(yng_ce!=0){ FUERZA[5] = ynp_e * yng_ce;   aux[5]=-1;}
  if(ynp_ce!=0){ FUERZA[6] = ynp_e * ynp_ce;   aux[6]=-1;}
  if(ycero_ce!=0){ FUERZA[7] = ynp_e * ycero_ce;   aux[7]=-1;}
  if(ypp_ce!=0){ FUERZA[8] = ynp_e * ypp_ce;   aux[8]=-1;}
  if(ypg_ce!=0){ FUERZA[9] = ynp_e * ypg_ce;   aux[9]=-1;}
}
if(ycero_e!=0)
{ if(yng_ce!=0){ FUERZA[10] = ycero_e * yng_ce;   aux[10]=-2;}
  if(ynp_ce!=0){ FUERZA[11] = ycero_e * ynp_ce;   aux[11]=-1;}
  if(ycero_ce!=0){ FUERZA[12] = ycero_e * ycero_ce;   aux[12]=0;}
  if(ypp_ce!=0){ FUERZA[13] = ycero_e * ypp_ce;   aux[13]=1;}
  if(ypg_ce!=0){ FUERZA[14] = ycero_e * ypg_ce;   aux[14]=2;}
}
if(ypp_e!=0)
{ if(yng_ce!=0){ FUERZA[15] = ypp_e * yng_ce;   aux[15]=1;}
  if(ynp_ce!=0){ FUERZA[16] = ypp_e * ynp_ce;   aux[16]=1;}
  if(ycero_ce!=0){ FUERZA[17] = ypp_e * ycero_ce;   aux[17]=1;}
  if(ypp_ce!=0){ FUERZA[18] = ypp_e * ypp_ce;   aux[18]=1;}
  if(ypg_ce!=0){ FUERZA[19] = ypp_e * ypg_ce;   aux[19]=1;}
}
if(ypg_e!=0)
{ if(yng_ce!=0){ FUERZA[20] = ypg_e * yng_ce;   aux[20]=1;}
  if(ynp_ce!=0){ FUERZA[21] = ypg_e * ynp_ce;   aux[21]=2;}
  if(ycero_ce!=0){ FUERZA[22] = ypg_e * ycero_ce;   aux[22]=2;}
  if(ypp_ce!=0){ FUERZA[23] = ypg_e * ypp_ce;   aux[23]=2;}
  if(ypg_ce!=0){ FUERZA[24] = ypg_e * ypg_ce;   aux[24]=2;}
}
area = 0;
F = 0;
for(i=0; i<25; i++)

```

```

{ if(FUERZA[i]!=0)
  { A[i] = 682 * (FUERZA[i] - FUERZA[i]*FUERZA[i]*0.5);
  }
  else
  { A[i] = 0;
  }
  area = area + A[i];
  if (aux[i] == 0)
  { A[i] = A[i] * 0;
  }
  else if (aux[i] == -1)
  { A[i] = A[i] * -341;
  }
  else if (aux[i] == -2)
  { A[i] = A[i] * -682;
  }
  else if (aux[i] == 1)
  { A[i] = A[i] * 341;
  }
  else if (aux[i] == 2)
  {A[i] = A[i] * 682;
  }
  F = F + A[i];
}
F = F/area;
lcd_gotoxy(0,1);
printf(lcd_putc,"e=%f ce=%f",e,ce);
lcd_gotoxy(0,2);
printf(lcd_putc,"t=%f f=%f",(float)(t1)/16.0,F);
//ff = (int16)ceil(F);
ff = (int16)ceil(ref);
if(F>=0)
  SET_PWM_DUTY(1,ff);
else
  SET_PWM_DUTY(1,0);
//spi_write((int8)F);
}
}

```

APENDICE C
Código C PIC18F4550

```
unsigned char readbuff[32] absolute 0x500; // Buffers should be in USB RAM, please consult
datasheet
unsigned char writebuff[32] absolute 0x540;
//Pines de salida para el LCD
sbit LCD_D7 at RB7_bit;
sbit LCD_D6 at RB6_bit;
sbit LCD_D5 at RB5_bit;
sbit LCD_D4 at RB4_bit;
sbit LCD_EN at RB3_bit;
sbit LCD_RS at RB2_bit;
//Bits de configuración TRIS
sbit LCD_D7_Direction at TRISB7_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB6_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB3_bit;
sbit LCD_RS_Direction at TRISB2_bit;

unsigned cnt;
int aux=0;
char texto[10];
unsigned int temp1=0,temp2=0,temp3=0,temp4=0;
float pH1, pH2, pH3, pres;
unsigned long Radc1,Radc2,Radc3,Radc4;
// RTC
unsigned char sec, min1, hr, week_day, day, mn, year;
char *txt, tnum[4];

onewire(int pin){
  unsigned temp;
  short busy=0;
  Ow_Reset(&PORTD,pin);           // Onewire reset signal
  Ow_Write(&PORTD,pin, 0xCC);     // Issue command SKIP_ROM
  Ow_Write(&PORTD,pin, 0x44);     // Issue command CONVERT_T
  while(busy == 0)
    busy = Ow_Read(&PORTD,pin);
  Ow_Reset(&PORTD,pin);
  Ow_Write(&PORTD,pin,0xCC);      // Issue command SKIP_ROM
  Ow_Write(&PORTD,pin,0xBE);      // Issue command READ_SCRATCHPAD
  temp=Ow_Read(&PORTD,pin);
  temp=(Ow_Read(&PORTD,pin)<<8)+temp;
  return(temp);
}

void Write_Time(void){
```



```

I2C1_Init(100000); // initialize full master mode
I2C1_Start();     // issue start signal
I2C1_Wr(0xD0);   // address DS1307
I2C1_Wr(0);      // start from word at address (REG0)
I2C1_Wr(0x80);   // write $80 to REG0. (pause counter + 0 sec)
I2C1_Wr(0x19);   // write 0 to minutes word to (REG1)
I2C1_Wr(0x18);   // write 17 to hours word (24-hours mode)(REG2)
I2C1_Wr(0x04);   // write 2 - Monday (REG3)
I2C1_Wr(0x17);   // write 4 to date word (REG4)
I2C1_Wr(0x04);   // write 5 (May) to month word (REG5)
I2C1_Wr(0x03);   // write 01 to year word (REG6)
I2C1_Stop();     // issue stop signal

I2C1_Start();    // issue start signal
I2C1_Wr(0xD0);   // address DS1307
I2C1_Wr(0);     // start from word at address 0
I2C1_Wr(0);     // write 0 to REG0 (enable counting + 0 sec)
I2C1_Stop();    // issue stop signal
}

void Read_Time(char *sec, char *min, char *hr, char *week_day, char *day, char *mn, char *year)
{
I2C1_Start();
I2C1_Wr(0xD0);
I2C1_Wr(0);
I2C1_Repeated_Start();
I2C1_Wr(0xD1);
*sec =I2C1_Rd(1);
*min =I2C1_Rd(1);
*hr =I2C1_Rd(1);
*week_day =I2C1_Rd(1);
*day =I2C1_Rd(1);
*mn =I2C1_Rd(1);
*year =I2C1_Rd(0);
I2C1_Stop();
}

void Transform_Time(char *sec, char *min, char *hr, char *week_day, char *day, char *mn, char
*year) {
*sec = ((*sec & 0x70) >> 4)*10 + (*sec & 0x0F);
*min = ((*min & 0xF0) >> 4)*10 + (*min & 0x0F);
*hr = ((*hr & 0x30) >> 4)*10 + (*hr & 0x0F);
*week_day =(*week_day & 0x07);
*day = ((*day & 0xF0) >> 4)*10 + (*day & 0x0F);
*mn = ((*mn & 0x10) >> 4)*10 + (*mn & 0x0F);
*year = ((*year & 0xF0)>>4)*10+(*year & 0x0F);
}

```

```

void Display_Time(char sec, char min, char hr, char week_day, char day, char mn, char year) {
    LCD_Chr(1,8,':');
    LCD_Chr(1,11,':');
    txt = "BioD";
    LCD_Out(2,1,txt);
    LCD_Chr(2,8,':');
    LCD_Chr(2,11,':');
    txt = "201";
    LCD_Out(1,12,txt);
    switch(week_day){
        case 1: txt="Dom"; break;
        case 2: txt="Lun"; break;
        case 3: txt="Mar"; break;
        case 4: txt="Mie"; break;
        case 5: txt="Jue"; break;
        case 6: txt="Vie"; break;
        case 7: txt="Sab"; break;
    }
    txt = "UAQ";
    LCD_Out(1,1,txt);
    Lcd_Chr(1, 6, (day / 10) + 48); // Print tens digit of day variable
    Lcd_Chr(1, 7, (day % 10) + 48); // Print oness digit of day variable
    Lcd_Chr(1, 9, (mn / 10) + 48);
    Lcd_Chr(1,10, (mn % 10) + 48);
    Lcd_Chr(1,15, year + 48); // Print year vaiable + 8 (start from year 2008)

    Lcd_Chr(2, 6, (hr / 10) + 48);
    Lcd_Chr(2, 7, (hr % 10) + 48);
    Lcd_Chr(2, 9, (min / 10) + 48);
    Lcd_Chr(2,10, (min % 10) + 48);
    Lcd_Chr(2,12, (sec / 10) + 48);
    Lcd_Chr(2,13, (sec % 10) + 48);
}

void Init_Main() {
    Lcd_Init(); // Initialize LCD
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear LCD display
    Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Turn cursor off

    I2C1_Init(100000); // initialize I2C
    LCD_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
}

void interrupt(){
    if(INTCON.TMR0IF==0)
        USB_Interrupt_Proc(); // USB servicing is done inside the interrupt
    else
    {

```

```

switch(aux){
case 0:
    temp1 = onewire(0);
    break;

case 1:
    temp2 = onewire(1);
    break;

case 2:
    temp3 = onewire(2);
    break;

case 3:
    temp4 = onewire(3);
    break;
}
aux = aux + 1;
if (aux>=4)
    aux=0;
INTCON.TMROIF=0;
}
}

void case0(){
    Read_Time(&sec,&min1,&hr,&week_day,&day,&mn,&year); // lee el tiempo del RTC(DS1307)
    Transform_Time(&sec,&min1,&hr,&week_day,&day,&mn,&year); // da formato a la fecha y hora
    Display_Time(sec, min1, hr, week_day, day, mn, year); // muestra en el LCD
}

void case1(){
    if(PORTC.F6 == 0){
        writebuff[17]=0x00;
        Lcd_Out(1,1,"Carga de mezcla:");
        Lcd_Out(2,1,"Si=Ok No=Menu");
        if(Button(&PORTC,2,100,1)){
            PORTC.F6=1;
            PORTC.F2=0;
        }
        else
            PORTC.F6=0;
        while(Button(&PORTC,2,100,1));
    }
    else{
        writebuff[17]=0x01;
        Lcd_Out(1,1,"Carga de mezcla:");
        Lcd_Out(2,1,"Apagar=Ok ");
        if(Button(&PORTC,2,100,1)){

```

```

        PORTC.F6=0;
        PORTC.F2=0;
    }
    else
        PORTC.F6=1;
        while(Button(&PORTC,2,100,1));
    }
}

```

```

void case2(){
    Lcd_Out(1,1,"Temp 3");
    FloattoStr(((float)(temp3)/16),txt);
    Lcd_Out(2,2,txt);
    delay_ms(500);

    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    Lcd_Out(1,1,"pH1");
    FloattoStr(pH1,txt);
    Lcd_Out(2,2,txt);
    delay_ms(500);

    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    Lcd_Out(1,1,"pH2");
    FloattoStr(pH2,txt);
    Lcd_Out(2,2,txt);
    delay_ms(500);

    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    Lcd_Out(1,1,"Presion");
    FloattoStr(pres,txt);
    Lcd_Out(2,2,txt);
    delay_ms(500);
}

```

```

void main(void){
    int enviar,menu=0,menup=0;
    int kk;
    unsigned short time=0;
    // Disable all interrupts
    //INTCON = 0;           // Disable GIE, PEIE, TMROIE,INTOIE,RBIE
    RCON.IPEN = 0;       // Disable Priority Levels on interrupts
    INTCON = 0b11100000;
    INTCON2 = 0b11110101;
    INTCON3 = 0b11000000;
    PIR1 = 0;
    PIR2 = 0;
    PIE1 = 0;
    PIE2 = 0;
}

```

```

TOCON = 0b10000101; // TMR0ON/8/16bits/source/transition/prescaler 1=not/prescaler value
2:0
INTCON.TMR0IF = 0; // TMR0 flag=0
ADCON1= 0b00001001; // analog input AN0, AN1, AN2, AN3 con VSS Y VDD de referencia
CMCON |= 7; // Disable comparators
TRISA = 0b11111111; // PORTA Input
TRISB = 0b11000000;
TRISD = 0b00000000;
TRISC = 0b00000000;
PORTC = 0b00000000;

HID_Enable(&readbuff,&writebuff); // Enable HID communication
delay_ms(20);
Lcd_Init(); // Inicio del LCD.
Lcd_Out(1,1,"BIODIGESTOR 1.0");
//Write_Time(); // Descomentar solo para ajustar fecha y hora
Init_Main();
while(1)
{
    if(Button(&PORTC,1,100,1)){
        menu = menu + 1;
        PORTC.F1 =0;
    }
    else
        menu = menu;
    if(menuup != menu)
        Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    menuup = menu;

    switch(menu){
    case 0:
        case0();
        break;

    case 1:
        case1();
        break;

    case 2:
        pH1 = (float)((Radc2/1023.0)*5.17);
        if (pH1 <= 2.5)
            pH1 = (-2.84499054 * pH1 + 14.11247637);
        else
            pH1 = (-2.84499054 * pH1 + 14.11247637);

        pH2 = (float)((Radc3/1023.0)*5.17);
        if (pH2 <= 2.5)
            pH2 = (-2.84499054 * pH2 + 14.11247637);

```

```

else
    pH2 = (-2.84499054 * pH2 + 14.11247637);

    pres = (float)(((Radc4/1023.0)*5.17)+0.000);
    pres = 53.19148936*pres-10.63829787;
    case2();
break;

default:
    menu=0;
    menup=0;
break;
}
if(hr==7 | hr==8 | hr==15 | hr==16 | hr==23 | hr==0)
    PORTC.F0=1;
else
    PORTC.F0=0;

// Rutina USB y lectura de ADC's
HID_Read();
delay_ms(20);
kk = readbuff[0];
Radc1 = ADC_Read(0); // Lectura ADC canal 0
delay_us(10);
Radc2 = ADC_Read(1); // Lectura ADC canal 1
delay_us(10);
Radc3 = ADC_Read(2); // Lectura ADC canal 2
delay_us(10);
Radc4 = ADC_Read(3); // Lectura ADC canal 5
delay_us(10);
if (PORTC.F0==1) // Envía información del proceso de mezclado
    enviar = 1;
if (PORTC.F0==0)
    enviar = 0;
writebuff[0]=enviar; // Asignación de buffer de salida USB
writebuff[1]=(temp1>>8);
writebuff[2]=(temp1);
writebuff[3]=(temp2>>8);
writebuff[4]=(temp2);
writebuff[5]=(temp3>>8);
writebuff[6]=(temp3);
writebuff[7]=(temp4>>8);
writebuff[8]=(temp4);
writebuff[9]=(Radc1>>8);
writebuff[10]=(Radc1);
writebuff[11]=(Radc2>>8);
writebuff[12]=(Radc2);
writebuff[13]=(Radc3>>8);

```

```

    writebuff[14]=(Radc3);
    writebuff[15]=(Radc4>>8);
    writebuff[16]=(Radc4);
    for(cnt=18;cnt<32;cnt++) // Rellena con 0 los espacios del buffer restantes
        writebuff[cnt]=0;
    HID_Write(&writebuff,32); // Escritura USB
}
HID_Disable();
}

// USB Descriptor
const unsigned int USB_VENDOR_ID = 0x1781;
const unsigned int USB_PRODUCT_ID = 0x07D0;
const char USB_SELF_POWER = 0x80; // Self powered 0xC0, 0x80 bus powered
const char USB_MAX_POWER = 50; // Bus power required in units of 2 mA
const char HID_INPUT_REPORT_BYTES = 32;
const char HID_OUTPUT_REPORT_BYTES = 32;
const char USB_TRANSFER_TYPE = 0x03; //0x03 Interrupt
const char EP_IN_INTERVAL = 1;
const char EP_OUT_INTERVAL = 1;

const char USB_INTERRUPT = 1;
const char USB_HID_EP = 1;

const char USB_HID_RPT_SIZE = 33;

/* Device Descriptor */
const struct {
    char bLength; // bLength - Descriptor size in bytes (12h)
    char bDescriptorType; // bDescriptorType - The constant DEVICE (01h)
    unsigned int bcdUSB; // bcdUSB - USB specification release number (BCD)
    char bDeviceClass; // bDeviceClass - Class Code
    char bDeviceSubClass; // bDeviceSubClass - Subclass code
    char bDeviceProtocol; // bDeviceProtocol - Protocol code
    char bMaxPacketSize0; // bMaxPacketSize0 - Maximum packet size for endpoint 0
    unsigned int idVendor; // idVendor - Vendor ID
    unsigned int idProduct; // idProduct - Product ID
    unsigned int bcdDevice; // bcdDevice - Device release number (BCD)
    char iManufacturer; // iManufacturer - Index of string descriptor for the manufacturer
    char iProduct; // iProduct - Index of string descriptor for the product.
    char iSerialNumber; // iSerialNumber - Index of string descriptor for the serial number.
    char bNumConfigurations; // bNumConfigurations - Number of possible configurations
} device_dsc = {
    0x12, // bLength
    0x01, // bDescriptorType
    0x0200, // bcdUSB
    0x00, // bDeviceClass
    0x00, // bDeviceSubClass

```

```

0x00,          // bDeviceProtocol
8,            // bMaxPacketSize0
USB_VENDOR_ID, // idVendor
USB_PRODUCT_ID, // idProduct
0x0001,       // bcdDevice
0x01,         // iManufacturer
0x02,         // iProduct
0x00,         // iSerialNumber
0x01          // bNumConfigurations
};

/* Configuration 1 Descriptor */
const char configDescriptor1[] = {
    // Configuration Descriptor
    0x09,          // bLength - Descriptor size in bytes
    0x02,          // bDescriptorType - The constant CONFIGURATION (02h)
    0x29,0x00,     // wTotalLength - The number of bytes in the configuration descriptor
and all of its subordinate descriptors
    1,             // bNumInterfaces - Number of interfaces in the configuration
    1,             // bConfigurationValue - Identifier for Set Configuration and Get Configuration
requests
    0,             // iConfiguration - Index of string descriptor for the configuration
    USB_SELF_POWER, // bmAttributes - Self/bus power and remote wakeup settings
    USB_MAX_POWER, // bMaxPower - Bus power required in units of 2 mA

    // Interface Descriptor
    0x09,          // bLength - Descriptor size in bytes (09h)
    0x04,          // bDescriptorType - The constant Interface (04h)
    0,             // bInterfaceNumber - Number identifying this interface
    0,             // bAlternateSetting - A number that identifies a descriptor with alternate settings
for this bInterfaceNumber.
    2,             // bNumEndpoint - Number of endpoints supported not counting endpoint zero
    0x03,          // bInterfaceClass - Class code
    0,             // bInterfaceSubclass - Subclass code
    0,             // bInterfaceProtocol - Protocol code
    0,             // iInterface - Interface string index

    // HID Class-Specific Descriptor
    0x09,          // bLength - Descriptor size in bytes.
    0x21,          // bDescriptorType - This descriptor's type: 21h to indicate the HID class.
    0x01,0x01,     // bcdHID - HID specification release number (BCD).
    0x00,          // bCountryCode - Numeric expression identifying the country for localized
hardware (BCD) or 00h.
    1,             // bNumDescriptors - Number of subordinate report and physical descriptors.
    0x22,          // bDescriptorType - The type of a class-specific descriptor that follows
    USB_HID_RPT_SIZE,0x00, // wDescriptorLength - Total length of the descriptor identified above.

    // Endpoint Descriptor

```



```

0x07,          // bLength - Descriptor size in bytes (07h)
0x05,          // bDescriptorType - The constant Endpoint (05h)
USB_HID_EP | 0x80, // bEndpointAddress - Endpoint number and direction
USB_TRANSFER_TYPE, // bmAttributes - Transfer type and supplementary information
0x40,0x00,     // wMaxPacketSize - Maximum packet size supported
EP_IN_INTERVAL, // bInterval - Service interval or NAK rate

// Endpoint Descriptor
0x07,          // bLength - Descriptor size in bytes (07h)
0x05,          // bDescriptorType - The constant Endpoint (05h)
USB_HID_EP,    // bEndpointAddress - Endpoint number and direction
USB_TRANSFER_TYPE, // bmAttributes - Transfer type and supplementary information
0x40,0x00,     // wMaxPacketSize - Maximum packet size supported
EP_OUT_INTERVAL // bInterval - Service interval or NAK rate
};

const struct {
    char report[USB_HID_RPT_SIZE];
}hid_rpt_desc =
{
    {0x06, 0x00, 0xFF, // Usage Page = 0xFF00 (Vendor Defined Page 1)
    0x09, 0x01, // Usage (Vendor Usage 1)
    0xA1, 0x01, // Collection (Application)
    // Input report
    0x19, 0x01, // Usage Minimum
    0x29, 0x40, // Usage Maximum
    0x15, 0x00, // Logical Minimum (data bytes in the report may have minimum value =
0x00)
    0x26, 0xFF, 0x00, // Logical Maximum (data bytes in the report may have maximum value =
0x00FF = unsigned 255)
    0x75, 0x08, // Report Size: 8-bit field size
    0x95, HID_INPUT_REPORT_BYTES, // Report Count
    0x81, 0x02, // Input (Data, Array, Abs)
    // Output report
    0x19, 0x01, // Usage Minimum
    0x29, 0x40, // Usage Maximum
    0x75, 0x08, // Report Size: 8-bit field size
    0x95, HID_OUTPUT_REPORT_BYTES, // Report Count
    0x91, 0x02, // Output (Data, Array, Abs)
    0xC0} // End Collection
};

//Language code string descriptor
const struct {
    char bLength;
    char bDscType;
    unsigned int string[1];
} strd1 = {

```

```

    4,
    0x03,
    {0x0409}
};

//Manufacturer string descriptor
const struct{
    char bLength;
    char bDscType;
    unsigned int string[9];
}strd2={
    20,      //sizeof this descriptor string
    0x03,
    {'M','i','k','r','o','C',' ',' ',' '}}
};

//Product string descriptor
const struct{
    char bLength;
    char bDscType;
    unsigned int string[15];
}strd3={
    32,      //sizeof this descriptor string
    0x03,
    {'U','S','B',' ','H','I','D',' ','L','i','b','r','a','r','y'}}
};

//Array of configuration descriptors
const char* USB_config_dsc_ptr[1];

//Array of string descriptors
const char* USB_string_dsc_ptr[3];

void USB_Init_Desc(){
    USB_config_dsc_ptr[0] = &configDescriptor1;
    USB_string_dsc_ptr[0] = (const char*)&strd1;
    USB_string_dsc_ptr[1] = (const char*)&strd2;
    USB_string_dsc_ptr[2] = (const char*)&strd3;
}

```