

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**APLICACIÓN DEL CONTROL DIFUSO DE LA TEMPERATURA EN
UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO PARA LA GENERACIÓN
DE BIOGÁS EN CONDICIONES DE
INVERNADERO EN TACNA**

TESIS

PRESENTADA POR:

M.Sc. JORGE LUIS LOZANO CERVERA

Para optar el Grado Académico de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

TACNA - PERÚ

2015



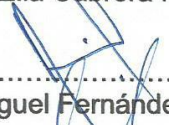
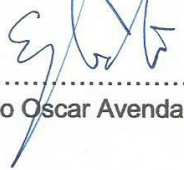
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**APLICACIÓN DEL CONTROL DIFUSO DE LA TEMPERATURA EN
UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO PARA LA GENERACIÓN
DE BIOGÁS EN CONDICIONES DE
INVERNADERO EN TACNA**

Tesis sustentada y aprobada el 25 de agosto del 2015; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE	:	 Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco
SECRETARIA	:	 Dra. María Elia Cabrera Navarrete
MIEMBRO	:	 Dr. Julio Miguel Fernández Prado
ASESOR	:	 Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

DEDICATORIA

A Dios,

Por darme la vida y permitirme culminar mis estudios con éxito, por darme la fuerza necesaria para sobreponerme ante cualquier adversidad.

A mis Padres,

Arturo y Tula (+) por su amor y por crear en mí el deseo de superación y triunfo, e inculcarme que con constancia y perseverancia se pueden cumplir los sueños. Por su ejemplo de amor.

A mi esposa Rosa y a mis hijos Stefany y Jorge, por su amor, apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Escuela de Posgrado de la **UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**, por permitirme culminar satisfactoriamente la presente investigación y obtener el Grado Académico de Doctor en Ciencias Ambientales. Del mismo modo, agradezco, a todos los docentes que han contribuido con sus sabias enseñanzas en mi formación profesional.

Deseo expresar mi agradecimiento a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohomann y en particular al laboratorio de física y química por abrir sus puertas para la realización del presente estudio.

El autor

En ciencia, lo importante es modificar
y cambiar las propias ideas a medida
que la ciencia progresa.

Claude Bernard

CONTENIDO

Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Resumo.....	xviii
Introducción.....	1
I. Capítulo I. Planteamiento del problema.....	9
1.1. Descripción del problema.....	9
1.2. Formulación del problema.....	21
1.3. Justificación e importancia de la investigación.....	21
1.4. Alcances y limitaciones.....	25
1.5. Objetivos.....	27
1.6. Hipótesis.....	27
II. Capítulo II. Marco teórico.....	29
2.1. Antecedentes del estudio.....	29
2.2. Bases teóricas.....	36
2.2.1. Estado actual del conocimiento sobre el tema.....	36
2.2.2. Biogás.....	39
2.2.3. Etapas del proceso de la digestión anaeróbica.....	51
2.2.4. Parámetros que afectan al proceso de digestión.....	65
2.2.5. Pre tratamiento del sustrato en la producción de biogás en biodigestores.....	74
2.2.6. Codigestión.....	76

2.2.7. Beneficios aportados por el biogás desde el punto de vista energético, medioambiental, económico y socioeconómico.....	77
2.2.8. Adopción de una perspectiva teórica.....	79
2.2.9. Diseño e implementación del sistema de control.....	107
2.3. Definición de términos.....	109
III. Capítulo III. Marco Metodológico.....	112
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	112
3.2. Métodos.....	112
3.2.1. Objetivo 1.....	112
3.2.2. Objetivo 2.....	131
IV. Capítulo IV. Resultados.....	151
V. Capítulo V. Discusión.....	194
Conclusiones.....	195
Recomendaciones.....	197
Referencias Bibliográficas.....	199
Referencias Electrónicas.....	207
ANEXOS.....	209
Anexo 1. Código fuente en Lenguaje C.....	210
Anexo 2. PIC 18F4550.....	215
Anexo 3. Datasheet del sensor LM35.....	217
Anexo 4. Costos.....	218
Anexo 5. Fotografías del módulo de control difuso de temperatura	224

Índice de tablas

Tabla 1.	Características del biogás de vertedero.....	45
Tabla 2.	Compuestos del biogás (%)......	48
Tabla 3.	Producción del biogás en función del sustrato utilizado	48
Tabla 4.	Comparación de las necesidades del hábitat de bacterias implicadas en la producción de biogás.....	58
Tabla 5.	Rendimiento de la materia prima empleada.....	65
Tabla 6.	Relación carbono/nitrógeno de acuerdo al origen de la materia orgánica.....	67
Tabla 7.	Intervalos de temperaturas en las que trabajan las bacterias anaeróbicas.....	68
Tabla 8.	Intervalos de concentraciones en el sustrato que resultan tóxicos.....	72
Tabla 9.	Valores de las concentraciones de inhibidores comunes.....	73
Tabla 10.	Reglas de control difuso.....	119
Tabla 11.	Reglas controlador difuso tipo sí/entonces.....	119
Tabla 12.	Características del biodigestor.....	142
Tabla 13.	Composición de la materia orgánica de residuos de fruta.....	156
Tabla 14.	Componentes del biogás de residuos de fruta.....	157
Tabla 15.	Presión generada del biogás de residuos de fruta.....	158
Tabla 16.	Composición de la materia orgánica de residuos de vegetales.....	160

Tabla 17.	Componentes del biogás de residuos de vegetales.....	161
Tabla 18.	Presión generada del biogás de residuos de vegetales.	162
Tabla 19.	Composición de la materia orgánica de residuos de comida.....	164
Tabla 20.	Componentes del biogás de residuos de comida.....	165
Tabla 21.	Presión del biogás de residuos de comida.....	166
Tabla 22.	Composición de materia orgánica de residuos de fruta, vegetales y comida.....	168
Tabla 23.	Componentes del biogás de residuos de fruta, vegetales y comida.....	169
Tabla 24.	Presión generada del biogás de residuos de fruta, vegetales y comida.....	170
Tabla 25.	Composición de la materia orgánica de residuos de comida.....	174
Tabla 26.	Componentes del biogás generado con residuos de comida a temperatura ambiente.....	175
Tabla 27.	Presión generada del biogás con residuos de comida a temperatura ambiente.....	177
Tabla 28.	Resultados estadísticos para el biogás (CH ₄) generado con residuos de fruta.....	182
Tabla 29.	Resultados estadísticos para el biogás (CH ₄) generado con residuos de vegetales.....	183
Tabla 30.	Resultados estadísticos para el biogás (CH ₄) generado con residuos de comida.....	185
Tabla 31.	Resultados estadísticos para el biogás (CH ₄) generado con residuos de fruta, vegetales y comida.....	186

Tabla 32.	Resultados estadísticos para el biogás (CH ₄) generado con los residuos de comida a temperatura ambiente....	188
Tabla 33.	Resumen de las características más significativas de los sustratos agroindustriales más habituales.....	191
Tabla 34.	Medidas de resumen estadístico para el biogás (CH ₄) generado con los diferentes tipos de residuos según la prueba de contraste.....	192
Tabla 35.	ANOVA aplicado a la comparación de sustratos.....	193
Tabla 36.	Costo diseño matemático.....	218
Tabla 37.	Costo de materiales del hardware.....	219
Tabla 38.	Costo diseño y construcción del hardware.....	221
Tabla 39.	Costo diseño del software.....	222
Tabla 40.	Costo del biodigestor.....	223
Tabla 41.	Costo total – módulo de control.....	223

Índice de figuras

Figura 1.	Vertedero municipal de Tacna.....	37
Figura 2.	Etapas en la producción de metano a partir de residuos orgánicos.....	41
Figura 3.	Criterios de equivalencia energética del biogás respecto de otras fuentes de energía.....	50
Figura 4.	Biodigestor tipo Batch.....	60
Figura 5.	Digestor de mezcla completa.....	61
Figura 6.	Digestor tipo Hindú.....	62
Figura 7.	Digestores de régimen continuo.....	63
Figura 8.	Lógica booleana vs. Lógica difusa.....	82
Figura 9.	Relación de un controlador difuso con un lazo de control.....	82
Figura 10.	Controlador difuso.....	83
Figura 11.	Funciones de pertenencia y etiquetas lingüísticas.....	85
Figura 12.	Función triangular.....	86
Figura 13.	Función trapezoidal.....	86
Figura 14.	Función gaussiana.....	87
Figura 15.	Regla tipo Mamdani.....	90
Figura 16.	Regla tipo Sugeno.....	91
Figura 17.	Difusor.....	91
Figura 18.	Máquina de inferencia.....	92
Figura 19.	Concesor.....	93
Figura 20.	Representación del centroide.....	94
Figura 21.	Arquitectura de un CLF.....	98
Figura 22.	Distribución PIC 18F4550.....	103

Figura 23.	Diagrama de bloques para el software de la herramienta.....	106
Figura 24.	Esquema general del módulo de control.....	114
Figura 25.	Aplicación Fuzzy Matlab.....	122
Figura 26.	Interfaz Fuzzy Matlab.....	123
Figura 27.	Conjunto difuso de la entrada error en Matlab.....	123
Figura 28.	Conjunto difuso de la salida voltaje en Matlab.....	124
Figura 29.	Reglas difusas en Matlab.....	124
Figura 30.	Visualización de reglas en Matlab.....	125
Figura 31.	Resultados del algoritmo difuso en Matlab.....	126
Figura 32.	Simulación de modo constante del error de la temperatura en simulink de Matlab.....	129
Figura 33.	Activación de las reglas de control Fuzzy en simulink de Matlab.....	129
Figura 34.	Simulación de modo aleatorio del error de la temperatura en simulink de Matlab.....	130
Figura 35.	Diagrama de bloques del hardware.....	132
Figura 36.	Diagrama esquemático detección cruce por cero de una señal de voltaje alterna.....	133
Figura 37.	Detección de cruce por cero con lm311. Simulación en software Proteus.....	134
Figura 38.	PIC18F4550 – Control principal.....	135
Figura 39.	Hardware set point.....	135
Figura 40.	Hardware pantalla LCD 16x12.....	136
Figura 41.	Conexión del hardware de potencia.....	137
Figura 42.	Estructura interna de un biodigestor aneróbico.....	139
Figura 43.	Componentes del funcionamiento del biodigestor.....	140
Figura 44.	Porcentaje de carga.....	141

Figura 45.	Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura basado en microprocesador.....	144
Figura 46.	Diagrama de bloques del sistema de control.....	145
Figura 47.	Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el microcontrolador.....	146
Figura 48.	Diagrama de flujo de la rutina de interrupciones.....	148
Figura 49.	Diagrama de flujo de la rutina fuzzy.....	149
Figura 50.	Respuesta del sistema de control difuso basado en microcontrolador.....	151
Figura 51.	Respuesta del sistema de control para diferentes temperaturas.....	152
Figura 52.	Potenciómetro Hanna pH 210.....	154
Figura 53.	Analizador de gases AGS-688.....	155
Figura 54.	Manómetro de presión Fimet.....	156
Figura 55.	Generación de biogás, con residuos de fruta (35 °C)...	157
Figura 56.	Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH ₄ y CO ₂ del biogás.....	158
Figura 57.	Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de fruta.....	159
Figura 58.	Biogás almacenado de residuos de fruta.....	159
Figura 59.	Generación de biogás con residuos de vegetales (35°C).....	161
Figura 60.	Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH ₄ y CO ₂ del biogás.....	162
Figura 61.	Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de vegetales.....	163
Figura 62.	Biogás almacenado con residuos de vegetales.....	163
Figura 63.	Generación de biogás con residuos de comida (35 °C)	165

Figura 64.	Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH ₄ y CO ₂ del biogás.....	166
Figura 65.	Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de comida.....	167
Figura 66.	Biogás almacenado de residuos de comida.....	167
Figura 67.	Generación de biogás con residuos de fruta, vegetales y comida (35 °C).....	169
Figura 68.	Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH ₄ y CO ₂ del biogás.....	170
Figura 69.	Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de fruta, vegetales y comida.....	171
Figura 70.	Generación de biogás a temperatura de 35 °C, con diferentes tipos de residuos.....	172
Figura 71.	Variación de la presión respecto al tiempo, con diferentes tipos de residuos.....	172
Figura 72.	Tratamiento convencional para generar biogás a un biodigestor a temperatura ambiente.....	173
Figura 73.	Variaciones de la temperatura en el biodigestor durante los meses de abril, mayo (2015).....	174
Figura 74.	Generación de biogás con residuos de comida a temperatura ambiente.....	176
Figura 75.	Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH ₄ y CO ₂ del biogás.....	176
Figura 76.	Variación de la presión respecto al tiempo de residuos de comida a temperatura ambiente.....	177
Figura 77.	Efectos de la temperatura en la calidad del biogás (CH ₄) a 35 °C y a temperatura ambiente.....	178

Figura 78.	Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de frutas, vegetales y comida (35 °C y temperatura ambiente).....	179
Figura 79.	Relación entre el tiempo y el biogás (CH ₄) en el biodigestor para residuos de fruta.....	182
Figura 80.	Relación entre el tiempo y el biogás (CH ₄) para residuos de vegetales.....	184
Figura 81.	Relación entre el tiempo y el biogás (CH ₄) en el biodigestor para residuos de comida.....	185
Figura 82.	Relación entre el tiempo y el biogas (CH ₄) en el biodigestor para residuos de fruta, vegetales y comida	187
Figura 83.	Relación entre el tiempo y el biogás (CH ₄) en el biodigestor a temperatura ambiente.....	188
Figura 84.	Gráfico de cajas para los residuos de frutas, vegetales y comida (35 °C) y de comida (temperatura ambiente) en un biodigestor.....	190
Figura 85.	PIC 18F4550.....	215
Figura 86.	PIC 18F4550 – conexiones.....	216
Figura 87.	Sensor LM35.....	217
Figura 88.	Módulo de control difuso de temperatura en el biodigestor.....	224
Figura 89.	Manómetro de control de la presión en el biodigestor..	224
Figura 90.	Bomba de recirculación de agua en la chaqueta del biodigestor.....	225
Figura 91.	Pantalla LCD 16x12, control de temperatura.....	225
Figura 92.	Circuitería interna en el módulo de control de temperatura.....	226

Figura 93.	Extracción y almacenamiento del biogás del biodigestor.....	226
Figura 94.	Biol extraído del biodigestor.....	227
Figura 95.	Biosol extraído del biodigestor.....	227

RESUMEN

La búsqueda de alternativas energéticas de origen renovable y la disminución de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de los residuos orgánicos hacen del biogás una opción para la sustitución de combustibles fósiles y para la valorización energética de residuos orgánicos. Se desarrolló un sistema de control de temperatura basado en la lógica difusa, La integración del sistema se lleva a cabo mediante el software Matlab y su *toolbox fuzzy logic* el cual se implementó en un microprocesador PIC 18F4550 de 8 bits, que realiza la comunicación entre el sensor que monitorea el comportamiento de la temperatura y el algoritmo de control aplicado a conservar el biodigestor en la temperatura fijada, lo que permite una mejor biodigestión anaeróbica. Mediante este proceso se logró transformar los residuos orgánicos en materiales valorizables, concretamente en biogás y compost. Los resultados muestran que con un control difuso de temperatura en el biodigestor, se genera biogás con una concentración volumétrica de metano tres veces más que lo que se genera en el biodigestor a temperatura ambiente.

Palabras clave: control difuso, microprocesador, digestión anaeróbica, residuos orgánicos, biodigestor, biogás.

ABSTRACT

The search for alternative renewable energy and reduced greenhouse gases from the decomposition of organic waste biogas make a choice for the replacement of fossil fuels and for energy recovery from organic waste. A system of temperature control based on fuzzy logic, system integration is performed using Matlab software and fuzzy logic toolbox which was implemented on a PIC 18F4550 8 bit microprocessor, which performs communication between developed the sensor that monitors the behavior of the temperature control algorithm and applied to keep the digester at the set temperature, allowing better anaerobic biodigestion. Through this process it was possible to transform organic waste into recoverable materials, specifically into biogas and compost. The results show that a fuzzy control of temperature in the digester, biogas is generated with a volumetric methane concentration three times more than what is generated in the digester at ambient temperature.

Key words: fuzzy control, microprocessor, anaerobic digestion, organic waste, digester, biogas.

RESUMO

A busca por energias alternativas renováveis e redução de gases de efeito estufa resultantes da decomposição de resíduos orgânicos biogás fazer uma escolha para a substituição dos combustíveis fósseis e para a recuperação de energia a partir de resíduos orgânicos. Um sistema de controle de temperatura baseado em lógica fuzzy, a integração do sistema é realizada através do software Matlab e distorcido toolbox lógica que foi implementado em um PIC 18F4550 microprocessador de 8 bit, que realiza a comunicação entre desenvolveu o sensor que monitoriza o comportamento do algoritmo de controlo de temperatura e aplicado para manter o digestor à temperatura estabelecida, o que permite melhor biodigest anaeróbio. Através deste processo, foi possível transformar resíduos orgânicos em materiais recuperáveis, especificamente em biogás e de compostagem. Os resultados mostram que um controle fuzzy de temperatura no digestor, o biogás é gerado com uma concentração volumétrica de metano três vezes mais do que o que é gerado no digestor à temperatura ambiente .

Palavras-chave: controle difuso, microprocessadores, digestão anaeróbia, resíduos orgânicos, digestor, biogás .

INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental es un asunto de indiscutible importancia y actualidad, que exige un tratamiento específico para ser abordado de manera sistemática. Las cuestiones ambientales son complejas y requieren soluciones urgentes y acertadas, pero fundamentalmente sostenibles. Cada vez se hace más necesario proyectar el futuro con desarrollo sostenible para el ser humano y para el medio ambiente.

Las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas hasta en un 90 % con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas licuado de petróleo, carbón), todos ellos extinguidos en un futuro cercano, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente (Barrena & Gamarra, 2010). De igual manera, los apuros de energía en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo, obliga a los pobladores a utilizar a gran escala leña (para lo cual deforesta) y desperdicios agrícolas secos (estiércol y residuos de cosecha) (Liriano, 2005).

Es así que esta problemática, plantea la necesidad de encontrar una tecnología apropiada, utilizando recursos locales disponibles como son los residuos orgánicos (heces humanas, estiércoles, residuos orgánicos y plantas), los cuales pueden ser usados como medio para producir energía (biogás) y biofertilizantes mediante biodigestores (Barrena et ál., 2010);

(Liriano, 2005). De esta manera se mejorará la vida de los campesinos, se incrementará la producción agrícola y se preservará el medio ambiente (Barrena et ál., 2010).

La libre disposición de estiércol de ganado en el campo o su tratamiento inadecuado lo convierte en una fuente de contaminación ambiental y en un foco infeccioso para seres humanos, puesto que propicia el desarrollo de vectores de enfermedades (Liriano, 2005). La aplicación del estiércol fresco o seco como fertilizante no es bueno para la agricultura, porque se debe descomponer primero antes que las plantas lo aprovechen; además, esta práctica no es recomendable por el peligro de contaminación que puede significar la infiltración de materia orgánica sin digerir para el manto freático o los cursos de agua (Vásquez & Fernández, 1997).

En vista de las limitaciones actuales concerniente a la disponibilidad de combustibles de origen fósil y al cambio climático ocasionado por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, las investigaciones en el campo de los combustibles alternativos, los cuales son neutrales en las emisiones de CO₂, se han incrementado en los últimos años (Cacua & Amell, 2011).

Uno de los procesos de investigación e innovación tecnológica que más se estudia está relacionado con la producción de biogás y bioabonos, a partir

de los efluentes de biodigestores en el contexto de las fincas donde se producen alimentos y energía de forma integrada.

Esta tesis analiza de manera detallada la conveniencia de la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos con la utilización de biodigestores que es una solución rentable y ecológica para dejar atrás el uso del gas licuado de petróleo como combustible de uso diario, y poder producir fertilizante ecológico para reducir la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmosfera.

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 rige el proceso, lo que impide que se determinen las condiciones óptimas de operación para cada estado y se limiten la cantidad y calidad de biogás producido.

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. 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 que son usados directamente e indirectamente como

substratos por las bacterias productoras de metano que afecta el desempeño digestivo global (Gerardi, 2003).

La digestión anaeróbica de la biomasa es un proceso natural de la biodegradación de la materia orgánica realizada por microorganismos específicos que transforman un sustrato biodegradable en biogás y además un efluente que puede ser utilizado como bioabono llamado biol. La digestión anaerobia tiene aplicaciones tanto civiles como industriales alrededor del mundo como una tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de energía (Roati & Fiore, 2012).

El biogás está compuesto por diversos gases, entre ellos los más importantes son el dióxido de carbono, el metano y el sulfuro de hidrógeno. La cantidad de estos gases depende de las características del sustrato que se someta a la digestión anaerobia y de las condiciones de operación del proceso. Por tanto se puede mejorar artificialmente la producción de biogás y al mismo tiempo maximizar la producción de nuestro gas de preferencia (Roati *et al.* 2012).

El proceso de degradación de la digestión anaeróbica comienza con la fase hidrolítica en donde se rompen las cadenas de compuestos orgánicos complejos dando como resultado compuestos solubles más sencillos. Luego estos compuestos pasan por otros tres procesos más que son: fermentación o acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis donde al final

se produce metano a partir de ácido acético, Hidrógeno (H₂) y Dióxido de Carbono (CO₂) (Varnero, 2011). La adición de largas cadenas de compuestos hidrocarbonados, por ejemplo: materiales que son ricos en grasas, pueden ayudar a mejorar la calidad del biogás, pero con precaución de que las cantidades no sean tan grandes para evitar la acidez. El contenido de metano aumenta entre mayor sea el número de átomos de Carbono en el sustrato (Deublein & Steinhauser, 2008).

En general el proceso de biodigestión no se encuentra automatizado ni bajo un criterio de control previamente establecido donde se tenga una interrelación, monitoreo y especificación de cada una de las variables que inciden en el proceso. La automatización y el control están orientados a mantener la eficiencia y rendimiento de un proceso determinado mediante el uso de sistemas o elementos computarizados encaminados a mejorar la calidad y productividad. Sin embargo, el alcance de automatizar y controlar va más allá que la simple mecanización de los procesos ya que ésta provee a operadores humanos mecanismos para asistirlos en los esfuerzos físicos del trabajo. La automatización reduce ampliamente la necesidad sensorial y mental del humano, abarcando la instrumentación industrial, que incluye los sensores y transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos, y las aplicaciones de software en tiempo real.

Un sistema de control en base a Lógica difusa no solo considera que hay una infinidad de valores semánticos entre “verdadero y falso”, sino que es un tipo de controlador lógico capaz de resolver problemas relacionados con la incertidumbre de la información o del conocimiento, considerada la lógica difusa como una herramienta eficaz en el manejo de variables que presentan cierto grado de incertidumbre, por lo que se pretende el desarrollo de un sistema de control por aplicación de lógica difusa para el establecimiento y control de la variable (temperatura) y una optimización en el actual funcionamiento del proceso, obteniendo de esta forma un proceso estable que permita dar como resultado un producto de calidad, en menor tiempo y costo.

Para el mejoramiento de los sistemas y una automatización más eficiente el control difuso le ha agregado una dimensión prometedora al dominio existente en la ingeniería de control convencional. Cuando un sistema complejo físicamente no entrega un modelo matemático preciso o razonablemente aproximado y en particular cuando la descripción del sistema requiere una cierta experiencia, un controlador difuso satisface las necesidades requeridas para la automatización del biodigestor teniendo un control más preciso de la temperatura. Los criterios de selección para optar por el diseño de un controlador difuso para la regulación de temperatura en el biodigestor anaeróbico fueron básicamente la relación no lineal de la

Temperatura con la actividad microbiana durante el proceso de digestión anaeróbica (Van Lier, 1995).

El éxito de las aplicaciones de la tecnología difusa no solo es práctica y poderosa sino también costo-efectiva. Los sistemas del mundo real son no lineales; la modelación exacta es difícil, costosa e incluso imposible en muchos casos. El control difuso tiene la habilidad única para realizar exitosamente tareas de control sin conocer el modelo del sistema aun si este es no lineal y complejo.

En cuanto al diseño de sistemas de control invariantes, tan solo advertir la gran carga matemática que se necesita para su aplicación (ecuaciones diferenciales, transformadas en diferentes dominios, operaciones de convolución, etc.), si a esto se añade la intención de diseñar una serie de objetivos, obviamente la matemática que se ha de manejar requiere un buen conocimiento de técnicas de optimización.

En esta tesis se propone diseñar e implementar un controlador difuso en un prototipo no lineal, usando un microcontrolador, a partir del cual se propone que sea de la familia PIC 18F4550, por las ventajas que ofrece.

En la mayoría de situaciones, para realizar el control de cualquier planta es necesario conocer su función de transferencia (modelo matemático preciso), cosa que no siempre es sencilla de obtener. Se ha elegido la

lógica difusa debido a que una de sus ventajas es que no necesita complejas fórmulas matemáticas sino que puede utilizar lenguaje natural para expresar el conocimiento y las acciones a realizar.

La organización de la tesis esta desglosada de la siguiente manera:

- En el capítulo I: Planteamiento del problema. Descripción del problema, formulación del problema, justificación e importancia, alcances y limitaciones, objetivos e hipótesis del trabajo de investigación.
- En el capítulo II: Marco teórico: antecedentes del estudio, bases teóricas, definición de términos.
- En el capítulo III: Marco metodológico: Tipo y diseño de investigación, población y muestra, operacionalización de variables. Técnicas e instrumentos para recolección de datos, procesamiento y análisis de datos.
- En el capítulo IV: Resultados
- En el capítulo V: Discusión.
- Finalmente se dan a conocer las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

1.1.1.1. Historia

El proceso de la biodigestión anaeróbica ha sido conocido y aplicado desde la antigüedad, se utiliza para el curtido de los cueros, para la obtención del etanol y ácidos orgánicos, como el ácido láctico, entre otros, pero era comprendido en razón de sus productos finales y no en función de sus procesos (Taylhardat, 1986).

Las primeras noticias de la existencia de la fermentación anaeróbica fueron reportadas por A. Volta en el año de 1776. Este autor descubrió la formación de un gas combustible sobre pantanos, lagos y aguas estancadas y relacionó la formación de biogás con la cantidad de materia orgánica depositada en su fondo (Moncayo, 2008). Luis Pasteur al presentar los trabajos de su discípulo Gayón concluyó que la fermentación de estiércol podría ser una fuente de energía para la calefacción e iluminación (Medina, 1984).

La aplicación de la biodigestión se inició antes del siglo XX cuando el biogás era quemado para dar iluminación en Inglaterra (Brown, 1987). En el año 1868 el biólogo inglés Antonio Bechamp definió las reacciones como constituyentes de un proceso microbiológico. La fórmula química del gas metano (CH_4) fue descubierta por Amadeo Avogadro en el año de 1821. También se reporta que los ingleses, Dalton, Henry y Davy fueron los que desarrollaron en los años de 1804 a 1810 la composición química del gas metano (Moncayo, 2008).

Para el año de 1900 es puesto en funcionamiento el primer biodigestor en Bombay, India. Charles James utilizó el gas producido en el proceso para el funcionamiento de un motor (Guevara, 1996). En los años 1930, se mantuvo un interés creciente en la aplicación de digestión anaeróbica, especialmente, donde los productos de la digestión pueden convertirse en productos aprovechables para los agricultores (Brown, 1987).

En Inglaterra, Donald Camerón perfeccionó el tanque séptico y utilizó el gas que se origina en el proceso como fuente de energía. En los EEUU de Norteamérica se empezó a investigar esta tecnología en Massachusetts, por intermedio del Dr. Louis P. Kunnincutt (Guevara, 1996).

Generalmente, en la mayoría de los países latinoamericanos, el biogás ha tenido un uso limitado a la cocción de alimentos y calefacción de animales

de granja. A pesar de esto, el uso del biogás en la sustitución de combustibles fósiles, para la generación de electricidad en motores de combustión interna ha cobrado importancia en los últimos años (Moncayo, 2008).

Actualmente, con los precios del petróleo, que llegaron a superar los 110 U\$ dólares por barril ha impulsado a muchos países a encarar estudios sobre práctica de fuentes de energía que reemplacen los habituales combustibles derivados de sistemas convencionales no renovables y se ha iniciado la construcción de varias plantas de biogás en Chile, Honduras, República Dominicana, Ecuador, Brasil, Bolivia y Costa Rica entre otros (Moncayo, 2008).

1.1.1.2. Antecedentes

En la actualidad el 90 % de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles que se obtienen del petróleo, del gas natural y del carbón. Estos combustibles fósiles no renovables y sus derivados están experimentando crecientes costos debido a su agotamiento. A pesar de su alto uso como combustible, su combustión es altamente contaminante debido al aporte del CO₂ en la atmósfera. El carbón de los hidrocarburos se encontraba atrapado en los yacimientos durante millones de años. Durante la combustión de los combustibles fósiles se libera CO₂ en la atmosfera aumentando su

concentración. Este gas aporta significativamente al cambio climático, ya que su estructura molecular posee un efecto invernadero al almacenar calor en la atmosfera.

Las energías alternativas a diferencia de las energías no renovables, son energías inagotables. Entre las energías renovables se encuentran el viento, el sol, el agua, la biomasa o los residuos orgánicos, por lo que se plantea la necesidad de encontrar una tecnología apropiada para que estos recursos puedan ser usados como medio para producir energía.

Entre las ventajas de los distintos tipos de energía renovable se encuentra la no emisión de gas contaminante como resultado de la combustión, ya que el dióxido de carbono liberado en el proceso es igual al dióxido de carbono absorbido por el material durante su crecimiento, y la no generación de residuos peligrosos de difícil tratamiento. Además las distintas fuentes de energía son recursos naturales o domésticos, por lo que su disposición no está afectada por variaciones de precio a nivel mundial, no se encuentran distribuidas en un territorio específico y se pueden generar de cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y las actividades propias del hombre, tal como, residuos y aguas residuales, por lo que al utilizar estos residuos como fuentes de energía, a su vez se reduce significativamente el problema de la disposición de los residuos, mejora la vida de los

campesinos, incrementa la producción agrícola y preserva el medio ambiente.

La utilización energética de la biomasa, que se refiere a la madera, las cosechas, los residuos de la cosecha o los residuos orgánicos, se puede realizar mediante la combustión de la misma o a través de la digestión anaeróbica en la cual se produce biogás. Biogás se llama al metano que se puede extraer de estos residuos en un generador de gas o un digestor que también es usado para generar energía eléctrica o energía mecánica (Cabrera, 2011).

La biomasa tiene carácter de energía renovable debido a que su contenido energético proviene de la energía solar fijada en las plantas en forma de cadenas de carbono en un proceso que se lleva a cabo llamado fotosíntesis vegetal. Esta energía es liberada al romper los enlaces de los compuestos orgánicos a través de dos procesos tecnológicos, el primero es el proceso termoquímico del cual destaca la combustión directa de la biomasa; y, el segundo es el proceso bioquímico en el cual destaca la digestión anaerobia de los residuos vegetales y animales (Cabrera, 2011).

En esta tesis se planteó utilizar los residuos orgánicos vegetales, animales mediante la ubicación, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaeróbico a escala piloto, en el cual se depositan los residuos orgánicos

mezclados con agua en un biodigestor herméticamente cerrado. En el biodigestor se controla parámetros de operación como temperatura, agitación, recirculación de agua, tiempo de residencia hidráulico, volumen de alimentación, carga orgánica, se monitorea el pH a la entrada y salida del proceso, producción de biogás y de fertilizante orgánico (biol y biosol). El biodigestor es una alternativa importante y eficiente para la utilización de la biomasa, es muy fácil de realizarlo, ya que es un tanque cerrado que puede ser construido de diversos materiales como ladrillo, hormigón, acero o plástico. El biodigestor es, por lo general, de forma cilíndrica posee un conducto o tubería de entrada conocido como afluente, por donde ingresa la mezcla de materia orgánica, y otro de salida conocido como efluente, por donde se descarga el fertilizante orgánico el cual fue digerido por la acción de las bacterias anaerobias y a la vez se genera biogás que es utilizado como fuente para la producción de energía.

Para poder llevar a cabo este proyecto es muy importante que se tome en cuenta qué residuos o material se va a ocupar para la biodigestión ya que deben ser asequibles. Como sustrato pueden aprovecharse diversos materiales orgánicos tales como residuos vegetales, estiércol, residuos agroindustriales, residuo orgánico, algas, efluentes de las industrias de alimentos, bebidas, desechos de mataderos y procesadores, entre otros.

1.1.1.3. Diagnóstico

Mundialmente, la Tasa de Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) asciende de manera exponencial; en respuesta a factores que acentúan este fenómeno como el crecimiento poblacional e industrial y el desarrollo de la tecnología. Los rellenos sanitarios, son el reflejo de esta realidad y la falta de reutilización de los RSU acentúa aún más este síntoma. Es decir, conforme avanza el tiempo, el porcentaje de RSU aumenta en los vertederos, y su aprovechamiento está subvalorado en países emergentes o subdesarrollados.

No obstante, es necesario mencionar que la falta de investigación y preocupación por parte de la sociedad, ha permitido que los vertederos sean consagrados como puntos de contaminación inservibles (Cralle, Plugge, McInerney, & Stams, 2011).

Sin embargo, la nueva tecnología y la ideología ambientalista, ha orientado los esfuerzos de varios investigadores a la búsqueda de soluciones relacionadas al tratamiento de los RSU, con el fin de erradicar problemas de contaminación y producir energías limpias (Weiss, Jérôme, Freitag, & Helmut, 2008). Un caso en particular es la Biometanización, que entendido, en su forma más simple, es un proceso llevado a cabo por ciertas comunidades bacterianas, las cuales se encargan de descomponer materia orgánica para la formación de productos tales como el Biogás, una

composición de gases (CO₂ y CH₄ específicamente), este producto obtenido, es de vital importancia ya que puede ser empleado como gas GLP o, como materia prima para la generación de electricidad.

1.1.1.4. Pronóstico

En América Latina, están apareciendo los primeros proyectos relacionados con la biometanización; sin embargo, el Perú, carece de investigación con respecto al tema, lo cual supone la urgente necesidad de estudiar la posibilidad de utilizar los RSU para la generación de biogás, visto no únicamente como un interés económico, sino también como una alternativa a la disminución de la cantidad de RSU generados y la implementación de una consciencia ambientalista en la sociedad peruana.

En el vertedero municipal de la provincia de Tacna no se controla todos los parámetros ambientales asociados a una buena gestión de RSU, es importante mencionar que no existe un proyecto encaminado al aprovechamiento del biogás para la producción de energías más limpias. Si es que esta realidad se intensifica, el vertedero municipal de la provincia de Tacna tendrá sobreacumulación de desechos antropogénicos, lo que podría inferir en la búsqueda de extensiones de áreas mayores para colocar grandes cantidades de RSU. También, el no aprovechar el biogás generado, estaría remitido al desperdicio de un tipo de materia prima para la generación de energía.

La emanación de CH₄ y CO₂ (compuestos del biogás), desencadena en procesos naturales que inciden negativamente sobre el ambiente y los seres vivos. Por ejemplo, la radiación solar, que recibe el planeta tierra, se ve afectada por el dióxido de carbono, metano y vapor de agua (GEI). Ya que, dichos compuestos, atrapan la radiación solar y con ello elevan la temperatura del planeta, fenómeno conocido como efecto invernadero (Orellana, 2012). Las concentraciones de GEI aumenta por la quema de combustibles fósiles, deforestación, incendios forestales, tiraderos de basura, entre otros (Orellana, 2012).

El biogás, como fuente de energía renovable, ha despertado un gran interés en los últimos años, siendo tal vez una de las tecnologías de más fácil implementación. Su potencial desarrollo, no solo considerando la producción de biogás, sino que como ayuda a la obtención de biofertilizante y tratamiento de problemas sanitarios en algunos casos, hacen que replicabilidad y difusión en los sectores con abundancia de materia orgánica de desecho sea atractivo. En la actualidad, los residuos orgánicos, tales como los restos de comida, de jardines y otros materiales similares, representan poco más del 52,4 % del total de residuos sólidos urbanos (Orellana, 2012). A nivel mundial el biogás representa uno de los recursos energéticos más sostenibles y con mayor potencial de crecimiento. Cumple una importante función medioambiental.

1.1.1.5. Control del pronóstico

El producto obtenido de la biometanización es de vital importancia para el desarrollo de tecnologías energéticas más limpias, ya que puede ser empleado como combustible o, simplemente puede ser utilizado para la generación de electricidad (Kalyuzhny & Sklyar, 2003).

Se debe señalar que la demanda de electricidad aumenta cada día más, en una relación directamente proporcional al crecimiento poblacional y al avance tecnológico. Es así que varios estudios se han centrado en la búsqueda de energías alternativas que se refieran a la eliminación de residuos y al uso de la energía, con la posibilidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Cabrera, 2011). Ante esta problemática resulta inherente para Tacna el estudio de alternativas amigablemente ambientales como es el aprovechamiento energético o captura de gases.

Dado los factores mencionados, es de vital importancia la proposición de un proyecto sobre la generación de biogás a partir de RSU orgánicos de Tacna. El presente trabajo se basa en el diseño, construcción e implementación de un control difuso de la temperatura en un biodigestor anaeróbico, que produzca biogás a partir de RSU orgánicos mediante la interacción de las correspondientes comunidades microbianas, como principales autores del proceso de biometanización.

La formulación de modelos climáticos permite predecir el comportamiento de las diferentes variables que integran el sistema del invernadero, para condiciones climáticas específicas de cada región; y sus interacciones. Para el mejoramiento de los sistemas y una automatización más eficiente se requiere de un controlador difuso que satisface las necesidades requeridas para la automatización del biodigestor teniendo un control más preciso de la temperatura generada.

Por lo anterior, esta investigación aporta en el campo de estudio de la biodigestión anaeróbica como alternativa energética y de saneamiento ambiental, pues en Tacna y el Perú este tipo de investigación no ha sido ampliamente realizado.

El sistema de control por lógica difusa es una herramienta eficaz en el manejo de las variables con cierto grado de incertidumbre y que requieren alta precisión, y no es necesario que este tipo de sistema esté representado por un modelo matemático para poder ser aplicado (Castillo, 2008). Motivo por el cual se desarrolló y aplicó una estrategia para el monitoreo y control de la temperatura deseada para ser utilizado en el proceso de biodigestión, característica principal de este sistema, donde fue necesario realizar el acondicionamiento de los sensores garantizando de esta manera las condiciones óptimas para la aplicación del sistema de control.

1.1.2. Problemática de la investigación

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 y finito.

Sumado a lo anterior, los residuos sólidos pueden tener varios efectos ambientales negativos. Cuando son vertidos en cuerpos de aguas 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 roedores, cucarachas e insectos entre otros animales, asociados a los tiraderos que puede provocar la transmisión de enfermedades como el cólera, disentería, leptospirosis y amebiasis, entre otras (Tamayo, 2009). Los residuos son un grave problema para las grandes ciudades y para la población mundial.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general:

¿En qué medida la aplicación de un sistema automático de control difuso de la temperatura en un biodigestor anaeróbico influye en la generación de biogás en condiciones de invernadero?

1.2.2. Problemas específicos:

1.2.2.1. ¿La aplicación de un controlador difuso, con los rangos fijados de temperatura en el invernadero en un tiempo determinado, garantizará un mejor proceso de digestión anaerobia de los residuos orgánicos en un biodigestor para la generación de biogás?

1.2.2.2. ¿El diseño e implementación de un control difuso en un microcontrolador autónomo para el control de la temperatura, permitirá realizar un interfaz entre el software y el biodigestor, para realizar una comparación de similitud con distintos valores de temperatura?

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

Los residuos sólidos urbanos constituyen uno de los principales problemas para la sociedad a nivel mundial, su constante incremento y complejidad en cuanto a su composición hace necesaria la implementación de tratamientos alternos al depósito en un relleno sanitario.

Uno de los motivos por el cual se decidió realizar esta investigación es porque que día a día se agotan las energías no renovables y es necesario y urgente buscar una alternativa a este tipo de energías. Adicionalmente, el manejo de los residuos orgánicos genera grandes dificultades tanto a los municipios que deben recolectarlos, como a los productores agroindustriales que los generan. La construcción de los biodigestores presenta una solución a estos dos problemas ya que mediante biodigestores se puede dar un tratamiento a los residuos orgánicos estabilizándoles y otorgándoles un valor agregado sea como abono líquido o como biogás, un biocombustible que se puede utilizar para suplantar algunos combustibles y generar energía eléctrica o térmica (Tamayo, 2009).

La realización de biodigestores en Tacna es viable, debido a que es una región agrícola el cual posee varios recursos que facilitan la implementación de este tipo de tecnología. En los biodigestores actúan los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica rápidamente biodegradable, compuesta por residuos orgánicos, ganaderos, agrícolas, así como residuos de industrias alimenticias. Entre los residuos se pueden tomar en cuenta estiércol, residuos agrícolas, excedentes de cosechas, etc. Estos residuos se pueden tratar de formas independientes o juntas, lo cual se denomina co-digestión (Tamayo, 2009).

La instalación de biodigestores tiene grandes beneficios económicos y ambientales, debido a que tienen varios usos. La producción de biogás se puede utilizar en motores para la generación eléctrica por medio de turbinas o aplicar directamente para la generación de energía térmica en cocinas a gas o en la generación de climas controlados con el fin de calentar criaderos de pollos o cerdos recién nacidos, también para huertos de plantas como en el caso de rosas, disminuyendo así el consumo de leña o gas natural.

Esta es una forma de producir energía no contaminante ni en el proceso de producción ni en su combustión, ya que la energía proviene de residuos que de lo contrario tendrían que ser tratados de otra forma y el biogás contiene menores concentraciones de NO_x , SO_x y CO . Además como subproducto de la producción de biogás se obtiene el fertilizante orgánico o biol de muy buena calidad y de inmediata disponibilidad para los cultivos, y reducir o eliminar a los fertilizantes sintéticos.

La incorporación de una nueva tecnología resulta no solamente un adelanto en cuanto al manejo de los residuos, sino que podría ser considerado como una inversión, ya que se estaría aprovechando recursos que actualmente están siendo desperdiciados, permitiendo obtener compost, abono excelente para la agricultura y posee altas propiedades como mejorador de las propiedades físicas del suelo.

La introducción al tratamiento biológico en un biodigestor con aprovechamiento de energía dentro del tratamiento de los RSU, significa un decremento significativo en la cantidad de residuos sólidos que llegan al relleno sanitario y, siempre y cuando se utilice la tecnología adecuada, significaría una disminución en el impacto ambiental generado.

Esta tesis tiene la finalidad de utilizar la biodigestión como una alternativa para hacer uso de la gran cantidad de residuos sólidos orgánicos generados y con esto reducir la contaminación ambiental por emisiones de metano, malos olores e insectos transmisores de enfermedades debido al mal uso de los residuos orgánicos.

Las técnicas de control para diferentes procesos han incrementado y evolucionado de manera constante, ofreciendo resultados robustos, sencillos, económicos, eficientes y de rápida implementación en cualquier sistema en el cual han sido aplicadas. El éxito mundial de innumerables productos comerciales y aplicaciones han probado que la tecnología difusa no solo es práctica y poderosa sino también costo- efectiva. Los sistemas del mundo real son no lineales; la modelación exacta es difícil, costosa e incluso imposible en muchos casos. El control difuso tiene la habilidad única para realizar exitosamente tareas de control sin conocer el modelo del sistema aun si este es no lineal y complejo (Ying, 2000).

Con la construcción del módulo de control difuso, los estudiantes de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann contarán con una nueva herramienta de aprendizaje enfocada a la teoría de control, la cual ayudará a entender, y diseñar procesos industriales basados en controladores.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

En el país cada municipio de cada ciudad debe enfrentarse al problema de los residuos sólidos urbanos invirtiendo en la recolección hasta llegar a los rellenos sanitarios, con la única opción de efectuar un enterramiento de los residuos para evitar en teoría el máximo de contaminación, este objetivo es raramente alcanzado ya que los gases generados de la degradación de la materia orgánica fluyen hacia la atmosfera causando su contaminación ya que están compuestos de metano y dióxido de carbono, gases que influyen en el efecto invernadero y los lixiviados que generan un alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales cerca de ellos.

Los beneficios que trae consigo el presente estudio nos permite llegar a la teoría que los diversos municipios, deberían interesarse por plantas de tratamiento anaeróbico para el procesamiento de los residuos producidos en las ciudades, aplacando uno de los grandes problemas medioambientales, los rellenos sanitarios; e incluso, estas plantas de tratamiento anaeróbico se pueden diseñar de acuerdo a su finalidad.

Con base a la problemática ambiental actual asociada a la generación de residuos sólidos urbanos, se realiza la construcción de un prototipo experimental de un biodigestor anaerobio tipo batch (por lotes) con residuos orgánicos de frutas, verduras y de comida del cual se tiene como propósito el uso y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, con el objeto de minimizar la disposición de estos en el relleno sanitario. Una de las características más importantes de la biodigestión es que disminuye el potencial contaminante de los excrementos de origen animal y humano.

Con el montaje y puesta en marcha se afianzan los conocimientos adquiridos en el doctorado de ciencias ambientales y se da una alternativa al manejo de los residuos sólidos generados, se pretende brindar una alternativa eficiente a la problemática existente en el mundo entero en cuanto al manejo de los residuos sólidos urbanos dado que las actuales soluciones como los rellenos sanitarios han tenido más desaciertos que aciertos en la gestión integral de los residuos.

El módulo de control difuso, realiza y tiene las siguientes funciones:

- Permite controlar la temperatura dentro del biodigestor; Observar datos como: valores de entrada, *set point*, error y salida en una pantalla LCD
- Variar el *set point*, es decir la temperatura que se desea tener en el biodigestor.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general:

Determinar la influencia de la aplicación de un sistema automático de control difuso de la temperatura en un biodigestor anaeróbico para la generación de biogás en condiciones de invernadero.

1.5.2 Objetivos específicos:

1.5.2.1. Aplicar un controlador difuso, con los rangos fijados de temperatura en el invernadero en un tiempo determinado, que garanticen un mejor proceso de digestión anaerobia de los residuos orgánicos en un biodigestor para la generación de biogás.

1.5.2.2. Diseñar e implementar un control difuso en un microcontrolador autónomo para el control de la temperatura que permita realizar un interfaz entre el software y el biodigestor, para realizar una comparación de similitud con distintos valores de temperatura.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1. Hipótesis general:

Si se aplica un sistema automático de control difuso de la temperatura en un biodigestor anaeróbico entonces influye significativamente en la generación de biogás en condiciones de invernadero.

1.6.2. Hipótesis específicas:

1.6.2.1. Si se aplica un controlador difuso con los rangos fijados de temperatura en el invernadero en un tiempo determinado, entonces garantizarán un mejor proceso de digestión anaerobia de los residuos orgánicos en un biodigestor para la generación de biogás.

1.6.2.2. Si se diseña e implementa un control difuso en un microcontrolador autónomo para el control de la temperatura, permitirá realizar un interfaz entre el software y el biodigestor, para realizar una comparación de similitud con distintos valores de temperatura.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Cada estado de la biodigestión es independiente y por lo tanto requiere de condiciones 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 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 de 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, O.; Silke, C; Bernache, G; Bocco, G. (2000), realizaron una investigación en la Universidad Autónoma de México (UNAM) que fue publicado en la Revista Internacional de Contaminación Ambiental, cuyo objetivo fue determinar la eficiencia de la digestión anaerobia al tratar los

residuos orgánicos generados en los mercados municipales y restaurantes; 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. 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. Se determinó un tiempo de retención óptimo de 7 días para la digestión de la materia orgánica proveniente de mercados y restaurantes.

Magaña, R; Torres, E; Martinez, G. (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 de 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 °C 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 homogenizarlas con agua y luego cargar el biodigestor, esto para cuantificar la cantidad de metano en el biogás.

Bermúdez, (2010), Implementó en la Universidad Industrial de Santander, un biodigestor a nivel de 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, controlaron la temperatura en tres diferentes referencias, 34; 37,85 y 40 °C. Usando un serpentín con agua calentada por una resistencia de 1500 W en su interior ciclada por una bomba de 40 W. 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 $\pm 0,5$ °C.

Huerta (2010), construyó y operó un reactor anaeróbico para desechos de restaurantes procedentes de la ciudad universitaria en la Universidad

Nacional Autónoma de México; esto a escala laboratorio, utilizando una botella de politereftalato de etileno (PET) con capacidad de 3 L. (aislada térmicamente con una bolsa hecha de telar 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 2,5 L). 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 de pH y el dato interesante fue el recirculado de lodos y la metodología para el arranque del proceso 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.

Lindorfer (2008), especifica que el proceso de biometanización con desperdicios orgánicos urbanos, se realiza mediante tres pasos; Hidrólisis, Acetogénesis y Metanogénesis, mediado por la participación de comunidades microbiológicas. Dichas comunidades son bacterias anaeróbicas a excepción de las metanógenas que son archeas. Durante la

digestión anaeróbica el acetato, el dióxido de carbono y el hidrógeno son producidos por microorganismos acidogénicos. Y de la misma manera el hidrógeno y el acetato son asimilados por archeas metanogénicas, y degradados a acetato, metano y agua.

Lindofer menciona, además, que una biodegradación orgánica compuesta en su mayoría por desperdicios vegetales causa una rápida acidificación y la volatilidad de los ácidos grasos, lo que conduciría a la inhibición de la actividad metanogénica bacteriana.

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, 2013).

Se aborda el 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 acero para invernadero está expuesto a cambios climáticos y sujeto a mezclas de diferentes sustancias y cantidades lo convierten en un sistema no lineal y variante con el tiempo, así pues, tratar de obtener el modelo matemático de un sistema como éste 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 13,59 cm de largo; 3,81 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.

Por otra parte, Avilés (XXII JIEE) diseñó un circuito para el monitoreo y control difuso de la temperatura de una incubadora, el sistema 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 al tiempo de respuesta y error en estado transitorio y estacionario, además de ser un control robusto, es decir, poco susceptible a perturbaciones.

Los resultados mostrados en el trabajo “*New data on temperatura optimum and temperatura changes in energy crop digester*” (Lindorfer, 2008), donde el autor analiza los efectos de los cambios de temperatura en el proceso de digestión anaeróbica, muestran efectos negativos en la producción del metano. Estos resultados pueden ser tomados como referencia para validar los resultados a los que se arriban en la presente investigación, dada la similitud de las condiciones del experimento y además porque los efectos en la producción de biogás son similares a los obtenidos por Lindorfer (2008). Sugiere que el cambio de temperatura en el reactor anaeróbico genera un cambio en la población bacteriana, a la vez que las concentraciones de los Ácidos Grasos Volátiles decremента siendo el Ácido Propiónico el más afectado por la variación de temperatura.

MSc. Marco Barragán & Ing. Erwin Villacrés (2005), de la Escuela Politécnica Nacional, estudiaron e implementaron un método de ajuste de controladores PID, difusos aplicado en el control de nivel de líquido, este estudio muestra la posibilidad de combinar las características de los controladores basados en lógica difusa con controladores convencionales y ver las respuestas que estos sistemas pueden proporcionar. Un control clásico se basa para su diseño el conocimiento de un modelo matemático y el éxito de control reside en la fidelidad de la representación del comportamiento de la planta por parte de dicho modelo.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Estado actual del conocimiento sobre el tema

2.2.1.1. Descripción de las zonas de transferencia en Tacna

El proyecto del Vertedero Municipal se encuentra enmarcado en la ciudad de Tacna que es la capital de la Provincia y Departamento del mismo nombre. Constituye una ciudad de frontera estratégicamente ubicada en la costa meridional del Perú, a 558 m.s.n.m. en el centro del Valle del río Caplina, y a 36 kms. de la frontera con Chile. Se encuentra situada a los 70°14'23" de longitud oeste del meridiano de Grenwisch y a los 17°59'39" de latitud sur.

Las metodologías de recolección de RSU utilizadas en la provincia de Tacna, son denominadas "a pie de acera" o "puerta a puerta", donde el recolector de basura recepta los desechos domiciliarios para colocarlos en vehículos recolectores de carga trasera.

Luego, estos desechos son vaciados en las diferentes zonas de transferencia dependiendo de la ubicación, el objetivo por el cual fueron creadas estas instalaciones fue de optimizar la recolección de residuos y optar por una mejor disposición de los mismos como parte de un programa alternativo de gestión de residuos sólidos y enfrentar el gran problema de la inadecuada disposición de los residuos sólidos domiciliarios.



Figura 1. Vertedero Municipal de Tacna.

Fuente: Elaboración propia.

El personal, separa manualmente el papel, chatarra y cartón de los residuos depositados por los camiones recolectores. Sin embargo no existe una separación en los que respecta a los RSU orgánicos e inorgánicos. Lo que constituye un problema ambiental relacionado con la generación de metano producto de la descomposición de los residuos orgánicos, formación de lixiviados, impacto visual y fétido olor.

Son 280 toneladas diarias que se depositan en el vertedero municipal, con presencia de quemados y residuos peligrosos, que crean un grave foco infeccioso para Tacna, convirtiendo este sector en uno de los más críticos a nivel nacional, estos datos fueron dados en el Foro denominado “Gestión de los Residuos Sólidos en la ciudad de Tacna”, promovido por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), el Gobierno

Regional de Tacna, la Municipalidad Provincial y el MIM (Mejorando la Inversión Municipal) Tacna (Mayo, 2015).

2.2.1.2. Marco legal: Normatividad del Perú respecto a RSU

Es importante mencionar cual es el marco legal vigente estipulado en el Perú con respecto al manejo de los RSU, emisiones de GEI, tecnologías limpias y el derecho de la sociedad Peruana de poder desenvolverse en un ambiente bajo el concepto de desarrollo sostenible.

2.2.1.2.1. Constitución política del Perú (1993).

2.2.1.2.2. Ley General del Ambiente - LEY N° 28611.

2.2.1.2.3. Ley General de salud – LEY N° 26842.

2.2.1.2.4. Ley general de los Residuos sólidos N° 27314.

2.2.1.2.5. Ley orgánica de municipalidades – LEY N° 27972.

2.2.1.2.6. Ley marco del sistema nacional de gestión ambiental - LEY N° 28245.

2.2.1.2.7. Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire. Decreto supremo N° 074 – 2001 - PCM.

2.2.1.2.8. Reglamento para el aprovechamiento de productos orgánicos recuperables de las basuras. Decreto Supremo N° 013 – 77 – SA.

2.2.2. BIOGÁS

2.2.2.1. Biomasa o sustrato

El término biomasa o sustrato se refiere a todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. Energéticamente el término biomasa se usa para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica conformada por residuos municipal e industrial; residuos de cultivos agropecuarios; y plantaciones con propósitos energéticos.

La biomasa tiene carácter de energía renovable debido a que su contenido energético proviene de la energía solar fijada por las plantas en forma de cadenas de carbono en un proceso que se lleva a cabo llamado fotosíntesis. Esta energía es liberada al romper enlaces de compuestos orgánicos a través de dos procesos tecnológicos, el primero es el proceso termoquímico del cual destaca la combustión directa de la biomasa; y, el segundo es el proceso bioquímico en el cual destaca la digestión anaerobia de los residuos vegetales y animales (Fernández, 2007).

2.2.2.1.1. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que ocurre bajo condiciones estrictamente anaerobias en la cual microorganismos degradan la materia orgánica y la estabilizan, transformándola en biogás o gas biológico formado por metano (CH₄) y otros productos inorgánicos

incluyendo principalmente dióxido de carbono (CO₂) (Kiely G, 1999). La cantidad presente de metano en el biogás varía, según el tipo de materia orgánica digerida y de las condiciones del proceso, con porcentajes entre 50 % a un 70 % aproximadamente. Para que el proceso se lleve a cabo es necesario que intervengan varios grupos de microorganismos que sean capaces de transformar la materia orgánica en compuestos intermedios, como en ácido acético, anhídrido carbónico e hidrógeno, los cuales son usados por los microorganismos metanogénicos que concluyen el proceso con la producción de metano. Los microorganismos anaerobios presentan bajas velocidades de crecimiento y de reacción, por lo tanto, y en la medida de lo posible, es necesario mantener el entorno de la reacción en condiciones óptimas para su crecimiento (Guenneron, 1986).

El proceso de degradación de la materia prima orgánica es el siguiente: Al acumular materia orgánica compuesta por polímeros, como carbohidratos, proteínas, celulosa, lípidos, etc. en un ambiente acuoso, los microorganismos aerobios actúan primero tratando de alimentarse de este sustrato, ya que puede consumir todo el oxígeno disuelto que existe. Posterior a esta etapa, cuando el oxígeno se termina, empiezan a aparecer las condiciones perfectas para la flora anaeróbica la cual puede consumir la materia orgánica disponible (Taylhardat, 1985). En la primera etapa la materia orgánica es atacada por grupos de bacterias fermentativas

proteolíticas y celulolíticas, que la degradan hasta ácidos grasos y compuestos neutros. En la segunda fase los ácidos grasos orgánicos son atacados por bacterias consumidoras de hidrógeno, que llevan los ácidos a acetato, a H₂ y CO₂. Simultáneamente un grupo de bacterias homoacetogénicas, degradan los ácidos de cadena larga a acetato, H₂ y CO₂ (McInerney, 1980). Las tres etapas se presentan en la figura 2.

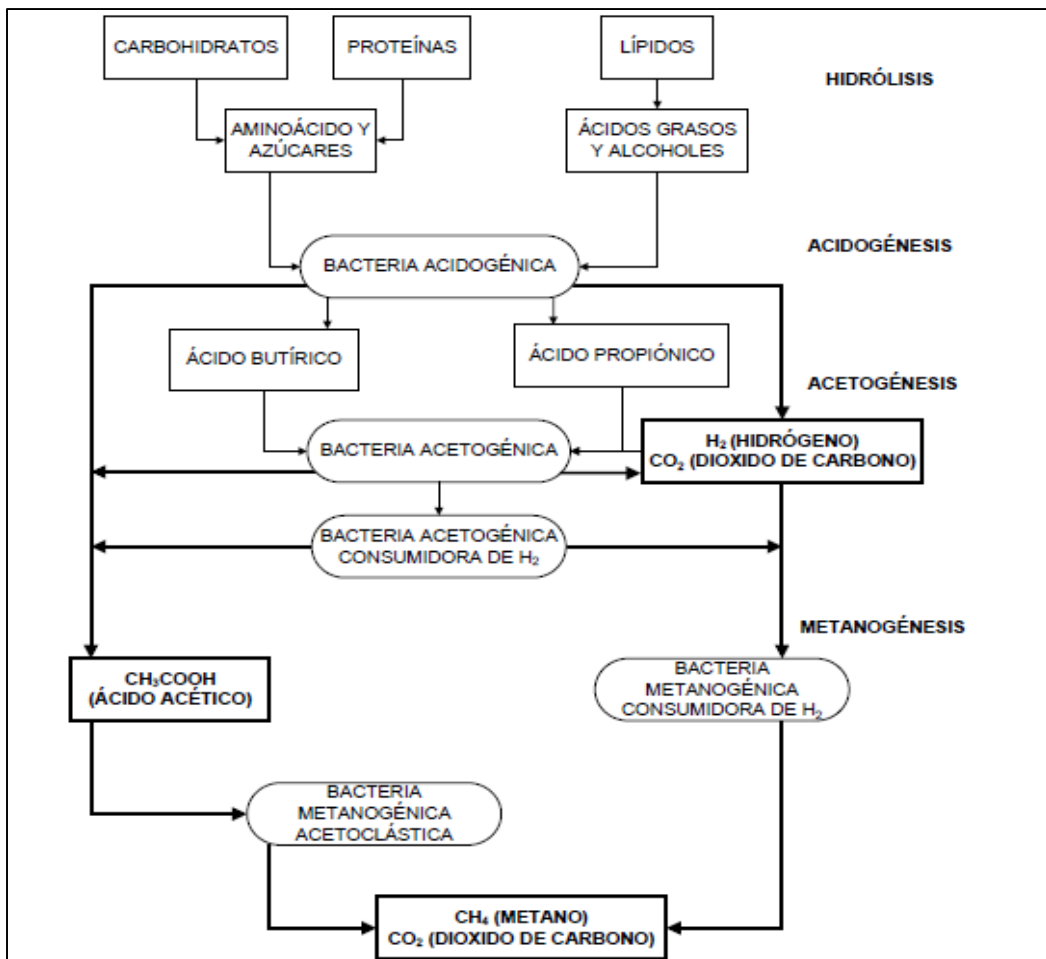


Figura 2. Etapas en la producción de metano a partir de residuos orgánicos.

Fuente: McInerney, 1980.

Por consiguiente, es posible considerar el tratamiento de los diversos residuos orgánicos realizado en un biodigestor como un proceso de tres etapas, al final de las cuales se obtiene un gas rico en metano llamado “biogás” y residuo rico en nitrógeno el cual es el bioabono.

La materia orgánica se descompone, dando como resultado dos productos principales:

1. Biogás

El término “Biogás” se refiere a los tanques construidos para producir gas metano, mediante la digestión anaeróbica de los desperdicios de granja u otros tipos de biomasa, tales como estiércoles, abonos humanos, residuos de cosechas, etc. (Taiganides, 1980).

Por otra parte, (Casillas & Mendieta, 2003) definen al biogás como una mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias.

Taiganides (1980), define al biogás como la mezcla de gases generada a partir de los desechos orgánicos. El biogás no es sino carbono e hidrogeno. Por consiguiente, todo el nitrógeno, el fósforo, el potasio y otros minerales permanecen en el líquido. Además, como se produce una cierta mineralización, el valor fertilizante de los sólidos residuales es mayor que en el estiércol fresco (FAO, 1983).

2. Abono orgánico

Se denomina abono orgánico a todo material vegetal o animal que sufre una biotransformación a través del tiempo por acción de los microorganismos. Se puede elaborar a partir de cualquier tipo de materiales vegetales o animales, dependiendo de su utilización final. La calidad nutricional de un abono orgánico no se mide solamente por su capacidad de aportar nutrientes directamente sino en la medida en que pueda promover los nutrientes del suelo.

La necesidad de disminuir la dependencia de productos químicos artificiales en los distintos cultivos, está obligando a la búsqueda de alternativas fiables y sostenibles. En la agricultura ecológica, se le da gran importancia a este tipo de abonos, cada vez más se están utilizando en cultivos intensivos.

2.2.2.1.2. Tipos de biogás

Dependiendo del substrato orgánico del que proceda y las características de las instalaciones de generación – captación del biogás, el biogás utilizable como energía renovable se puede agrupar en los siguientes tipos: (CIEMAT, 2010)

- Biogás de vertedero (biodigestión natural).
- Biogás de digestores (biodigestión provocada en instalaciones).

2.2.2.1.2.1 Biogás de vertedero (Biodigestión natural)

Su aprovechamiento se produce una vez sellados los vertederos de residuos sólidos urbanos y en función de su composición pueden presentar impurezas de siloxanos, compuestos fluorados y clorados.

La producción de biogás en un vertedero es variante en el tiempo, con un máximo alrededor de los 2 – 3 años tras el vertido.

El proceso de degradación de la materia orgánica puede durar más de 20 años: (CIEMAT, 2010)

- Los residuos de comida se degradan en un 50 % en 1 - 2 años.
- Los residuos de jardín se degradan en unos 5 años.
- Los residuos de papel, madera y textiles se degradan en unos 15 años.
- Los residuos como plásticos y gomas no se descomponen.

Una tonelada de RSU con un contenido de materia orgánica del 50 % genera aproximadamente 200 m³ de biogás.

No es posible captar todo el biogás generado; un 30 – 40 % del mismo se perderá a través de la superficie del vertedero.

Las características del biogás dependen principalmente de la composición de los RSU y de la humedad.

Tabla 1.

Características del biogás de vertedero.

CARACTERISTICAS DEL BIOGÁS	
Temperatura (°C)	35 - 40
Peso específico (kg/Nm ³)	0,95
Poder calorífico inferior (Kj/Nm ³)	18 000
Producción (Nm ³ /Tn RSU)	200
Rendimiento de captación	65 – 70 %

Fuente: Tecnologías avanzadas de generación eléctrica. Plantas biogás vertedero. Octubre 2001. EVE Ente Vasco de Energía.

2.2.2.1.2.2. Biogás de digestores (Biodigestión provocada en instalaciones)

Dentro de este tipo se pueden diferenciar tres subgrupos, dependiendo del origen de los sustratos a digerir: (CIEMAT, 2010)

- Biogás de depuradoras de aguas residuales.
- Biogás FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos).
- Biogás agroindustrial.

En algunos casos se requerirán mezclas (co-digestión) para hacer los procesos viables.

Biogás de depuradoras de aguas residuales

Este biogás se genera a partir de la digestión anaeróbica de los fangos primarios de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

- Lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas.
- Lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales industriales.

Biogás FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos)

Este biogás se genera a partir de la fracción orgánica procedente de los RSU.

Biogás industrial

El sector agroindustrial es la principal fuente generadora de subproductos y compuestos orgánicos. Los subproductos y residuos que forman el grupo de las materias primas agroindustriales son los que provienen de: la agricultura, la pesca, la ganadería, la industria alimentaria, la industria bioenergética.

2.2.2.1.3. Características del biogás

2.2.2.1.3.1. Composición media del biogás

El biogás tiene como principales componentes el metano y el dióxido de carbono. El metano es un gas combustible, incoloro e inodoro cuya combustión produce fuego de color azul y no contamina. El biogás, por su alto contenido de metano, es una buena fuente de energía (Deffis, 1994).

El metano está constituido solamente de carbono e hidrógeno; es un alcano, el más sencillo de los hidrocarburos (Scriban, 1985). La riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso.

La producción de biogás para cada tipo de substrato es variable en función de su carga orgánica y de la biodegradabilidad de la misma.

En general, los residuos orgánicos industriales y la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) presentan potenciales elevados de producción. Los residuos ganaderos y los lodos de depuradora presentan, sin embargo, potenciales menores, debido al relativamente bajo contenido en materia orgánica y a la baja biodegradabilidad de la misma. Existen opciones que permiten mejorar la producción de biogás de estos residuos:

- Mezcla con residuos de mayor producción potencial (co-digestión).
- Pre tratamiento para mejorar la degradabilidad del sustrato.
- Aumento de la temperatura para mejorar la velocidad de crecimiento de los microorganismos y la eficiencia de la fase hidrolítica.

El biogás es un combustible natural, de carácter no fósil, este gas posee un alto poder calorífico dependiendo del contenido de gas metano. El aprovechamiento del biogás está relacionado básicamente por el uso que se le puede dar como combustible para la generación de energía eléctrica o para la generación de energía térmica, como gas para uso doméstico o como combustible de vehículos.

El biogás es el producto del proceso de la digestión anaeróbica de material orgánico. Su composición específica depende de la biomasa y del tipo de biodigestor utilizado, la composición del biogás se detallada en la tabla 2.

Tabla 2.

Compuestos del biogás (%).

COMPUESTOS DEL BIOGÁS	(%)
Metano, CH ₄	50 – 75
Dióxido de carbono, CO ₂	25 – 45
Vapor de agua, H ₂ O	1 – 2
Monóxido de carbono, CO	0 – 0,3
Nitrógeno, N ₂	1 – 5
Hidrogeno, H ₂	0 – 3
Sulfuro de hidrogeno, H ₂ S	0,1 – 0,5
Oxígeno, O ₂	0,1 – 1,0

Fuente: El sector del biogás agroindustrial en España. Mesa sobre materia agraria y biocombustible. Ministerio del ambiente y medio rural y marino. Madrid (2010).

Tabla 3.

Producción del biogás en función del sustrato utilizado.

Tipo de residuos	Contenido orgánico	Sólidos volátiles (%)	Producción de biogás (m³/Tn)
Purines de cerdo	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3 - 5	10 - 20
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3 - 4	17 – 22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	15 – 20	85 – 110
FORSU separada en origen	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	20 – 30	150 - 240

Fuente: Coombs, 1990.

2.2.2.1.3.2. Equivalencias energéticas del biogás

El biogás es un gas combustible cuya composición depende fundamentalmente del tipo de sustrato utilizado y digerido en el proceso, y su alta concentración en metano (CH₄), de elevada capacidad calorífica

(5 750 kcal/m³), le confiere características combustibles ideales para su aprovechamiento energético en motores de cogeneración, calderas, turbinas, pudiendo por tanto generar electricidad, calor o ser utilizados como biocarburantes (CIEMAT, 2010).

La equivalencia energética del biogás depende de la concentración de metano que haya en él, ya que el poder calorífico del CO₂ es nulo. Así cuanto mayor sea la cantidad de metano en el biogás, mayor será el poder calorífico del mismo.

Gas natural

De manera natural aproximada, se puede constatar que el gas natural tiene un contenido en metano (CH₄) del 100 %.

1 Nm³ de Gas Natural = 11 kWh.

La cantidad de metano (CH₄) necesaria para obtener 100 kWh de energía total es de 1 m³ de metano (CIEMAT, 2010).

1 Nm³ CH₄ = 10 kWh.

Biogás

- 1 Nm³ de biogás (97 % de metano) = 9,67 kWh.
- 1 Nm³ de biogás (65 % de metano) = energía de 0,65 m³ de gas.
- 1 m³ (70 % metano) = 100 W.
- 1 m³ (70 % metano) = 4 700 a 5 500 kcal/m³

Combustibles

- 1 litro de gasolina = 9,06 kWh.
- 1 litro de diésel = 9,8 kWh.

Energía eléctrica

El rendimiento eléctrico de un motor es de 40 - 45 %.

- 1 m³ de biogás = 2,8 kWh de energía eléctrica renovable.

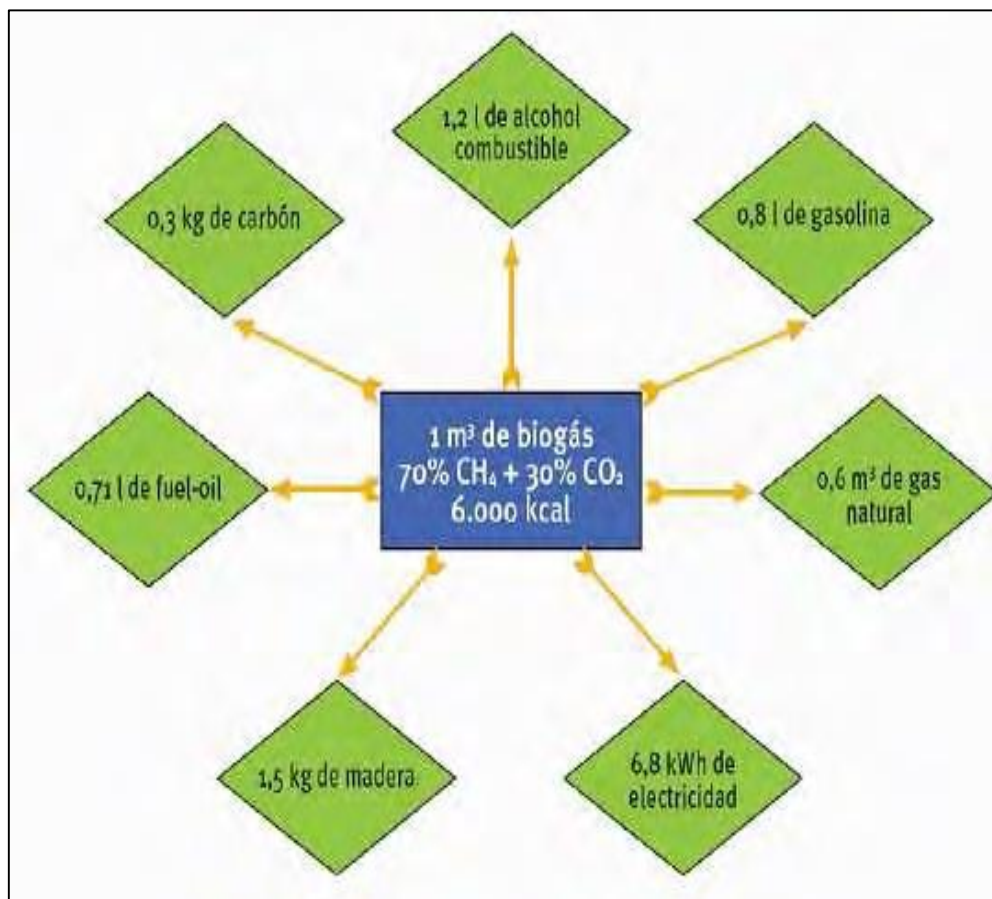


Figura 3. Criterios de equivalencia energética del biogás respecto de otras fuentes de energía.

Fuente: CIEMAT, 2010.

2.2.2.1.3.3. Proceso de formación del biogás

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico que, en condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno) permite transformar la materia orgánica en metano. Se compone de múltiples etapas en que intervienen una población heterogénea de microorganismos.

El proceso completo se puede resumir en dos fases principales: una primera, hidrolítica fermentativa; y una segunda, metanogénica.

Fase hidrolítica:

Los polímeros orgánicos son metabolizados mediante hidrólisis y fermentación microbiana en una mezcla de ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico, valérico, láctico...), carbónico e hidrógeno.

Fase metanogénica:

En la segunda fase, encadenada con la primera, se transforman los productos finales de la misma en metano y dióxido de carbono, mediante las bacterias metanogénicas que son anaeróbicas estrictas.

2.2.3. Etapas del proceso de la digestión anaeróbica

2.2.3.1. Proceso de hidrólisis

La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación de la materia orgánica compleja.

Los polímeros complejos son degradados a moléculas simples, como las proteínas a aminoácidos y los polisacáridos a monosacáridos (Carrillo, 2003), por parte de las bacterias hidrolíticas, las cuales segregan enzimas para la conversión de dichos compuestos complejos para volverlos solubles.

El proceso de hidrólisis, consiste en una conversión hidrolítica de compuestos orgánicos de alto peso molecular en una reducción de compuestos orgánicos de molecular adecuado para mayor degradación (Catalán & Lafuente, 1997). La hidrólisis de materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros es el paso inicial para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos, ya que los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular (Martí-Ortega, 2006). La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan de residuos con alto contenido en sólidos (Pavlosthatis & Giraldo-Gómez, 1991; citados por Martí & Ortega, 2006).

La hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis (Speece, 1993; citado por Martí & Ortega, 2006). Las bacterias

que producen la hidrólisis pueden ser anaerobias estrictas o facultativas e incluyen; *Clostridium spp*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp*, *Desulphovibrio spp*, *Corynebacterium spp*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus*, y *Escherichia coli*. Otros grupos fisiológicos presentes incluyen los productores de enzimas proteolíticas, lipolíticas, ureolíticas o celulíticas (Catalán & Lafuente, 1997).

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos:

Los hidratos de carbono están formados a partir de la unión de monosacáridos por medio de enlaces glicosídicos, y su hidrolisis da origen a una gran variedad de polisacáridos cuya degradación requiere la acción de diversos sistemas enzimáticos con características y modos de acción diferentes (Warre, 1996; citado por Poirrer González, 2005). Así, por ejemplo la degradación de celulosa es llevada a cabo por una mezcla enzimática compuesta de exo-glucanasas, endo-glucanasas y celobiasas, siendo esta mezcla comúnmente denominada celulasas. Las quitinasas hidrolizan la quitina y el quitosano; y el almidón requiere de la acción de una compleja mezcla enzimática formada por α y β amilasas, glucoamilasas y glucanasas (Glenn, 1976; citado por Poirrer González, 2005).

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia ya que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptido y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a Ácidos Grasos Volátiles (AGV's), dióxido de carbono, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

Degradación de los lípidos en ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta y es la etapa limitante del proceso de hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios, afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, exosas y ácidos urónicos (Martí & Ortega, 2006).

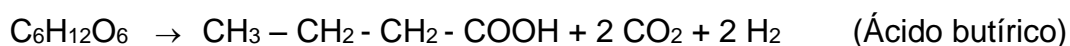
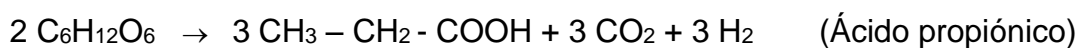
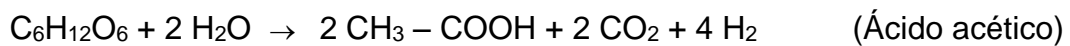
Por otro lado el ácido sulfhídrico, H_2S , se forma durante el proceso anaeróbico. En presencia de sulfatos de bacterias metanogénicas compiten con las bacterias sulfato reductoras por sustratos útiles.

2.2.3.2. Proceso acidogénico

La acidogénesis implica la conversión biológica de compuestos orgánicos de bajo peso molecular en Ácidos Grasos Volátiles (AGV's) tales como Ácido Acético, Propiónico, Butírico y Valérico (Roberts & col., 2000)

A estas alturas del proceso, la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído todo el alimento posible de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, han de eliminar los productos desechos de sus células (Catalán & Lafuente, 1997). La fermentación ácida se caracteriza por una disminución del pH, desde valores cercanos a pH neutro hasta valores entre 3,5 y 6,0 (Hernández, 2000) es importante hacer notar que, a través de la etapa de fermentación ácida, no existe reducción apreciable de DBO o DQO, ya que es simplemente una conversión de un tipo de compuestos orgánicos a otro.

Las bacterias, que llevan a cabo estas dos primeras etapas son las llamadas formadoras de ácidos, son facultativas y muy resistentes a las condiciones. Son bacterias de crecimiento rápido, cuyo tiempo mínimo de doblaje es de 30 minutos. Partiendo de la glucosa las reacciones son:



2.2.3.3. Proceso metanogénico

Las bacterias productoras de metano convierten los AGV's a metano y dióxido de carbono (Roberts y col., 2000). Como resultado de la acción de las bacterias acidogénicas y acetogénicas se producen una gran concentración de acetato, hidrógeno y CO₂ (en forma de bicarbonato) que son metabolizados por las bacterias metanogénicas, junto con el formiato y el metanol, que también se habían formado en las fases anteriores, con la producción de metano como producto final (Catalán & Lafuente, 1997).

Las bacterias metanogénicas forman un reducido grupo de bacterias anaerobias, muy primitivas, normalmente son mesófilas (30 – 40 °C), pero también las hay adaptadas a condiciones termófilas (55 – 60 °C), y psicrófilas (menor a 15 °C) (fondos de lagos y sedimentos marinos). Son autótrofas y utilizan el CO₂ como fuente de carbono y el H₂ como fuente de energía y poder reductor (electrones). Algunas, en lugar de H₂ son capaces de utilizar electrones procedentes de la oxidación del ácido fórmico, metanol y acetato. Las principales reacciones metanogénicas globalizadas son las siguientes: (Catalán & Lafuente, 1997).

La siguiente reacción es producida por bacterias hidrogenofílicas que generan alrededor del 25 % del metano. Estas bacterias tienen un crecimiento bastante rápido, con un tiempo de duplicación de unas 6 horas la reacción del ácido acético, se debe a las bacterias acetoclásicas.

Las bacterias metanogénicas y las acidogénicas forman una relación microbiana (beneficio mutuo) en la cual las metanogénicas convierten los productos tales como hidrogeno, formiato, y acetato a metano y dióxido de carbono. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles a los inhibidores, aunque todos los grupos bacterianos pueden ser afectados por los componentes tóxicos presentes en el biodigestor.

La digestión anaerobia es el proceso biológico degradante en el cual se parte de materiales orgánicos que a partir de varias etapas se convierten en biogás con una composición de metano, dióxido de carbono, hidrógeno sulfurado y otros gases de menor importancia. Este trabajo lo realizan un conjunto de bacterias sensible a la presencia de oxígeno en el interior de los recipientes, la digestión es intervenida por un grupo de macroorganismos, las productoras de ácidos y las productoras de metano.

A continuación se presenta un cuadro con las condiciones óptimas de desarrollo para los microorganismos implicados en la producción de biogás.

Tabla 4.

Comparación de las necesidades de hábitat de bacterias implicadas en la producción de biogás.

Parámetros	Bacterias hidrolíticas y acidogénicas	Bacterias metanogénicas
Tiempo de reproducción	De 3 horas a 3 días	6 – 14 días
Temperatura óptima	30 °C a 65 °C	37 °C a 55 °C
Valor pH	Mínimo hasta 3,5 y máximo 7,8	Cerca de 7 - 8
Vitalidad	Robusta, resisten perturbaciones en la temperatura y el valor pH	Muy sensibles frente a cualquier perturbación en el valor pH y la temperatura
Sensibilidad aerobia	Trabajan también ante la introducción de oxígeno cuando se produce en la carga del depósito de hidrólisis	Mueren con el contacto con el oxígeno
Producción de biogás	Poca. Cantidad de metano 0 – 30 %	Alta Cantidad de metano mayor a 50 %

Fuente: Kepler (2009).

2.2.3.4. Biodigestores

Un biodigestor es un tanque construido de diferentes formas geométricas, tamaños y materiales, donde se almacenan los residuos orgánicos como sobrantes de cocina, estiércol de animales y humanos, material vegetal, etc. Estos elementos diluidos en agua forman una mezcla que es descompuesta biológicamente por microorganismos. En el proceso de descomposición se forma el biogás, por lo que el tanque debe disponer de algún sistema que le permita capturar el biogás controlando su presión y evitando su mezcla con aire atmosférico.

Como resultado de la descomposición biológica, los residuos almacenados se transforman en bioabono denominado biol, el cual es de fácil absorción para las plantas y tiene un alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, y está libre de microorganismos patógenos dañinos para las plantas (Duque, 2007).

Los biodigestores son recipientes o tanques cerrados herméticamente. Estos permiten la carga de sustratos de biomasa denominados afluente y la descarga de bioabono o biol denominado efluente y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético (Herrero, 2008).

2.2.3.4.1. Clasificación de los biodigestores

Los biodigestores se clasifican en base al proceso o modo de operación y a su capacidad de carga en el reactor. La clasificación los define como digestores de régimen batch o por lotes, de régimen semi-continuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo.

- **Biodigestor de carga en batch**

El biodigestor tipo batch se carga una sola vez en forma total y la descarga se la hace una vez que haya dejado de producir biogás. Este tipo de biodigestores se aplica cuando existen problemas operativos o cuando la materia orgánica a procesar está disponible en forma

intermitente. Por lo general el sistema tipo batch consiste en tanques herméticos con una salida de gas la cual es conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás como se muestra en la figura 4.

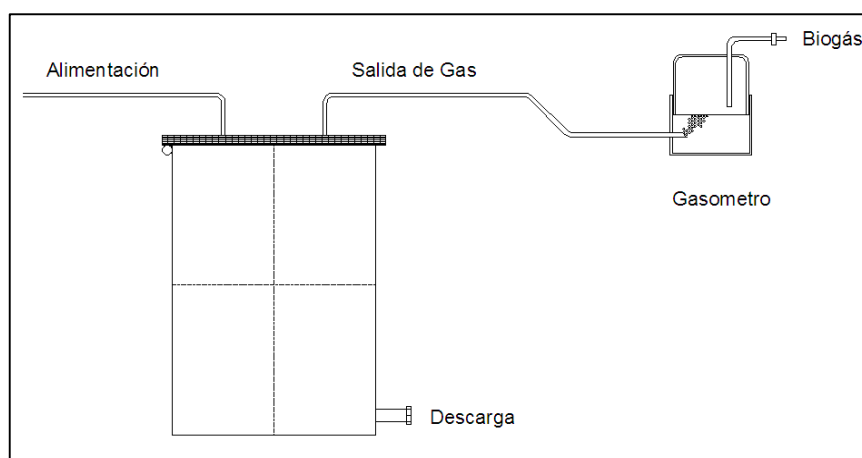


Figura 4. Biodigestor tipo Batch.

Fuente: IDAEA, 2007.

Este tipo de reactores pueden procesar una gran variedad de materiales orgánicos, los cuales pueden ser recopilados a campo abierto. Impurezas como tierra u otros inertes mezclados en el sustrato entorpecen la operación del biodigestor. Para obtener una producción de biogás constante se instalan varias unidades las cuales se cargan a distintos tiempos de tal forma que cuando disminuye o acaba la producción de gas de una unidad, la siguiente unidad este empezado la producción del mismo.

Este tipo de digestores es ideal nivel de laboratorio si se desea evaluar los parámetros del proceso, o el comportamiento de un residuo orgánico

específico o de la mezcla de materiales orgánicos. Prácticamente no requiere de ninguna atención diaria. La producción de biogás de este tipo de biodigestores es de 0,5 a 1 m³ biogás/m³ digestor (Solari, 2004).

- **Biodigestor de mezcla completa**

En el reactor de mezcla completa se mantiene una distribución uniforme de la concentración, tanto del sustrato como de los microorganismos. Esto se consigue por medio de un sistema de agitación ya sea de manera mecánica o neumática, tratando en lo posible que no sea de una manera violenta ya que puede afectar a la población bacteriana. Estos tipo de digestores admiten mayor carga de materiales poco diluidos, por lo que el requerimiento de agua es menor que en los sistemas continuos. En la figura 5 se muestra un diagrama de un digestor de mezcla completa.

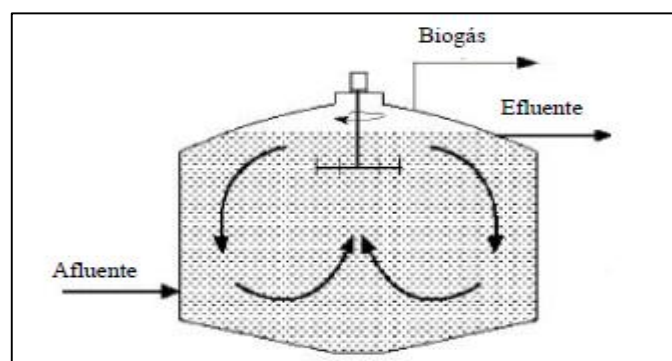


Figura 5. Digestor de mezcla completa.

Fuente: IDAEA, 2007.

- Biodigestores de régimen semi-continuo

El digester de tipo semi-continuo es el más utilizado en áreas rurales o en pequeñas granjas agrícolas, cuando se trata de digestores pequeños para usos domésticos. Entre los diseños más comunes son los conocidos tipo hindú y el chino (ver figura 6).

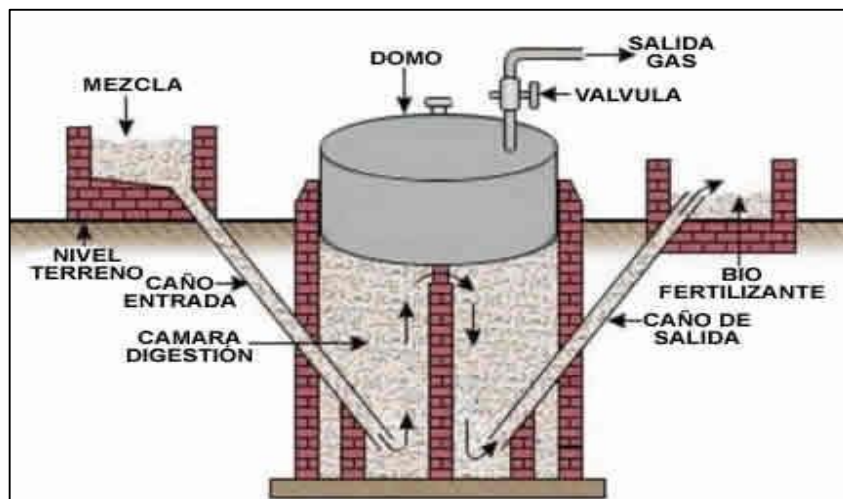


Figura 6. Digestor tipo Hindú.

Fuente: IDAEA, 2007.

- Biodigestores de régimen continuo

Se utiliza para plantas de producción de biogás con el objetivo de generar energía eléctrica. Estos digestores son de gran tamaño y con ello el nivel de tecnología, industrialización e instrumentación son altos. Se emplean equipos de control para la alimentación, para la agitación, para elevar o disminuir la temperatura, entre otros. Este tipo de biodigestores permiten controlar la digestión de una manera precisa.

Es por ello que se puede cualquier tipo de anomalías que se presente dentro del proceso (ver figura 7).

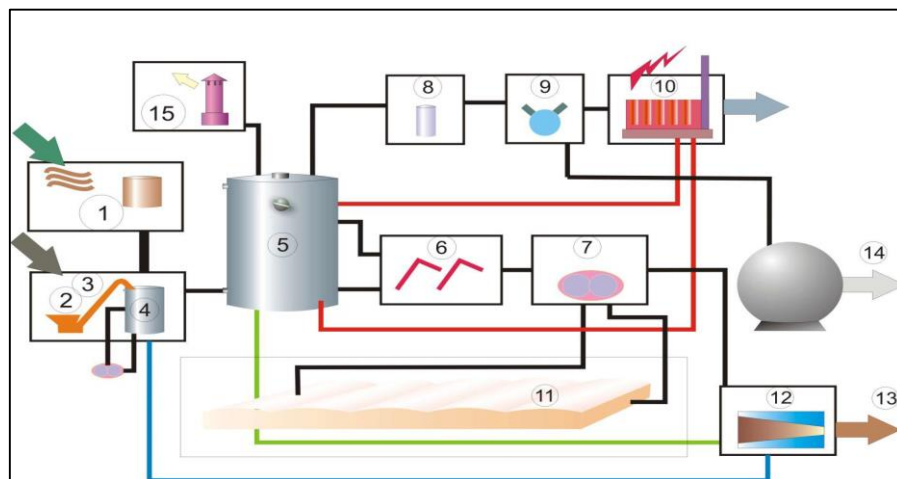


Figura 7. Digestores de régimen continuo.

Fuente: IDAEA, 2007.

Número	Equipos y Procesos
1	Ingreso de residuos líquido y semilíquidos
2	Ingreso de residuos sólidos. Triturados y dosificador
3	Transportador de residuos sólidos
4	Tanque de mezcla e hidratador de biomasa
5	Biodigestor anaeróbico 1
6	Control y dosificación de efluentes
7	Cuarto de bombas
8	Filtro de biogás
9	Compresor de biogás
10	Generador eléctrico
11	Biodigestor anaeróbico 2
12	Tratamiento de estabilización de efluentes
13	Salida del fertilizante orgánico
14	Almacenamiento y salida de biogás
15	antorcha

Leyenda de la figura 7.

Este tipo de biodigestores permiten controlar la digestión de una manera precisa. Es por ello que se puede corregir cualquier tipo de anomalías que se presente dentro del proceso. Con este reactor es posible manejar las variables relacionadas a carga específica, tiempo de retención y temperatura, a largos periodos. La puesta en marcha solo se repite cuando se vacía el digestor por razones de mantenimiento o fallas mecánicas.

Las desventajas que presenta este tipo de digestores son la baja concentración de sólidos, no posee un diseño apropiado para materiales fibrosos, existen problemas de limpieza por sedimentos y se generan espumas e incrustaciones (Moncayo, 2008). Entre las ventajas que presenta este tipo de digestores tenemos la alta eficiencia, tiempos de residencia más cortos y mejor calidad de productos. En este sistema se puede alimentar el biodigestor con sustratos de diferente calidad sin afectar la producción de biogás y obteniendo resultados bastante satisfactorios (Guevara, 1996).

Las materias primas para la producción de biogás incluyen dentro de una amplia visión de excretas de animales y humanas, residuos de diferentes tipos; la materia prima no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales usualmente los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas (Hilbert, 2003).

Los volúmenes de gas suelen expresarse como m³ biogás/m³ y difieren según la materia orgánica, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo (Carrillo, 2003).

Todos los residuos orgánicos pueden producir biogás, así sea en mínimas proporciones, depende de la composición físicos – química y especialmente de la cantidad de carbono degradable que contenga; la composición del biogás que obtendremos es resultado de su fermentación. La siguiente tabla expone dicha composición:

Tabla 5.

Rendimiento de la materia prima empleada.

Componente	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Relleno sanitario
Metano	50 – 80 %	50 – 80 %	50 – 70 %	45 – 65 %
Dióxido de Carbono	20 – 50 %	20 – 50 %	30 – 50 %	34 – 55 %
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
hidrógeno	0 – 2 %	0 – 5 %	0 – 2 %	0 – 1 %
Sulfuro de hidrógeno	100 -700 ppm	0 – 1 %	0 – 2 %	0,5 – 100 ppm

Fuente: Carrillo (2003).

2.2.4. Parámetros que afectan al proceso de digestión

Los factores físicos y químicos que condicionan este proceso son varios. A continuación se describen los más importantes:

2.2.4.1. Nutrientes

Para el desarrollo del proceso se necesita, además de una fuente de carbono y energía, la presencia de una serie de nutrientes minerales (nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, etc.) en el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana.

Relación C:N de la materia prima

Aunque prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás, la cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la composición de la materia prima utilizada. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células.

Una relación C:N de 16:1 es óptima en el proceso para la producción y fermentación estable de excretas de animales. La relación máxima para obtener una buena producción de biogás no debe superar la relación 30:1 (Taiganides, 1980).

En la tabla 6, se puede observar la relación carbono/nitrógeno dependiente del origen de la materia orgánica, ya sea de origen vegetal o animal, que se utilizan para la obtención de biogás y biorgánico.

Tabla 6.

Relación carbono/nitrógeno de acuerdo al origen de materia orgánica.

Materiales	Carbono % de peso total	Nitrógeno % de peso total	Relación C/N
Panca de arroz	42	0,63	67:1
Caña de maíz	40	0,75	53:1
Tallos de soya	41	1,3	32:1
Estiércol de bobino fresco	7,3	0,29	25:1
Estiércol de ovino fresco	16	0,55	29:1
Estiércol de equino fresco	10	0,42	24:1
Estiércol de porcino fresco	7,3	0,6	13:1
alfalfa	35	2,9	12:1

Fuente: Agricultura Orgánica, Manuel Suquilanda.

2.2.4.2. Temperatura

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.

La temperatura es uno de los factores más importantes que afectan la actividad microbiana dentro de un biodigestor aneróbico, y la producción de metano es fuertemente dependiente de la temperatura. Las fluctuaciones afectan la actividad de las bacterias productoras de metano.

Tabla 7.

Intervalos de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaeróbicas.

TEMPERATURA		
Bacterias	Rango de temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20 °C	± 2 °C/hora
Mesofílicas	Entre 20 °C y 40 °C	± 1 °C/hora
Termofílicas	Más de 40 °C	$\pm 0,5$ °C/hora

Fuente: Informe de vigilancia tecnológica Madrid. "situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento" (GTZ GmbH, 1999).

En función de la temperatura óptima de crecimiento, los microorganismos se clasifican en:

- Psicrófilos (temperatura óptima de crecimiento inferior a 30 °C).
- Mesófilos (óptimo de crecimiento entre 30 y 45 °C),
- Termófilos (temperatura óptima de crecimiento entre 50 y 60 °C).

2.2.4.3. pH

Es uno de los parámetros de control más habituales debido a que en cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un intervalo de pH diferente. Así, el intervalo de pH óptimo de los microorganismos hidrolíticos es entre 7,2 y 7,5; para los acetogénicos entre 7 y 7,2 y para los metanogénicos entre 6,5 y 7,5.

Si durante la fase de hidrólisis, acidificación y acetogénesis el pH cae por debajo de 6,3 como resultado de la sobre-existencia de ácidos grasos

volátiles (AGV), la población de bacterias metanogénicas experimentará una reducción, ya que son altamente sensibles a los cambios de pH, además habrá una cantidad mayor de AGV que serán transformados en acetato y las bacterias metanogénicas tendrán más sustrato del que son capaces de metabolizar (Carrillo, 2003).

2.2.4.4. Contenido de sólidos

Es también un factor determinante, ya que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos y, por lo tanto, puede verse afectadas la eficiencia y producción de biogás. Sin embargo, se puede encontrar en la literatura datos de producciones de gas importantes logradas en rellenos sanitarios con un alto contenido de sólidos (Pavlostathis & Gómez, 1991).

Para estimar la producción de biogás se realizan mediciones puntuales del contenido de nutrientes, pero estos no garantizan el pronóstico de la producción de biogás debido a que estos varían día a día. Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre 7 y 9 % de sólidos totales es óptima para la digestión (Carrillo, 2003). La ventaja principal de la codigestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando la carencia de cada uno de los sustratos por separado, resultando una metodología exitosa en su aplicación.

2.2.4.5. Tiempo de residencia.

El tiempo de residencia es referido a los sustratos y da idea de la velocidad del proceso en cuestión de degradación de la materia orgánica (Kepler, 2009).

Se define como el tiempo que el sustrato está sometido a la acción de los microorganismos en el reactor. Cabe indicar que este parámetro sólo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos (batch), donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor.

El Tiempo de residencia está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

El tiempo de retención depende de la temperatura y junto con la carga del biodigestor determinan las dimensiones del sistema. Es un parámetro fundamental en el diseño y operación de los procesos anaerobios. En general se requieren valores mayores a de 30 días de tiempo de retención de sólidos para procesos a 30 °C para un tratamiento efectivo, este valor incrementa conforme descienda la temperatura.

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el Tiempo de residencia, ya varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

2.2.4.6. Inhibidores

Existe una gran cantidad de sustancias que pueden inhibir la digestión anaeróbica. Entre ellos, cabe destacar el oxígeno, amoníaco, metales pesados, antibióticos y detergentes, ácidos volátiles.

Oxígeno

Aunque su efecto inhibidor no es permanente, ya que en la flora bacteriana existen microorganismos que irán consumiendo el oxígeno que pueda tener el medio.

Amoníaco

Si la biomasa es rica en nitrógeno, se puede producir un exceso de amoníaco que inhibe el proceso.

Metales pesados

Otros inhibidores son los metales pesados que actúan sobre los microorganismos metanogénicos.

Antibióticos y Detergentes

Algunas sustancias orgánicas, como antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones, pueden inhibir el proceso.

Ácidos Volátiles

Por último, una concentración elevada de ácidos volátiles puede producir un efecto inhibitor. Un síntoma típico de mal funcionamiento de los digestores es el aumento de la concentración de los ácidos volátiles en el efluente.

En la tabla 8, se representan los valores de concentración inhibitora de los inhibidores más habituales. Estos valores son orientados, ya que las bacterias se pueden adaptar con el tiempo a las condiciones más desfavorables.

Tabla 8.

Intervalos de concentración en el sustrato que resultan tóxicos.

INHIBIDORES	
INHIBIDORES	INTERVALO (ppm)
Na	3 500 – 5 500
K	2 500 – 4 500
Ca	2 500 – 4 500
Mg	1 000 – 1 500
NH₄	1 500 – 3 500

Fuente: El sector del biogás agroindustrial en España. Mesa sobre materia prima agraria y biocombustible. Ministerio ambiente, y medio rural y marino. Madrid 16 setiembre de 2010.

Tabla 9.

Valores de las concentraciones de inhibidores comunes.

INHIBIDORES	
INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA (mg/ml)
Sulfuro (azufre)	200
Cu	10 – 250
Zn	350 – 1 000
Ni	100 – 1 000
CN	2
Na	8 000
Ca	8 000
Mg	3 000

Fuente: informe de vigilancia tecnológica Madrid. "Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento" (GTZ GmbH, 1999).

2.2.4.7. Agitación

Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios "muertos" sin actividad biológica.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se deberán realizar las siguientes consideraciones: el proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de este equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de

alimento para el siguiente implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás (Hernández, 1988).

Como conclusión en la elección de un determinado sistema se tendrá siempre presente tanto los objetivos buscados como el prejuicio que puede causar una agitación excesiva debiéndose buscar un punto medio óptimo.

2.2.4.8. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es importante ya que determina la cantidad de materia prima que será oxidada, es empleada como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable (Taiganides, 1980).

2.2.4.9. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Es el consumo de oxígeno en mg/l de la suspensión. Tanto la DBO como la DQO son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la DBO es la más representativa de la degradabilidad de la misma (Hernández, 1988).

2.2.5. Pre tratamiento del sustrato en la producción de biogás en biodigestores

Además de homogenizar la mezcla de sustratos que posteriormente serán introducidos en el biodigestor, la aplicación de un pre tratamiento adecuado, mejorará el rendimiento de la digestión anaerobia, aumentando la producción y calidad del biogás, reduciendo los tiempos de retención,

higienizando los subproductos (según los casos) y creando unas condiciones óptimas para el crecimiento microbiano. En general el pretratamiento facilita la liberación del carbono de la materia orgánica contenida en el sustrato, aumentan la superficie específica de la materia y solubilizan y degradan la materia.

Tipos de pre tratamientos:

Mecánicos:

Que tiene como principio básico la trituración y homogenización de la mezcla. Con este tipo de tratamientos se logra una reducción del tamaño de las partículas y un incremento de la superficie específica disponible para las bacterias.

Térmicos:

Están basados en la higienización de los materiales tratados, con temperaturas comprendidas entre 60 a 70 °C, favoreciendo la etapa de hidrólisis e incrementando la producción de biogás.

Biológicos:

Los más representativos son los tratamientos fúngicos, ensilados y tratamientos enzimáticos, que se realizan sobre restos de cereales, de maíz, los tratamientos enzimáticos, aprovechan la actividad metabólica de algunas enzimas hidrolíticas, para degradar parcialmente los sustratos.

Químicos:

Se aplican sobre los lodos de depuradora, residuos de la industria alimentaria, mediante la adición de sustancias de origen ácido o bases.

Termoquímicos:

Con estos métodos se regula el pH y la temperatura deseados de la mezcla. Se realizan sobre residuos de paja, lodos de depuración y residuos sólidos urbanos, entre otros (El sector del biogás agroindustrial en España. Mesa sobre materia prima agraria y biocombustibles, 2010).

2.2.6. Codigestión

La “co-digestión anaerobia” consiste en el tratamiento anaerobio conjunto de residuos orgánicos de diferente origen y composición, con el fin de aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de procesos más eficaces, compartir instalaciones de tratamiento, unificar metodologías de gestión, amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado, así como reducir costos de inversión y explotación (El sector del biogás agroindustrial en España, 2010). En general, la digestión anaerobia se puede aplicar a cualquier residuo. No obstante, cuanto mayor sea su contenido de materia orgánica, mayor será la producción de biogás y más apropiado (rentable económicamente) será este tratamiento.

2.2.7. Beneficios aportados por el biogás desde el punto de vista energético, medioambiental, económico y socioeconómico

2.2.7.1. Beneficio desde el punto de vista energético.

- Proceso neto de producción de energía.
- Generación de un combustible renovable de alta calidad.

2.2.7.2. Beneficio desde el punto de vista medioambiental.

- Realizada en las condiciones adecuadas, la combustión de biogás produce agua y CO₂ pero dicha cantidad emitida de este gas, principal responsable del efecto invernadero, fue captada por las plantas durante su crecimiento, es decir el CO₂ de la biomasa viva forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmosfera y la vegetación, por lo que no supone un incremento del gas invernadero en la atmosfera siempre y cuando la vegetación se renueva a la misma velocidad en que se degrada. Así mismo, no produce emisiones sulfuradas o nitrogenadas, ni partículas sólidas.
- A nivel mundial, la disponibilidad de energía se ha convertido en uno de los principales problemas.
- El uso de combustibles fósiles para obtener energía, sobre todo eléctrica, trae como consecuencia el vertido de sustancias toxicas al

aire, al agua y a los suelos, dañando la naturaleza a corto, medio y largo plazo. Frente a esta situación y en un futuro no muy lejano, parece clara la necesidad de una transición en las fuentes de energía desde su actual dependencia de los hidrocarburos a nuevas energías renovables y cada vez más ecologistas.

2.2.7.3. Beneficios económicos resultantes de la aplicación de esta tecnología

- Producción de energía (electricidad y calor).
- Producción de bioabono de alta calidad.
- Los beneficios micro-económicos a través de la sustitución de energía y fertilizantes, del aumento de ingresos y del aumento de la producción agrícola-ganadera cuando se emplea a nivel agropecuario.
- Beneficios macro-económicos a través de la generación descentralizada de energía, reduciendo costos de importación y protección ambiental.
- Mayor eficiencia en materia de costos que otras opciones de tratamiento desde la perspectiva del ciclo de vida y del rendimiento.
- El aprovechamiento energético de la biomasa contribuye a la diversificación energética, uno de los objetivos marcados por los planes energéticos, tanto a escala nacional como mundial, desplazamiento.

2.2.7.4. Beneficios socioeconómicos

- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.
- Favorece el desarrollo del mundo rural y supone una oportunidad para el sector agrícola, ya que permite sembrar cultivos energéticos en sustitución de otros excedentarios (El sector del biogás, 2010).

2.2.8. Adopción de una perspectiva teórica

2.2.8.1. Lógica difusa

La **lógica difusa** es una rama de la inteligencia artificial, en la cual las proposiciones pueden ser representadas con diferentes grados entre lo verdadero o lo falso. Este tipo de lógica se basa en reglas basadas en el conocimiento humano, por lo que tolera errores e incluso puede analizar estos para la resolución de problemas o toma de acciones en un determinado sistema de control. La lógica difusa emula el razonamiento humano, ya que permite utilizar además de números, etiquetas lingüísticas, que a pesar de no ser información exacta, representa de la mejor manera el sentido común de las personas. Por ejemplo, al calentar agua en un determinado recipiente, si se palpara el agua, la respuesta inmediata de un ser humano sería está caliente o tal vez sigue fría, como se puede observar se maneja etiquetas lingüísticas y no numéricas ya que a pesar de sentir la temperatura del agua es casi imposible determinar el

valor exacto al cual esta se encuentra; por tal razón se dice que la lógica difusa permite utilizar información imprecisa (Castillo, 2008).

La lógica difusa fue desarrollada a partir de 1965 por Lotfi A. Zadeh, con la idea de que podemos emplear las matemáticas para conectar el lenguaje con la inteligencia humana. Algunos conceptos pueden definirse mejor con palabras, por eso los conjuntos difusos ayudan a construir mejores modelos de la realidad. Aunque originalmente la intención de Zadeh era crear un formalismo para manipular de forma eficiente la imprecisión típica del razonamiento humano expresado lingüísticamente, el éxito de la lógica difusa llegó en el campo del control automático de procesos. El número de patentes sobre aplicaciones de la lógica difusa está aumentando exponencialmente. Una muestra de su popularidad es la presencia cada vez más frecuente del sello “*fuzzy logic*” impreso sobre los productos, como símbolo de calidad y alto desempeño (Castillo, 2008).

Podemos ser relativamente imprecisos en la representación de un problema y aun así obtener una buena solución. La lógica difusa se diseñó para manejar la incertidumbre y la imprecisión.

Características de las técnicas difusas:

- La lógica difusa se presenta como una extensión de la lógica clásica, que puede ser útil en la resolución de problemas que por su

complejidad, incertidumbre o no linealidad sean difíciles de tratar con métodos más convencionales.

- Un sistema de inferencia difuso es una relación o mapeo de un vector de datos de entrada a un vector de datos de salida.
- La lógica difusa ignora el alto contenido de matemáticas y física de los procesos y va directamente al contexto donde los sistemas trabajan, esto permite aproximarse intuitivamente a la solución de un problema mediante la formulación de reglas sencillas. El control difuso no necesita de la obtención del modelo matemático del proceso.

Para entenderlo de una mejor manera, y citando como ejemplo la temperatura, según la lógica clásica se puede tener dos valores baja o alta, representada numéricamente como 0 o 1 respectivamente, en el caso de la lógica difusa la temperatura puede tomar un valor cualesquiera entre el rango de 0 a 1, valor que puede pertenecer a diferentes conjuntos de temperatura como, baja, media, alta, es decir, que el valor obtenido entre 0 y 1 puede pertenecer en un 30 % a la temperatura baja y en un 70 % a la media, formando un 100 % que representa a la totalidad. Estos valores son obtenidos con el fin de tomar acciones de control que garanticen la eficacia de un proceso o sistema (Castillo, 2008).

En la figura 8 se puede observar la diferencia entre la lógica booleana y la lógica difusa.

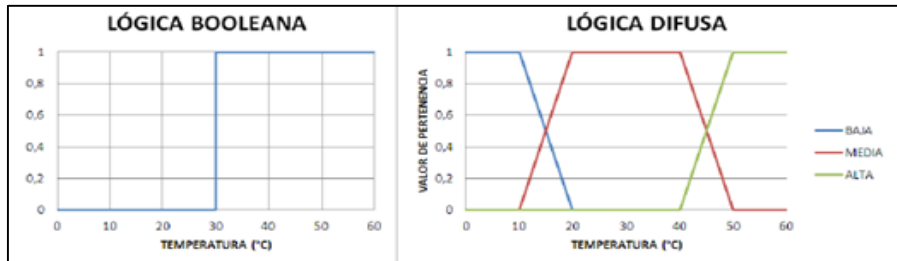


Figura 8. Lógica booleana vs. Lógica difusa.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.8.2. Sistema de control basado en lógica difusa

Los principales elementos que intervienen en un sistema basado en control difuso son: el diseño del controlador, el cual representa todo el algoritmo matemático para un sistema difuso, y finalmente su implementación o adecuación en un lazo de control convencional (Duran & Benito, 2011).

En la figura 9 se puede observar la relación que existe entre un lazo de control convencional con un controlador difuso.

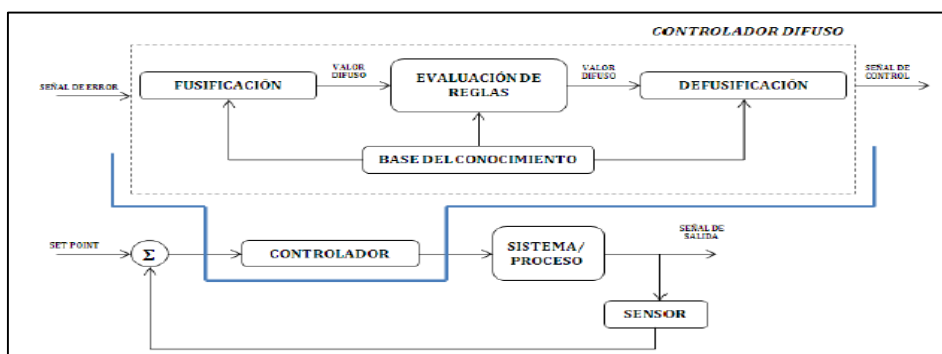


Figura 9. Relación de un controlador difuso con un lazo de control.

Fuente: Vinicio Dávila.

2.2.8.3. Controlador difuso

En un controlador difuso, intervienen las siguientes etapas: la base del conocimiento, la fusificación, una etapa de evaluación de reglas, y finalmente la defusificación (Hurtado, 2011). En la figura 10 se puede observar las diferentes etapas de un controlador difuso.

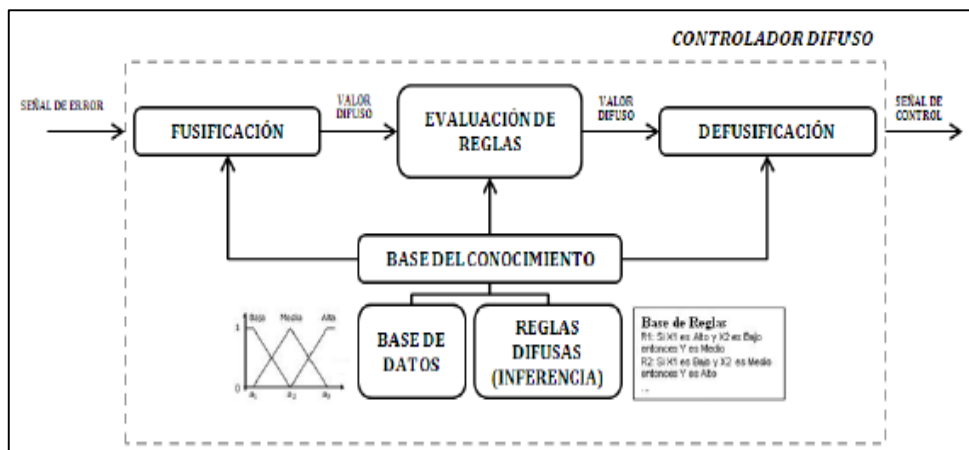


Figura 10. Controlador difuso.

Fuente: Vinicio Dávila.

2.2.8.4. Base del conocimiento

La base del conocimiento es fundamental para el correcto funcionamiento de un sistema difuso e interviene en todas las etapas para el diseño de un controlador difuso, se divide en dos partes: una base de datos donde se define los conjuntos difusos de entrada/salida, y una base de reglas difusas, donde se establecen reglas para evaluar los valores procedentes de los conjuntos difusos.

2.2.8.5. Base de datos

Está compuesto por los conjuntos difusos de entrada y salida, que van a intervenir en el sistema.

2.2.8.5.1. Conjuntos difusos

Se puede mencionar que los conjuntos difusos son una generalización de los conjuntos clásicos la teoría clásica solamente considera si un elemento pertenece o no a un conjunto; mientras que la teoría difusa añade el sentido de pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, representado por un valor entre 0 y 1, que viene dado por la función característica que define al conjunto difuso. La expresión $\mu_{\text{ALTO MEDIA}}(x)$ de la figura 11 presenta el grado de pertenencia de cualquier valor x , a un conjunto difuso A . Cada conjunto difuso debe estar asociado a una etiqueta lingüística, y para cada etiqueta lingüística como: baja, media, o alta; y al evaluar un valor x se obtiene el grado de pertenencia de este valor, a cada conjunto.

Los conjuntos difusos surgieron como una nueva forma de representar la imprecisión y la incertidumbre. Un conjunto difuso se define como una función de pertenencia que enlaza o empareja los elementos de un universo de discurso con elementos del intervalo $[0, 1]$. En la figura 11 se puede observar las funciones de pertenencia que componen a un conjunto difuso y las etiquetas lingüísticas de cada una de ellas (Castillo, 2008).

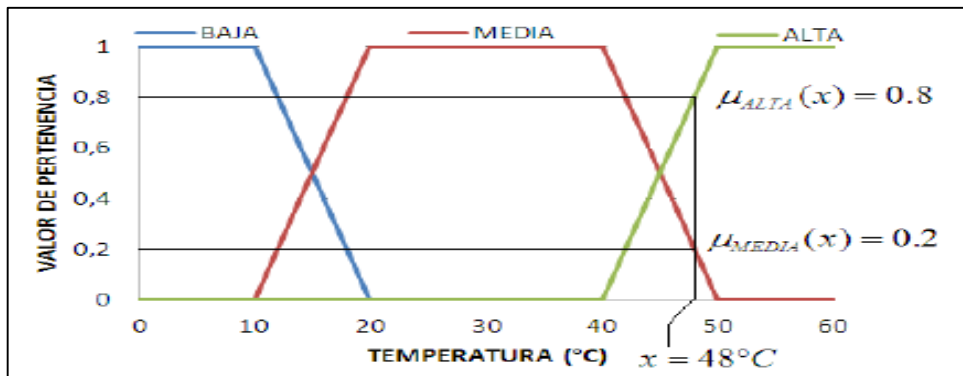


Figura 11. Funciones de pertenencia y etiquetas lingüísticas.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.8.5.1.1. Funciones características

La función característica o de pertenencia de un conjunto, indica el grado en que cada valor o elemento de un universo dado pertenece a ese conjunto, en caso de que el elemento sea difuso el grado de pertenencia será representado por un valor en el intervalo de 0 a 1. En el caso de diseño de controladores difusos, la función de pertenencia dependerá, exclusivamente de un experto o usuario, que conozca el universo en el que se vaya a trabajar y la aplicación que se desea construir (Castillo, 2008).

Las funciones de pertenencia más habituales son: Triangular, Trapezoidal y Gaussiana.

2.8.5.1.1.1. Función triangular

Definida mediante el límite inferior a , el superior b y el valor modal m , tal que $a < m < b$. la función no tiene porqué ser simétrica (Castillo, 2008).

En la figura 12 se puede observar la representación gráfica, las ecuaciones que definen a esta función de pertenencia son las siguientes:

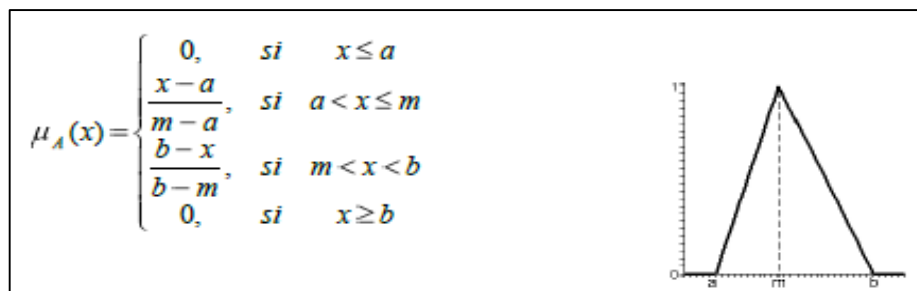


Figura 12. Función triangular.

Fuente: Castillo, 2008.

2.2.8.5.1.1.2. Función trapezoidal

Definida por sus límites inferior a, superior d, y los límites de soporte inferior b y superior c, tal que $a < b < c < d$. En este caso, si los valores b y c son iguales, se obtiene una función triangular (Castillo, 2008).

En la figura 13 se puede observar la representación gráfica de la función trapezoidal. Las ecuaciones que definen a esta función, son las siguientes:

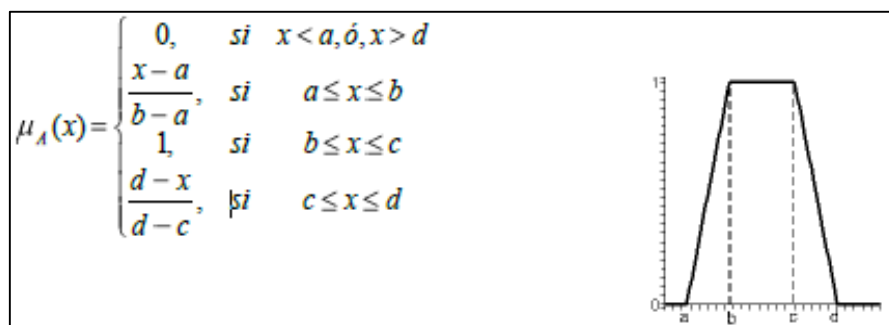


Figura 13. Función trapezoidal.

Fuente: Castillo, 2008.

2.2.8.5.1.1.3. Función gaussiana

Definida por su valor medio m y el parámetro $k > 0$. Esta función es la típica campana de Gauss y cuando mayor es el valor de k , más estrecha es dicha campana (Castillo, 2008).

En la figura 14 se puede observar la representación gráfica de la función, la ecuación que define a esta función característica es:

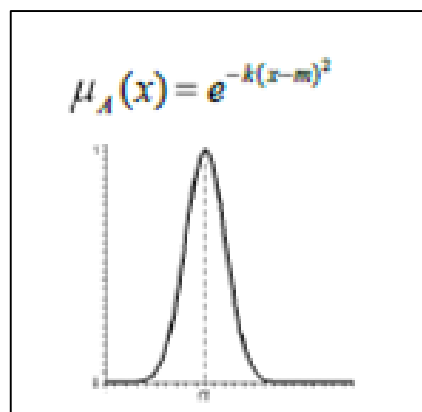


Figura 14. Función Gaussiana.

Fuente: Castillo, 2008.

2.2.8.5.1.2. Principales operaciones con conjuntos difusos

Se detallan los modelos matemáticos que definen las principales operaciones entre conjuntos difusos.

2.2.8.5.1.2.1. Intersección

La intersección en los conjuntos difusos viene definida por la siguiente ecuación:

$$\mu_{P \cap Q}(x) = \text{Min}(\mu_P(x), \mu_Q(x))$$

Dónde: (x) es el valor a analizar.

$\mu_{P \cap Q}(x)$ es la intersección entre dos conjuntos difusos P y Q.

$\mu_P(x)$ y $\mu_Q(x)$ representan el grado de pertenencia de x a cada conjunto difuso. Este grado puede tomar un valor entre 0 y 1.

Como se puede observar, la intersección se encuentra definida por el valor mínimo entre los grados de pertenencia de x a los conjuntos P y Q.

2.2.8.5.1.2.2. Unión

La unión en los conjuntos difusos viene definida por la siguiente ecuación:

$$\mu_{P \cup Q}(x) = \text{Max}(\mu_P(x), \mu_Q(x))$$

Dónde: (x) es el valor a analizar.

$\mu_{P \cup Q}(x)$ es la unión entre dos conjuntos difusos P y Q.

$\mu_P(x)$ y $\mu_Q(x)$ representan el grado de pertenencia de x a cada conjunto difuso. Este grado puede tomar un valor entre 0 y 1.

Como se puede observar en la ecuación, la intersección se encuentra definida por el valor máximo entre los grados de pertenencia de x a los conjuntos P y Q.

2.2.8.5.1.2.3. Complemento

El complemento en los conjuntos difuso viene definido por la siguiente ecuación:

$$\mu_{P^c}(x) = 1 - \mu_P(x)$$

Dónde: (x) es el valor a analizar.

$\mu_{P^c}(x)$ es el complemento del conjunto difuso P.

$\mu_P(x)$ representan el grado de pertenencia de x a P, valor entre 0 y 1.

Como en la teoría de conjuntos clásicos, el complemento es el valor resultante entre 1 y el grado de pertenencia de x al conjunto P.

2.2.8.5.1.3. Bases de reglas difusas

Las reglas difusas emulan el sentido común humano para la toma de decisiones en un determinado proceso, estas reglas deber ser formuladas por un diseñador después de analizar el comportamiento del sistema. Existen dos métodos para implementar reglas difusas: Mamdani y Sugeno (Gómez, 2008).

2.2.8.5.1.3.1. Método Mamdani

Para formar las reglas difusas, por medio del método de Mamdani, se procede a crear una matriz conocida como F.A.M. (Fuzzy Associative Memory) sistemas de memoria asociativa difusa. En el caso de que el sistema, tenga dos entradas, en el eje X se coloca la entrada 1, y en Y la entrada 2, las dos seguidas de las etiquetas lingüísticas de los respectivos conjuntos difusos que contiene, y en cada una de sus coordenadas, después de ser analizadas se establece la salida más pertinente para el sistema, es decir que todas las posibles combinaciones de las variables de entrada, están asociadas a una salida.

Una vez completa la matriz de reglas, ésta debe ser trasladada a la forma de reglas tipo si/entonces, para esto se puede utilizar las reglas de programación IF/THEN para formular las expresiones condicionales que abarca la lógica difusa. Que serían representadas de la siguiente forma:

- SI <proposición difusa A> y <proposición difusa B> ENTONCES <resultado difuso>. Donde SI <proposición difusa A> y <proposición difusa B> es conocida como antecedente y el <resultado difuso> como el consecuente o conclusión. En la figura 15 se puede observar una regla Mamdani trasladada al tipo IF/THEN.

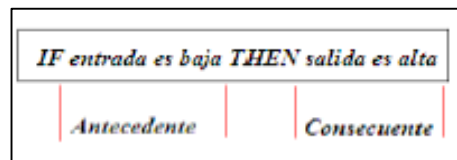


Figura 15. Regla tipo Mamdani.

Fuente: Castillo, 2008.

2.2.8.5.1.3.2. Método Sugeno

La diferencia de un sistema Sugeno radica en que el consecuente de las reglas obtenidas ya no es una etiqueta lingüística, sino una función de la entrada. En este tipo de sistemas, los valores que se obtienen en los consecuentes, por medio de las reglas en un momento determinado, son valores numéricos, por los que ya no necesitan de la etapa de defusificación, su estructura se puede observar en la Figura 16.

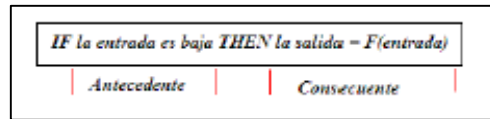


Figura 16. Regla tipo Sugeno.

Fuente: Castillo, 2008.

2.2.8.6. Proceso de fusificación

Es la primera de las etapas que interviene en un controlador difuso. Es un proceso mediante el cual se convierte una señal de entrada normal no difusa, en valores que representan el grado de membrecía o pertenencia a cada conjunto difuso definido, en la base del conocimiento (Gómez, 2008).

El bloque difusor recibe las múltiples entradas concretas que llegan al sistema de lógica difusa, y produce un conjunto difuso con cada una de ellas (ver figura 17).

Cada conjunto difuso producido por este bloque está definido sobre el universo de discurso de la variable lingüística respectiva, está centrado en el valor concreto de entrada, y tiene una función de pertenencia cuya forma puede ser distinta para cada variable de entrada.

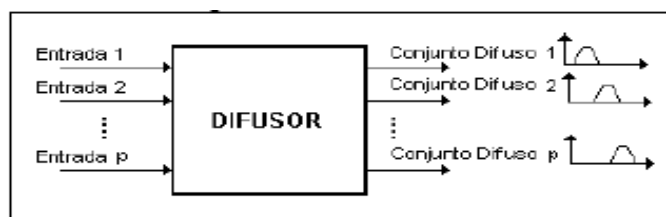


Figura 17. Difusor.

Fuente: Gómez, 2008.

2.2.8.7. Evaluación de reglas difusas

Los datos resultantes de la fusificación ingresan a esta etapa, y son evaluados en todas las reglas difusas, propuestas anteriormente en la base de reglas. Dependiendo de las reglas que se activen, se genera un polinomio de salida, que continua siendo un valor difuso (Gómez, 2008).

2.2.8.8. Motor de inferencia

El motor de inferencia recibe los conjuntos difusos producidos por el difusor y los aplica a cada una de las reglas de la base de reglas, para producir conjuntos difusos (un conjunto difuso por cada variable de salida en cada una de las reglas) definidas sobre los universos de discurso de las variables lingüísticas de salida (ver figura 18).

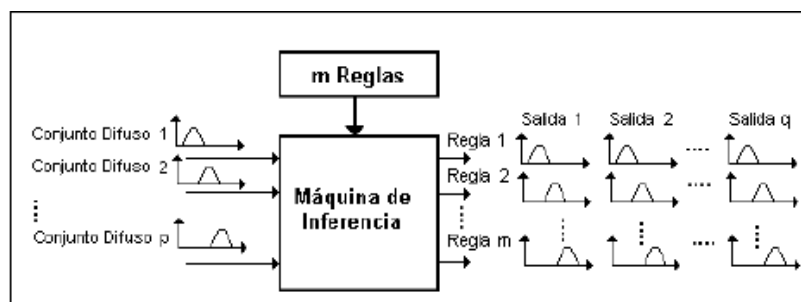


Figura 18. Máquina de inferencia.

Fuente: Gómez, 2008.

2.2.8.9. Proceso de defusificación

El último de los pasos es la defusificación, este proceso tiene como objetivo, convertir los valores resultantes, de la evaluación de las reglas

difusas, nuevamente en un valor real no difuso. El valor obtenido es utilizado para generar o tomar acciones de control que el sistema lo requiera. Existen varios métodos que permiten obtener un valor real a partir de un conjunto difuso, el más utilizado en aplicaciones de lógica difusa es el centro de área conocido también como centroide (Gómez, 2008).

El bloque congresor recibe los conjuntos difusos generados por el motor de inferencia, y produce valores concretos correspondientes a cada una de las variables de salida del sistema de lógica difusa (ver figura 19).

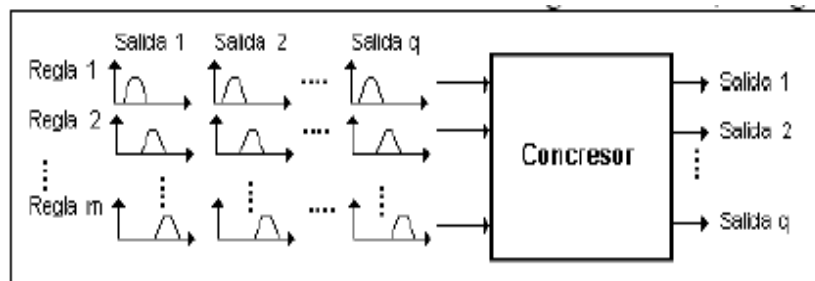


Figura 19. Congresor.

Fuente: Gómez, 2008.

2.2.8.9.1. Método centroide

El centroide, es uno de los métodos más utilizados en las aplicaciones basadas en lógica difusa, como principal ventaja está que proporciona, como salida, una única solución; sin embargo los cálculos para obtener esta solución presentan una dificultad matemática elevada. La salida presentada por el sistema, es el centro de gravedad de la función

característica del polinomio de salida, se calcula por medio de la siguiente

fórmula:
$$z^* = \frac{\int U(z)zdz}{\int Uc(z)dz}$$

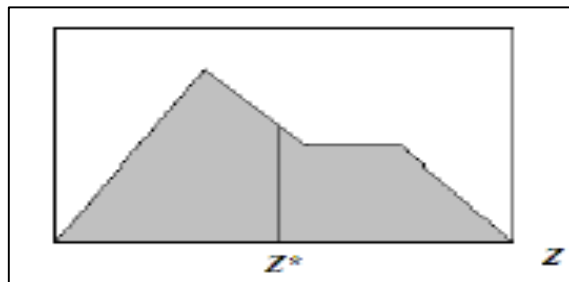


Figura 20. Representación del centroide.

Fuente: Gómez, 2008.

2.2.8.10. Entrenamiento de sistemas de lógica difusa

El diseño de un sistema de lógica difusa plantea como mínimo la selección de los siguientes parámetros:

- Números de variables concretas de entrada y de salida.
- Estructura de las variables lingüísticas asociadas a cada variable Concreta de entrada y de salida.
- Definición de los conjuntos difusos asociados a cada valor lingüístico de cada variable lingüística.
- Definición del tipo de difusor empleado para cada variable de entrada.
- Definición del número de reglas presentes en la base de reglas.
- Valores lingüísticos de cada una de las variables del antecedente y del consecuente para cada regla.

- Tipo de relación de implicación, operador, T-norma de composición a utilizar en el motor de inferencia.
- Tipo de congresor empleado para cada variable de salida.
- Tipo de unión o intersección a utilizar en el congresor.

De lo anterior se desprende que la tarea para el diseñador de un sistema de lógica difusa puede ser compleja debido a que debe seleccionar varios parámetros, cada uno de los cuales ofrece varias opciones. El objetivo de los algoritmos de entrenamiento es el de facilitar el diseño de un sistema de lógica difusa, del cual se conoce al menos parte del comportamiento que de él se espera obtener.

2.2.8.11. El controlador lógico fuzzy (CLF)

Según los enfoques tradicionales, el diseño de un controlador se basa en un análisis cabal del proceso y una vez que se posee un modelo cuantitativo de éste, todas las decisiones se calculan usando algoritmos estrictamente numéricos. Es evidente que solo a procesos “dóciles” al análisis cuantitativo les son aplicables técnicas de control de naturaleza numérica. Por otro lado existe un número considerable de procesos dóciles de controlar automáticamente en virtud de la complejidad de su “modelamiento” preciso y sin embargo, “operadores humanos” muestran buenos resultados en su control.

Esto, unido a la lógica difusa y a la disponibilidad de potentes medios de cómputo, estimuló la investigación acerca de las estrategias de control de estos operadores, expresadas por medio de “reglas heurísticas” para convertirse en estrategias de control automático. En general, los controladores difusos son sistemas expertos que emplean el conocimiento como fundamento, expresado en términos de reglas difusas y de un proceso de inferencia para resolver un problema de control dado.

Los controladores difusos a diferencia de los controladores clásicos, son capaces de utilizar el conocimiento obtenido de operadores humanos. Mientras este conocimiento es complicado de expresar en términos precisos, una descripción lingüística imprecisa de la forma en que se realiza el control puede ser articulada por el operador con relativa facilidad. Esta descripción lingüística consiste de un conjunto de reglas que hace uso de proposiciones difusas.

2.2.8.11.1. Arquitectura de un controlador lógico fuzzy

Los CLF tienen la misma función que los controladores convencionales Proporcional-Integral-Derivativos (PID). Los PID manejan una superficie de control compleja, leyendo información de sensores, ejecutando un “modelo matemático” y haciendo cambios en los dispositivos actuadores. Los CLF, sin embargo, manejan una superficie de control compleja a través de un “modelo heurístico” más que matemático. Adicionalmente, un sistema

Fuzzy es capaz de aproximar, con algún grado de precisión, cualquier función continua lineal o no lineal. Un controlador fuzzy es un modelo de un sistema fuzzy. Emplea conjuntos fuzzy para representar las propiedades semánticas de cada variable de estado y de acción, y procesa estas entradas y salidas usando un conjunto de reglas de producción tipo “si - entonces” (if - then) que asocian un valor de entrada, a través de una colección de conjuntos fuzzy, hacia una nueva representación de salida.

Una arquitectura básica de un típico CLF (ver figura 21). El proceso comienza con una señal eléctrica, la señal es convertida a una representación significativa y entonces es “fuzzificada”, esto es, los valores son convertidos a sus representaciones fuzzy para cada variable de salida.

La “defuzzificación” por medio del centroide es usada, en la mayoría de los casos para obtener el “valor esperado”, de cada una de las variables de salida las cuales se ajustan al estado del sistema físico (proceso). El nuevo estado del sistema es capturado por los sensores y el proceso comienza una vez más.

La defuzzificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. Es sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de la inferencia difusa, que es el centro de gravedad de tal conjunto difuso.

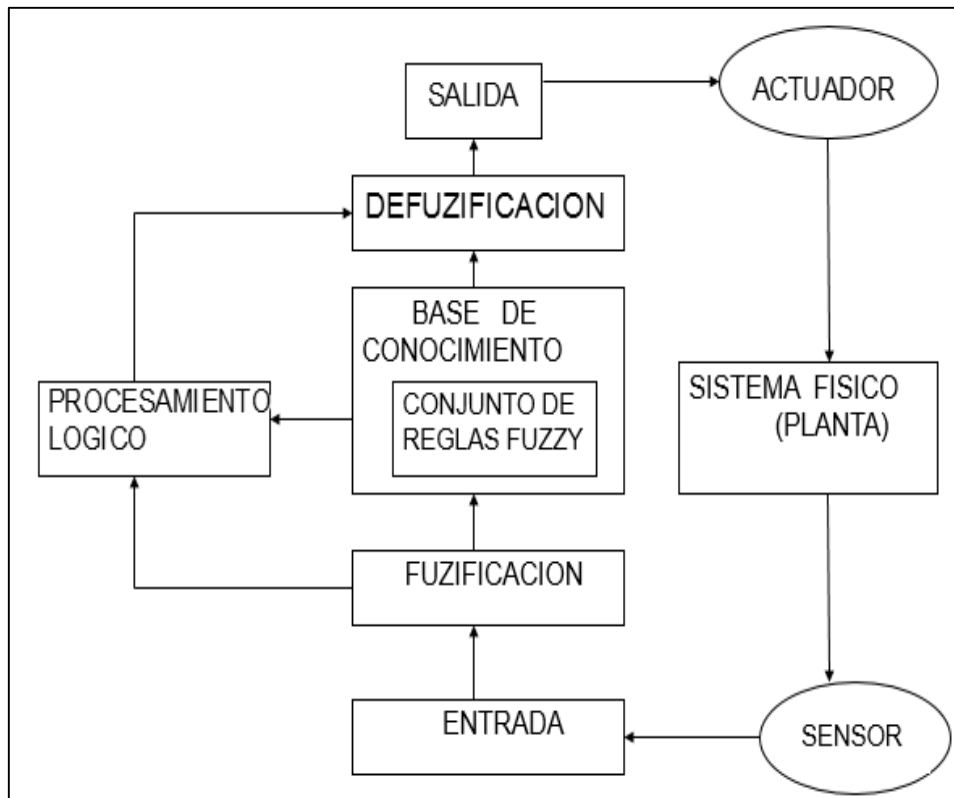


Figura 21. Arquitectura de un CLF.

Fuente: Alberto Pacheco P. Tesis de maestría: Inteligencia Artificial en el Control de Molienda de Minerales – UNJBG - 2001.

2.2.8.12. Microcontroladores

Los microcontroladores son computadoras digitales integradas en un chip que cuentan con un microprocesador o unidad de procesamiento central (CPU), una memoria para almacenar el programa, una memoria para almacenar datos y puertos de entrada salida.

A diferencia de los microprocesadores de propósito general, como los que se usan en los computadores PC, los microcontroladores son unidades autosuficientes y más económicas.

El funcionamiento de los microcontroladores está determinado por el programa almacenado en su memoria. Este puede escribirse en distintos lenguajes de programación. Además, la mayoría de los microcontroladores actuales pueden reprogramarse repetidas veces.

Por las características mencionadas y su alta flexibilidad, los microcontroladores son ampliamente utilizados como el cerebro de una gran variedad de sistemas embebidos que controlan máquinas, componentes de sistemas complejos, como aplicaciones industriales de automatización y robótica.

Características de los Microcontroladores

Las principales características son:

- Unidad de Procesamiento central (CPU): típicamente de 8 bits, pero también los hay de 4, 32 y hasta 64 bits con arquitectura *Harvard*, con memoria/bus de datos separada de la memoria/bus de instrucciones de programa, o arquitectura *von Neumann*, también llamada arquitectura *Princeton*, con memoria/bus de datos y memoria/bus de programa compartidas.
- Memoria de Programa: es una memoria ROM (*Read-Only Memory*), EPROM (Electrically Programmable ROM), flash que almacena el código del programa que puede ser de 1 kilobyte o varios megabytes.

- Memoria de Datos: es una memoria RAM (Random Access Memory) que típicamente puede ser de 1; 2; 4; 8; 16; 32 kilobytes.
- Generador de Reloj: Usualmente un cristal de cuarzo de frecuencias que genera una señal oscilatoria de entre 1 a 40 Mhz, o también resonadores o circuitos RC.
- Interfaz de Entrada/Salida: Puertos paralelos, seriales (UARTs, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), Interfaces de Periféricos Seriales (SPIs, Serial Peripheral Interfaces), Red de Área de Controladores (CAN, Controller Área Network), USB (Universal Serial Bus).
- Otras opciones: Conversores Análogo-Digitales (A/D, analog-to-digital) para convertir un nivel de voltaje en un cierto pin a un valor digital manipulable por el programa del microcontrolador.
Moduladores de Ancho de Pulso (PWM, Pulse-Width Modulation) para general ondas cuadradas de frecuencia fija pero con un ancho de pulso modificable.

La alta integración de subsistemas que componen un microcontrolador reduce el número de chips, la cantidad de pistas y espacio que se requeriría en un circuito impreso si se implementase un sistema equivalente usando chips separados.

Un aspecto de especial interés para el desarrollador de circuitos basados en microcontroladores son las interfaces de entrada/salida. A través de los pines del chip asociados a las interfaces de entrada/salida el microcontrolador puede interactuar con otros circuitos externos enviándoles señales de comando o recibiendo estímulos correspondientes a variables externas. Por lo general varios pines de datos son bidireccionales, es decir pueden configurarse como entradas o salidas.

Cuando son entradas, pueden adquirir datos interpretando el valor de voltaje como un valor lógico 0 o 1, mientras que cuando son salidas pueden entregar una señal binaria de voltaje cuya magnitud dependerá del valor lógico 0 o 1. Monitoreando el valor de las entradas, el microcontrolador puede responder a eventos externos y realizar una cierta acción, como variar las señales de salida de acuerdo al valor en las entradas. Para responder a eventos externos, los microcontroladores cuentan con un recurso conocido como *interrupciones*.

Las interrupciones son señales que se generan internamente en el microcontrolador que detienen la ejecución normal del programa para ejecutar alguna subrutina de respuesta al evento. Una vez ejecutada la subrutina de interrupción la ejecución del programa continúa en el punto en que se encontraba antes de generarse la interrupción.

Un ejemplo típico es el de un botón pulsador conectado a un pin de entrada. Una vez pulsado, se genera una señal de interrupción que iniciará la ejecución de la subrutina de interrupción, que por ejemplo podría activar un pin de salida para encender un led.

No todas las interrupciones necesariamente están asociadas al cambio del estado de los pines de entrada. También hay interrupciones que pueden estar asociadas al valor de una entrada AD, o al cumplimiento de un periodo de tiempo fijado por un *timer* o temporizador. Estas características dependerán del modelo de microcontrolador empleado.

2.2.8.12.1. Microcontrolador PIC18F4550

Por familiaridad y conocimiento en cuanto a los microcontroladores de Microchip, se escogió el PIC18F4550 para realizar el módulo de control difuso de temperatura. Las siglas PIC significan control de interfaz periférico, en la Figura 22 se puede observar la distribución de los pines de un microcontrolador PIC 18F4550.

Entre las principales características de este microcontrolador se puede mencionar:

- Voltaje de operación de 4,2 V a 5,5 V.
- Memoria Flash de 32 Kbytes.
- Memoria RAM de 1 536 bytes.

- Memoria EEPROM de 256 bytes.
- Posee 5 puertos para lectura y escritura de datos (Entradas y salidas), entre los cuales se puede configurar 35 pines de entrada o salida digital, 10 entradas conversoras análogas a digital con una resolución de 10 bits.
- Dos pines programables para obtener una salida por ancho de pulso (PWM).
- Permite implementar interrupciones extremas por medio de 3 pines.
- Velocidad 48 Mhz.
- 13 canales de ADC de 10 bits, 4 Timers.

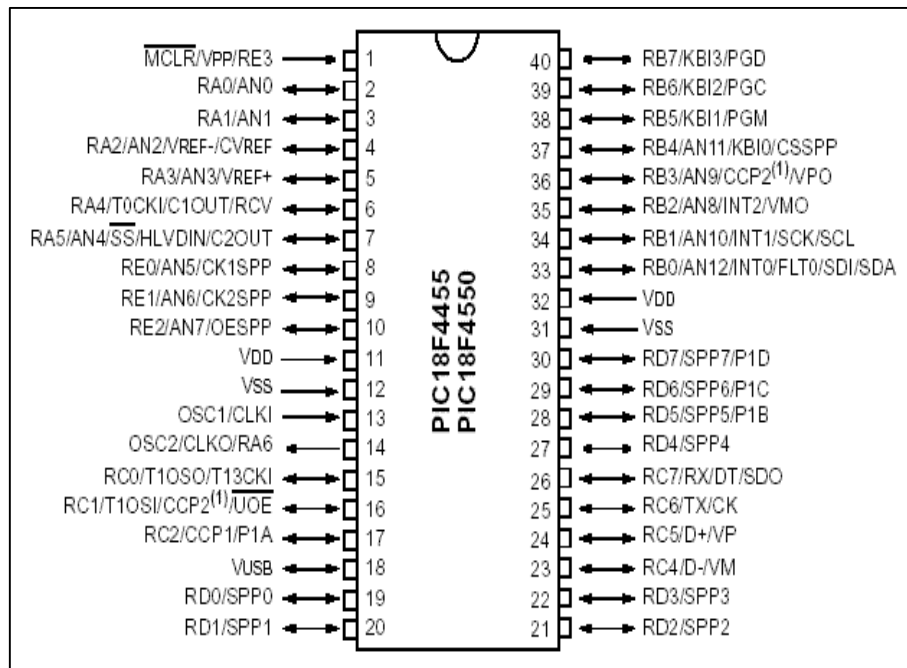


Figura 22. Distribución PIC 18F4550.

Fuente: extraída del datasheet PIC18F4550.

En el anexo 2 de la tesis, se encuentra la hoja de datos técnica del PIC 18F4550, en el cual se puede observar las características técnicas mostradas anteriormente y la configuración del microcontrolador.

2.2.8.13. Generación automática de Sistemas Lógicos Difusos tipo Mamdani sobre microcontrolador de 8 bits

En los últimos años, en diferentes sectores como el científico e industrial, ha aumentado considerablemente el uso de los Sistemas Lógicos Difusos (SLD), obteniéndose un considerable número de aplicaciones. Existen varias herramientas que permiten el desarrollo de estos sistemas que en su mayoría son paquetes de software costosos para PC o hardware costoso difícil de obtener. En este documento se presenta el desarrollo y resultados de la herramienta creada, la cual brinda la posibilidad de interactuar con los sistemas lógicos difusos tipo Mamdani permitiendo su implementación como sistema embebido y con características limitadas sobre un microcontrolador PIC (Peripheral Interface Controller o Controlador de Interfaz Periférico) de 8 bits de Microchip Inc. El objetivo principal es la generación automática del código en lenguaje C para el SLD deseado por el usuario, el cual será establecido a través de la herramienta desarrollada en Matlab integrando las diferentes funciones que ofrece el *Fuzzy Logic Toolbox*.

2.2.8.13.1. Implementación de sistemas lógicos difuso con sistemas embebidos

La implementación dentro de sistemas embebidos resulta ser una de las opciones más apropiadas para muchas aplicaciones de la lógica difusa como el control difuso. En la literatura se encuentra un gran número de implementaciones hardware cuya ventaja principal es la alta velocidad de procesamiento y el uso del paralelismo (Zavala, 2012). Como desventajas de las implementaciones hardware de SLD encontramos el alto costo de la tecnología utilizada (Very Large Scale Integration [VLSI], Application Specific Integrated Circuit [ASIC], y Field Programmable Gate Arrays [FPGA]), mayor consumo de potencia y poca flexibilidad. Por otra parte, periféricos externos como una memoria y hardware extra para el acondicionamiento de la entrada y la salida del SLD son requeridos, añadiendo costo, espacio y complejidad al sistema global. Las implementaciones hardware son la opción a elegir cuando de acuerdo a la aplicación se requiera una alta velocidad de respuesta del SLD.

Por lo general, los sistemas embebidos como un MCU pueden ser programados directamente en lenguaje ensamblador, o por medio de un lenguaje de programación de alto nivel como el lenguaje C utilizando el compilador específico. La desventaja de este tipo de implementaciones es la ejecución de un código secuencial.

2.2.8.13.2. Desarrollo del software de la herramienta de Matlab

El objetivo principal es la generación automática del código en lenguaje C para el SLD deseado por el usuario, el cual será establecido a través de la herramienta desarrollada en Matlab integrando las diferentes funciones que ofrece el *fuzzy logic toolbox*. El código se realizó en lenguaje C para ser implementado en el PIC18F4550. Se eligió la programación en lenguaje C por su facilidad en el manejo de las funciones y módulos del PIC.

El software de la herramienta es el encargado de recibir todas las características específicas: definición de las variables de entrada y las variables de salida, definición de los conjuntos difusos que conforman cada variable, reglas difusas o base del conocimiento, tipos de conjuntos difusos a usar, entre otras, requeridas por el usuario para el diseño del SLD deseado.

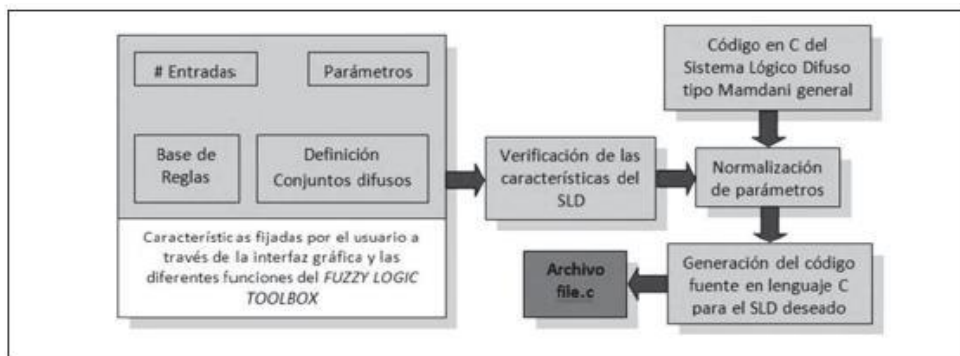


Figura 23. Diagrama en bloques para el software de la herramienta.

Fuente: Gómez, 2008.

La herramienta abordada facilita la implementación de SLD tipo Mamdani de una manera sencilla usando para ello recursos hardware económico, haciendo así más accesible el manejo de este tipo de sistemas. La utilización del PIC 18F4550 ofrece grandes ventajas, ya que tiene una memoria de programa y de datos superiores a los PIC clásicos, trabaja hasta 40 MHz y es eficaz para la programación en C, facilitando considerablemente el desarrollo del SLD tipo Mamdani general, ya que permite hacer más manejable la programación, el manejo de números en coma flotante, el uso de librerías matemáticas y de datos.

2.2.9. Diseño e implementación del sistema de control

Después de realizar el estudio de sedimentación de la mezcla que se va a tener en el biodigestor y con base al sistema mecánico diseñado, se procedió a diseñar e implementar el sistema eléctrico y de control que permita cumplir los requerimientos técnicos de la planta de biogás y con bajos costos de inversión.

Consideraciones generales para el diseño:

Para el diseño del sistema de control de un prototipo de una planta de biogás se han considerado cuatros aspectos importantes y que son:

1. El trabajo continuo de la planta, mediante la utilización de elementos robustos y confiables.

2. Garantizar y mantener las condiciones más favorables para dicho proceso, lo que prácticamente depende de una variable fundamental que es la temperatura al interior del biodigestor (Mandal, 1999).
3. La seguridad, tanto para las personas como para los equipos.
4. Que el sistema sea simple en su operación.

Con esas consideraciones, el sistema de control se encargará de:

1. Mantener la temperatura al interior del biodigestor según el *set point* previamente fijado, activando el control difuso mediante la operación de los elementos que influyen en la regulación de dicha variable.
2. Mantener la mezcla homogénea dentro de biodigestor para mejorar las condiciones de generación de biogás.
3. Controlar la presión en la línea del biogás para evitar sobrepresión y posibles roturas de las juntas del tanque.
4. Proporcionar al operador información visual de las variables del proceso y facilitar el control de la planta.

Por otro lado, todos los dispositivos de maniobra y protección del sistema eléctrico electrónico, serán dimensionados considerando, características y valores nominales de cada componente de carga y acorde a la normativa existente sobre instalaciones eléctricas. Ya que el control difuso de la temperatura en el biodigestor es de 30 días sin interrupciones.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Actuadores: Es un dispositivo diseñado para transformar energía eléctrica, neumática o hidráulica para realizar la actividad de un proceso, con la finalidad de producir un efecto en un proceso automatizado (Palacios, & López, 2004).

Biodigestor: Son recipientes o tanques cerrados herméticamente. Estos permiten la carga de sustratos de biomasa denominados afluente y la descarga de bioabono o biol denominado efluente y posee un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético (Martí, 2008).

Biogás: El biogás se produce a través de la degradación anaeróbica de la biomasa. La digestión anaeróbica es un proceso natural microbiano que ocurre en forma espontánea en la biomasa en ausencia de oxígeno y se genera una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono conocida como biogás y una suspensión acuosa o biol que contiene componentes no degradados o parcialmente degradados pero estabilizados y restos inorgánicos inicialmente presentes en la biomasa (Moncayo, 2008).

Biomasa: O sustrato se refiere a toda la materia orgánica que proviene de desechos de animales (estiércol), arboles, plantas, todos los desechos orgánicos que puede ser convertidos en energía; o los provenientes de la

agricultura como los residuos de maíz, café, arroz, papas, banano; de aserraderos como ramas, aserrín, cortezas; y de los residuos urbanos como aguas residuales, basura orgánica y otros (Moncayo, 2008).

Lógica difusa: Es una rama de la inteligencia artificial, en la cual las proposiciones pueden ser representadas con diferentes grados entre lo verdadero y falso (Castillo, 2008).

Microcontroladores: Son circuitos integrados programables que contienen todos los elementos necesarios para desarrollar y controlar una tarea determinada. La cantidad de componentes que se integran a los microcontroladores depende del diseño de los fabricantes, sin embargo, los elementos básicos suelen ser: microprocesador, memoria RAM, memoria de programa, convertidor A/D, oscilador, puerto de comunicación, etc. (Palacios & López, 2004).

Porcentaje de sólidos: Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre 7 y 9 % de sólidos totales es óptima para la digestión. Para calcular el volumen de agua que debe ser mezclado con la materia prima es indispensable conocer su humedad (Carrillo, 2003).

Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó (Jiménez, 2002).

Requerimientos energéticos: Los requerimientos energéticos varían entre una planta a pequeña y una gran escala; la pequeña necesita más energía eléctrica por tonelada de materia ya que tiene pocas posibilidades de utilizar el calor generado durante la fermentación (Carrillo, 2003).

Sensores: Es un dispositivo diseñado para captar magnitudes físicas o químicas, las cuales son transformadas en variables eléctricas. Algunas cantidades físicas que se pueden medir con los sensores son: temperatura, intensidad luminosa, inclinación, presión, fuerza, torsión, etc. Algunos sensores pueden trabajar en forma analógica y otros en forma digital (Palacios & López, 2004).

Valorización Energética: Cualquier operación que permita el aprovechamiento de todos los recursos en los residuos, ya sea de forma material o energética. El resultado principal de la valorización es que el residuo sirva a una finalidad útil (Hidalgo, 2012). La materia prima a introducir en el proceso está constituida por subproductos agrícolas, alimentarios o de cualquier tipo que contenga humedad y sean fácilmente putrescibles; dependiendo del tipo de materia prima, esto ocurre más rápido o lento. Hay un número de bacterias que están implicadas en la digestión anaeróbica incluyendo bacterias generadoras de ácido acético y metano. Estas bacterias se alimentan de la materia prima y la hacen experimentar diversos procesos que lo convierten en biogás (Carrillo 2003)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Investigación experimental, diseño experimental.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. OBJETIVO 1: Aplicar un controlador difuso, con los rangos fijados de temperatura, en el invernadero, que garanticen un mejor proceso de digestión anaerobia de los residuos orgánicos en un biodigestor para la generación de biogás.

Para cumplir con este objetivo, se detalla el procedimiento a seguir para el diseño y la construcción de un control difuso de lazo cerrado de temperatura. Se analiza el algoritmo que representa al control difuso, los elementos de hardware que conforman el módulo de control, el software implementado en el *toolbox fuzzy logic* de Matlab.

Los criterios de selección para optar por el diseño de un controlador difuso para la regulación de la temperatura en el digestor anaeróbico fueron básicamente la relación no lineal de la Temperatura con la actividad microbiana durante el proceso de digestión anaeróbica (Van Lier, 1995). Según N. Kanagaraj (2006), en el desarrollo de sistemas de aplicación en

tiempo real existen algunas restricciones como la capacidad de memoria para el código fuente de la aplicación, el consumo de energía del módulo, la velocidad de procesamiento, la complejidad del algoritmo, el costo de hardware y software, etc., Un software eficiente y el diseño de hardware para un sistema embebido basado en procesador se traduce en reducción de costos, un aspecto importante que se desea a la par con el objetivo principal del proyecto de investigación abordado.

La lógica difusa es más eficaz en sistemas de control en lazo cerrado y quizás más fácil de implementar en sistemas que van desde un microcontrolador embebido hasta una amplia red de computadoras.

3.2.1.1. Esquema general del módulo de control

El control difuso de temperatura diseñado, está compuesto por varias etapas, entre las cuales se encuentran las entradas, el controlador difuso, la planta o sistema a controlar, y la realimentación para la cual se utiliza un sensor de temperatura.

El controlador representa la parte principal del módulo, a este se dirigen las entradas del sistema, a las que se aplica el algoritmo difuso con el fin de obtener una señal de control que garantice la corrección del sistema en caso de que el resultado obtenido sea erróneo. Como se puede observar en la Figura 24, el control difuso diseñado presenta un lazo de control

convencional, el algoritmo difuso en sí, está implementado en el controlador del sistema.

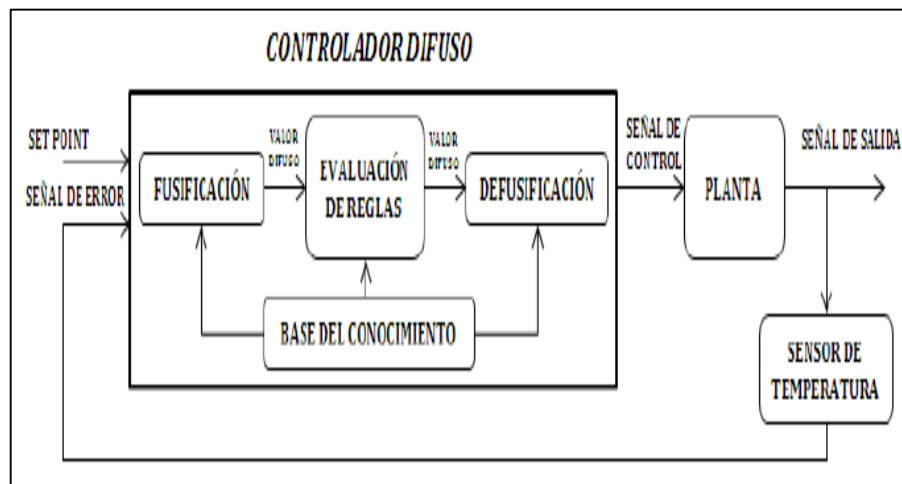


Figura 24. Esquema general módulo de control.

Fuente: Vinicio Dávila.

3.2.1.2. Descripción del sistema

El módulo de control diseñado, tiene como finalidad controlar la temperatura de un elemento resistivo como niquelinas o resistencias eléctricas, las cuales pueden intervenir directamente en un recipiente.

El operador puede elegir la temperatura deseada, la cual debe estar en el rango de 25 °C a 50 °C, este dato es ingresado por un teclado, al aceptar este valor, se procede a medir la temperatura real que proporciona el sistema mediante un sensor de temperatura LM335, si la temperatura deseada es diferente de la medida, el sistema procede a tomar acciones de control basadas en lógica difusa para corregir el error.

Se eligió el sensor LM335 pues viene calibrado de fábrica, por lo que no necesita ningún circuito externo para hacerlo funcionar. Esto unido a su simpleza hace que sea extremadamente sencillo añadirlo en cualquier montaje. La baja impedancia de salida, su salida lineal y su precisa calibración hace posible que este integrado sea instalado fácilmente en un circuito de control. Debido a su baja corriente de alimentación se produce un efecto de auto calentamiento muy reducido.

Como universo del sistema se establece el rango de temperatura a controlar, en base a la respuesta de los elementos finales de control y al rango de operación del sensor este valor puede variar entre 25 °C y 50 °C.

3.2.1.3. Diseño del controlador difuso de temperatura

El controlador difuso para el módulo diseñado es el núcleo de nuestro sistema; este se encuentra compuesto por entradas, y el bloque difuso compuesto por la fusificación, evaluación de reglas y defusificación. En este apartado se definirán los conjuntos difusos de entrada, de salida, y las reglas difusas que definirán el comportamiento del sistema.

Los controladores en un sistema de control en lazo cerrado, son aquellos en que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control). Cuando opera en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de

un sistema y alguna entrada de referencia. Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema (Ponce, 2010).

3.2.1.3.1. Entradas del controlador

Las entradas hacia el controlador difuso son:

- La temperatura deseada (*set point*), y ;
- La temperatura real.

El valor de la temperatura deseada, va a ser ingresado de forma manual por un operador, mediante un teclado, y el de temperatura real será medido por el sensor de temperatura LM35 (estas entradas no son difusas). A pesar de que estas entradas ingresan al controlador, la temperatura real no actúa directamente sobre el algoritmo difuso; es la señal de temperatura deseada *set point* y una señal de error, las que permiten tomar acciones de control en el sistema.

Es decir las entradas que intervienen en el algoritmo interno del controlador, son:

- *Set point*: La temperatura deseada, y ;
- Error: Error del sistema.

La señal de entrada al controlador difuso es la señal de error, correspondiente a la diferencia aritmética entre la temperatura deseada y la temperatura real, medida por medio del sensor LM335.

El error es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Error} = T(^{\circ}\text{C}) \text{ deseada} - T(^{\circ}\text{C}) \text{ real}$$

En base a estas entradas definidas se diseñan los conjuntos difuso.

3.2.1.3.2. Definición de conjuntos difusos

Los conjuntos difusos de entrada diseñados representan un arreglo de posibles estados que puede tomar un valor de entrada, e indicar el grado de pertenencia del valor de entrada hacia cada estado.

3.2.1.3.2.1. Conjunto difuso error

El conjunto difuso error se encuentra definido por cinco variables lingüísticas, representan el grado de pertenencia, de la señal de error, a cada estado que compone el conjunto. Estas variables son:

- NegGran: Negativo Grande [-5; -1,5].
- NegPeq: Negativo Pequeño [-3; 0].
- Cero: Cero [-0,5; 1,5].
- PosPeq: Positivo Pequeño [0; 3].
- PosGran: Positivo Grande [1,5; 5].

Asimismo, por facilidad de cálculos, las variables lingüísticas están representadas por funciones de pertenencia triangulares, y trapezoidales.

3.2.1.3.2.2. Conjunto difuso salida

Se cuenta con un calentador eléctrico manipulado mediante modulación de ancho de pulso PWM, el cual es controlado por la señal de control $u(t)$ conformado por un dato digital de 8 bits suministrado por el bloque de control difuso basado en microcontrolador, y donde el dato digital d'0' corresponde a un suministro mínimo de voltaje RMS al elemento calefactor y el dato d'255' corresponde a un suministro máximo de voltaje RMS al elemento calefactor. Por tanto, el Universo de discurso para la variable **CONTROL** queda definida entre [0, 255], dado que la resolución obtenida con un dato digital a 8 bits es de:

$$\text{Resolución} = 2^n - 1 = 2^8 - 1 = 255$$

Donde n es el número de bits de la palabra control.

Las variables lingüísticas definidas para la señal de salida CONTROL:

- Volnulo: VOLTAJE NULO [0].
- Volbaj: VOLTAJE BAJO [0; 35].
- Volmed: VOLTAJE MEDIO [20; 180].
- Volalto: VOLTAJE ALTO [150; 255].

3.2.1.3.3. Definición de reglas difusas del sistema

A continuación se encuentran definidas las reglas que van a gobernar el comportamiento del control difuso, mediante una matriz de memoria asociativa FAM, la cual muestra las posibles combinaciones entre las entradas, y la salida propuesta para cada caso. En la tabla 10 se puede observar las reglas de diseño para el módulo de control difuso, presentadas en una matriz de datos.

Tabla 10.

Reglas de control difuso.

ERROR	NG	NP	CERO	PP	PG
CONTROL	Voltaje nulo	Voltaje nulo	Voltaje bajo	Voltaje medio	Voltaje alto

Fuente: Elaboración propia.

Este arreglo entre las variables de control se puede representar como reglas de tipo sí/entonces, las cuales servirán para crear el método de evaluación de reglas difusas en el microcontrolador; en la tabla 11, se puede observar las reglas de diseño para el módulo de control difuso, presentadas en la forma si/entonces.

Tabla 11.

Reglas controlador difuso tipo sí/entonces.

Si error es positivo pequeño entonces voltaje medio

Fuente: Elaboración propia.

La base de reglas para el sistema de lógica difusa se definió considerando que el sistema de calefacción a través del sistema de recirculación constante hacia la chaqueta de agua que rodea el digestor, suministre la temperatura adecuada para mantener el error en estado estacionario igual a cero; es decir, que la temperatura dentro del reactor sea igual al valor establecido por el valor de referencia, el cual es establecido inicialmente en 35 °C.

Las reglas son interpretadas mediante la fórmula de intersección de conjuntos, la cual consiste en la obtención del mínimo valor entre los resultados de la etapa de fusificación que intervengan en dicha regla:

$$\text{Regla} = \text{Min}(\mu_{\text{Temp}}(x), \mu_{\text{Error}}(x)) = \text{"valor"} \text{VariableSalida}$$

Para cada combinación de valores de entradas hacia el controlador difuso, se pueden activar una o más de una regla, dependiendo del rango al que pertenezcan, el valor de salida para cada regla se obtiene mediante la ecuación anterior.

3.2.1.3.4. Método de defusificación

El método utilizado para la defusificación es el método de centroide, el cual se resume con la siguiente ecuación:

$$z^* = \frac{\sum uc(z)z}{\sum uc(z)}$$

Los valores de salida resultantes de las reglas de inferencia representan un valor de pertenencia a cada variable lingüística que compone el conjunto difuso de salida. Para llegar a obtener el valor final de salida mediante el método de defusificación, el primer paso es realizar la unión entre los valores resultantes de las reglas de inferencia, los cuales dan como resultado un valor máximo para cada gráfica de salida en la cual intervengan. La unión viene definida por la siguiente fórmula:

$$\mu_{PUQ}(x) = \text{Max}(\mu_P(x), \mu_Q(x))$$

Donde: (x) Es el valor a analizar.

$\mu_{PUQ}(x)$ Es la unión entre dos conjuntos difusos P y Q.

$\mu_P(x)$ y $\mu_Q(x)$ representan el grado de pertenencia de x a cada conjunto difuso.

3.2.1.4. Diseño del software

En este apartado se procederá a realizar pruebas al módulo de control diseñado, específicamente la respuesta del sistema en su totalidad. Para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo difuso programado, se someterá al módulo a casos específicos (diferentes entradas para el control), obteniendo la salida proporcionada por el sistema y comparándola con los resultados del mismo control, diseñado en un lenguaje matemático de alto nivel, MATLAB.

3.2.1.4.1. Respuesta algoritmo difuso

Se probará la programación implementada en los microcontroladores, sometiendo el módulo a entradas específicas, visualizando la salida que da como resultado y comparándola con el mismo algoritmo de control pero creado en un lenguaje de diseño matemático de alto nivel MATLAB 7.0 mediante la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox*,

3.2.1.4.2. Diseño del algoritmo difuso en Matlab como referencia para el módulo de control de temperatura

Para crear el algoritmo difuso que se utilizará como referencia para las pruebas del módulo, es necesario ejecutar la sentencia Fuzzy en la pantalla de comandos de Matlab. En la Figura 25 se puede observar cómo se ejecuta la aplicación Fuzzy en Matlab.

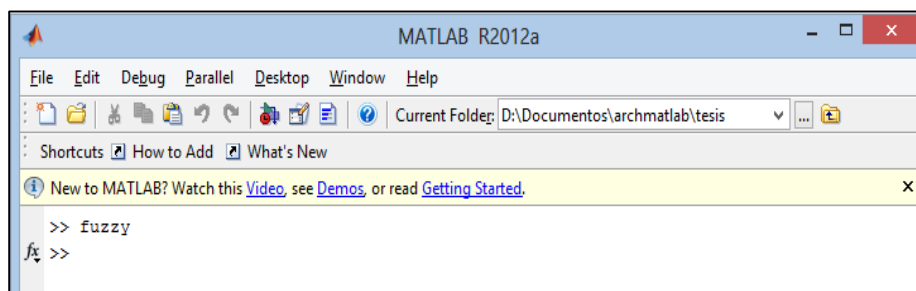


Figura 25. Aplicación Fuzzy Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

En la pantalla que se despliega se procede a colocar los nombres que van a definir a los conjuntos difusos de entrada y salida; para añadir un nuevo

conjunto, se va a editar y añadir una variable, se coloca los conjuntos necesarios que intervienen en nuestro control. En la Figura 26 se puede observar la interfaz para el desarrollo de aplicaciones difusas en Matlab.

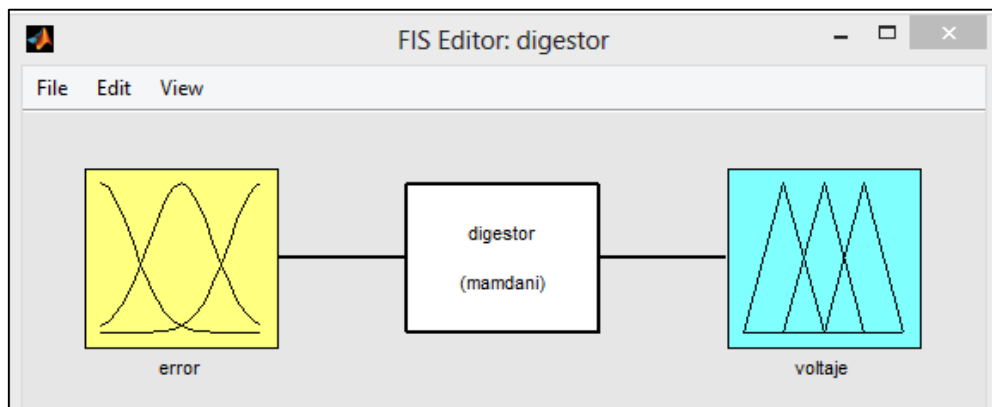


Figura 26. Interfaz Fuzzy Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

Para añadir funciones se va a editar, y se añade variables; de esta manera se van creando los conjuntos. En la Figura 27 se puede observar la representación gráfica del conjunto difuso error.

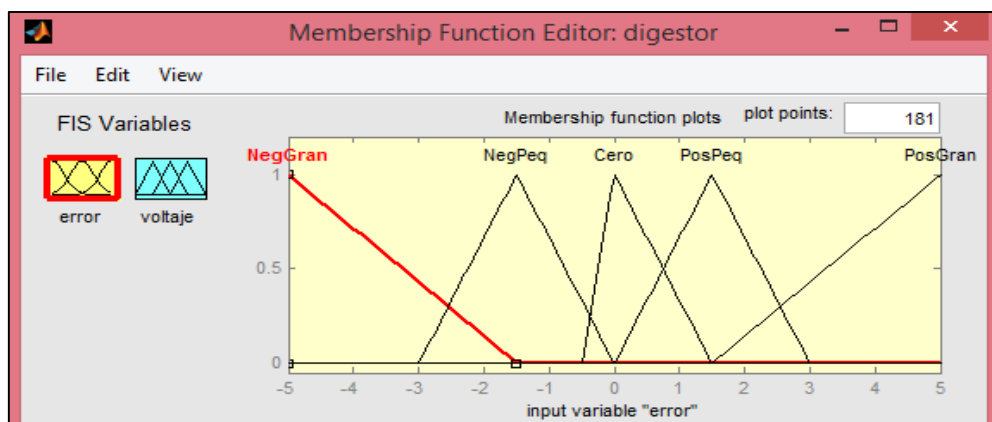


Figura 27. Conjunto difuso de la entrada error en Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 28 se puede observar la representación gráfica del conjunto difuso salida.

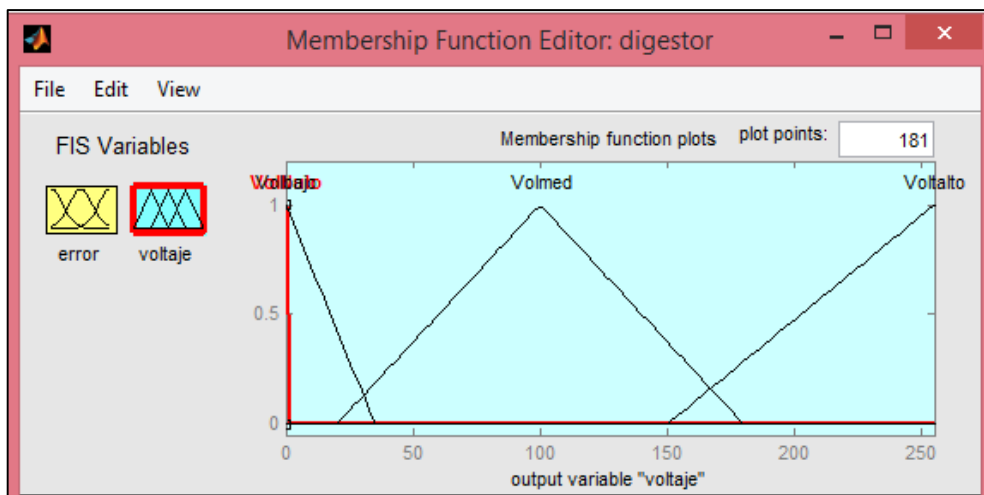


Figura 28. Conjunto difuso de la salida voltaje en Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

En la ventana que se despliega, mostrada en la Figura 29, se ingresa todas las reglas difusas que gobernarán el comportamiento de nuestro sistema.

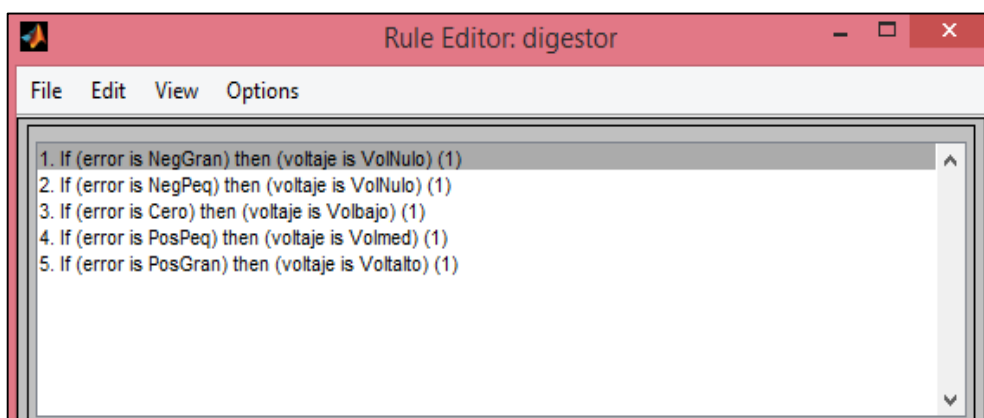


Figura 29. Reglas difusas en Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

En sí el error es positivo pequeño, lo que significa que la diferencia entre el *set point* y la temperatura real es un número positivo pequeño, entonces hay que suministrar un voltaje medio para reducir el error y alcanzar al *set point*.

3.2.1.5. Pruebas del algoritmo para control difuso de temperatura por *set point* y error

Para probar el funcionamiento del módulo de control difuso de temperatura, se tomaron como valores de salida del algoritmo de referencia diseñado en Matlab al ser sometido a valores específicos de entrada en cuanto a *set point* y error. Para tomar los valores de salida de Matlab, se siguen los siguientes pasos:

- En el editor FIS, en la pestaña view, se escoge la opción rules, mostrada en la Figura 30.

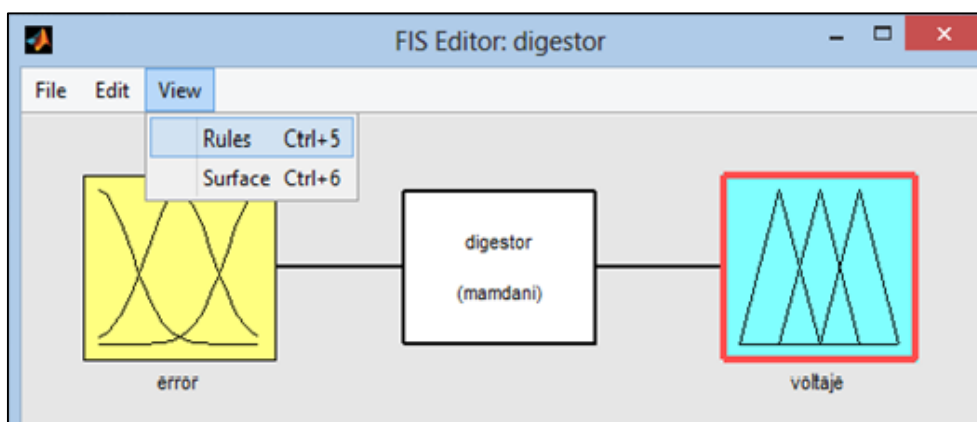


Figura 30. Visualización de reglas en Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

En la pantalla que se despliega se escogen las entradas deseadas, se ejecuta el algoritmo, y el sistema proporciona un valor de salida.

Por ejemplo, en la Figura 31 se muestra que si el error de 1 °C, como salida el sistema proporciona un voltaje de 94,3 voltios.

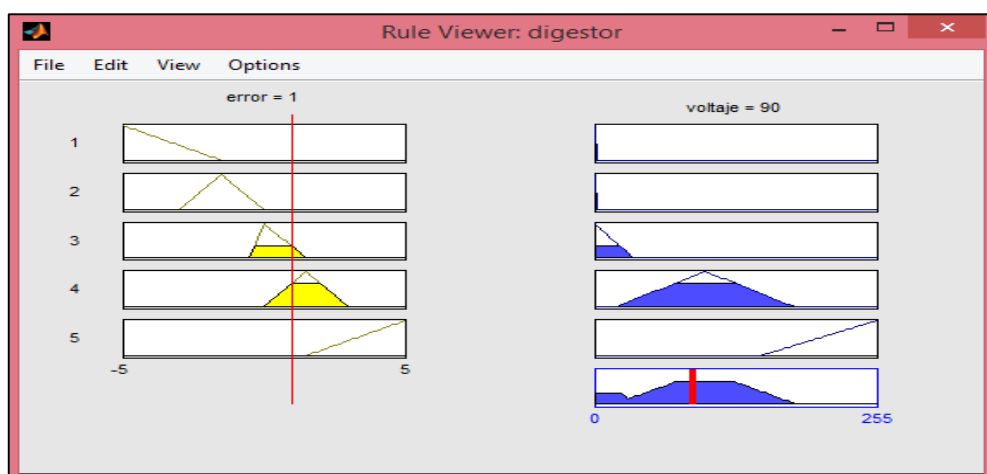


Figura 31. Resultado del algoritmo difuso en Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.6. Simulación del sistema de control difuso en Simulink de Matlab

El modelaje y simulación se ha constituido en una poderosa herramienta para el diseño, análisis y optimización de sistemas y procesos industriales.

La disponibilidad de computadoras personales, cada vez más poderosas, de menor costo y de fácil uso, acompañados por software de aplicación y lenguajes de programación altamente flexibles ha permitido la masificación del uso de diferentes técnicas de simulación y control de procesos.

La simulación de sistemas se ha convertido, entonces, en un importante dispositivo para la toma de decisiones que nos permite, entre otras cosas; predecir el resultado de las acciones que se toman sobre el proceso o sistema de control.

Comprender por qué los eventos ocurren, identificar áreas problemáticas antes de la implantación del sistema, explorar los efectos de las modificaciones, evaluar ideas y su viabilidad e identificar sus ineficiencias, optimizar los procesos (ahorro de energía, cuellos de botella, mejora de los rendimientos, etc.).

3.2.1.6.1. Simulink

El lenguaje de descripción de sistemas a nivel de bloques mencionado es el formalismo gráfico utilizado por Simulink, que es un paquete de software para definición, simulación y análisis de sistemas dinámicos. Simulink está integrado en Matlab, que actúa como motor de cálculo de las simulaciones desarrolladas en Simulink. La potencia de Matlab se ve ampliada por la incorporación de librerías de funciones muy especializadas en ciertos temas, como pueden ser robótica, control, proceso de señales, *fuzzy logic*, etc. Estas librerías se denominan *toolboxes* (cajas de herramientas).

En base a un modelo de una planta se puede diseñar y simular un controlador directamente en SIMULINK, sin necesidad de generar un

programa a partir del controlador para realizar la simulación, Simulink interactuando con Matlab se encarga de ello.

La herramienta de simulación Simulink de Matlab, es una utilidad que permite la simulación temporal de sistemas, que el usuario construye gráficamente a partir de bloques predefinidos o definidos por el mismo. La simulación a través de diagramas de bloques permite una comprobación de los diseños de los sistemas de control antes de pasar a la construcción.

Con Simulink, el usuario puede crear sus propios modelos a partir de una librería de componentes básicos, copiando de una ventana a otra, estableciendo las conexiones oportunas y dando valores a sus parámetros.

La caja de herramientas de la lógica difusa se diseña para trabajar en relación con Simulink, una vez creado el sistema difuso usando las herramientas del GUI, se está listo para enlazar su sistema directamente en una simulación.

Los modelos se implementan a partir de bloques unidos por flechas que indican el flujo de la información. Cada bloque tiene una función en el sistema, como representar una ecuación, generar señales, o permitir la visualización de los resultados. La figura 32, muestra el modelo del sistema implementado en Simulink.

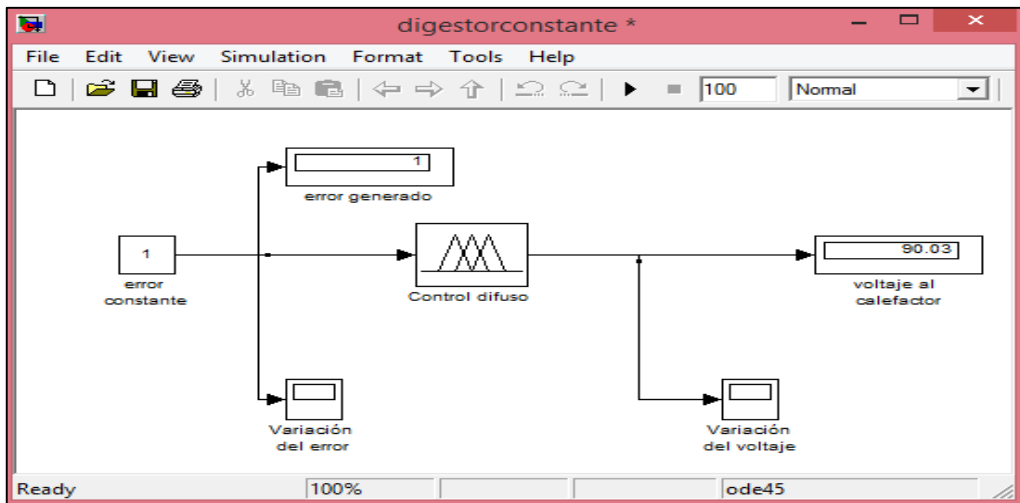


Figura 32. Simulación de modo constante del error de la temperatura en Simulink de Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 33, muestra las conexiones internas de los bloques y su función que en el sistema desempeñan.

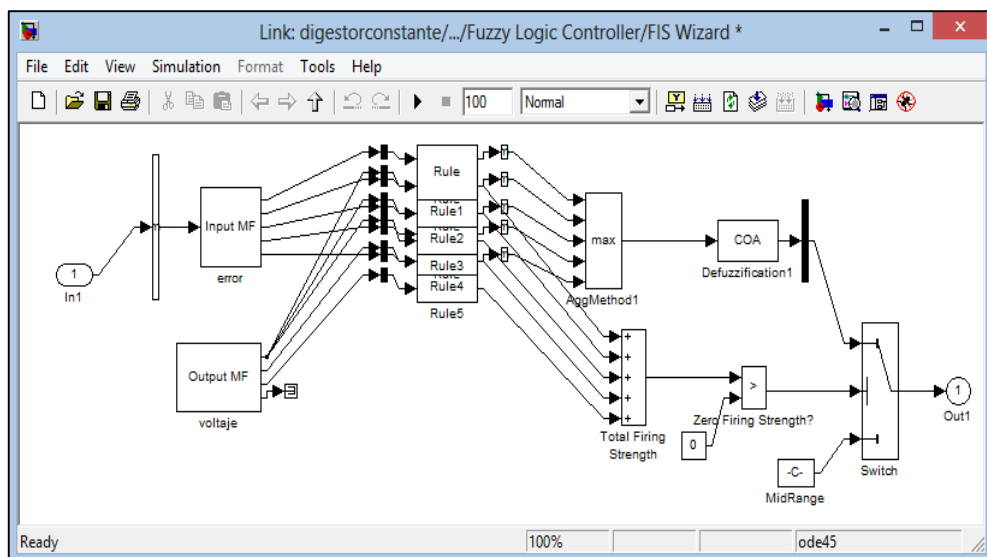


Figura 33. Activación de las reglas del control Fuzzy en Simulink de Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 34, muestra el modelo del sistema implementado en Simulink en donde los datos del error que ingresan al sistema son generados de modo aleatorio.

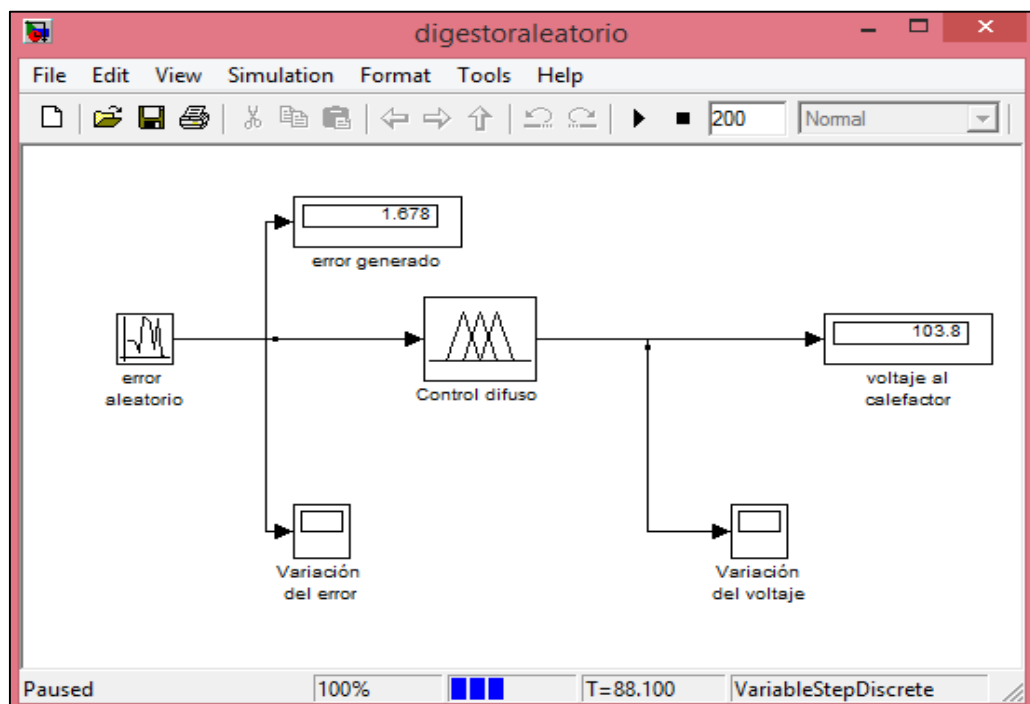


Figura 34. Simulación de modo aleatorio del error de la temperatura en Simulink de Matlab.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Objetivo 2: Diseñar e implementar un control difuso en un microcontrolador autónomo para el control de la temperatura, que permita realizar un interfaz entre el software y el biodigestor, para realizar una comparación de similitud con distintos valores de temperatura.

3.2.2.1. Diseño del hardware

El módulo de control de lazo cerrado de temperatura a construir, se encuentra compuesto por sensores, circuitos integrados, actuadores, pantallas para la visualización de datos y elementos pasivos, utilizados en la placa electrónica. A continuación se presentan los diagramas esquemáticos por separado de todas las etapas de hardware que intervienen en la placa electrónica que gobierna al módulo de control.

3.2.2.1.1. Diagramas de bloques

El hardware del módulo de control difuso, está compuesto por diferentes bloques o secciones, entre las cuales se encuentran, la fuente de alimentación con cruce por cero, el bloque de control con sus entradas, un bloque de visualización y monitoreo, una etapa de potencia que va conectada hacia los elementos finales de control, y finalmente el sensor de temperatura LM335, necesario para la realimentación del sistema, en la Figura 35 se puede observar el diagrama de bloques del hardware correspondiente al módulo de control difuso diseñado.

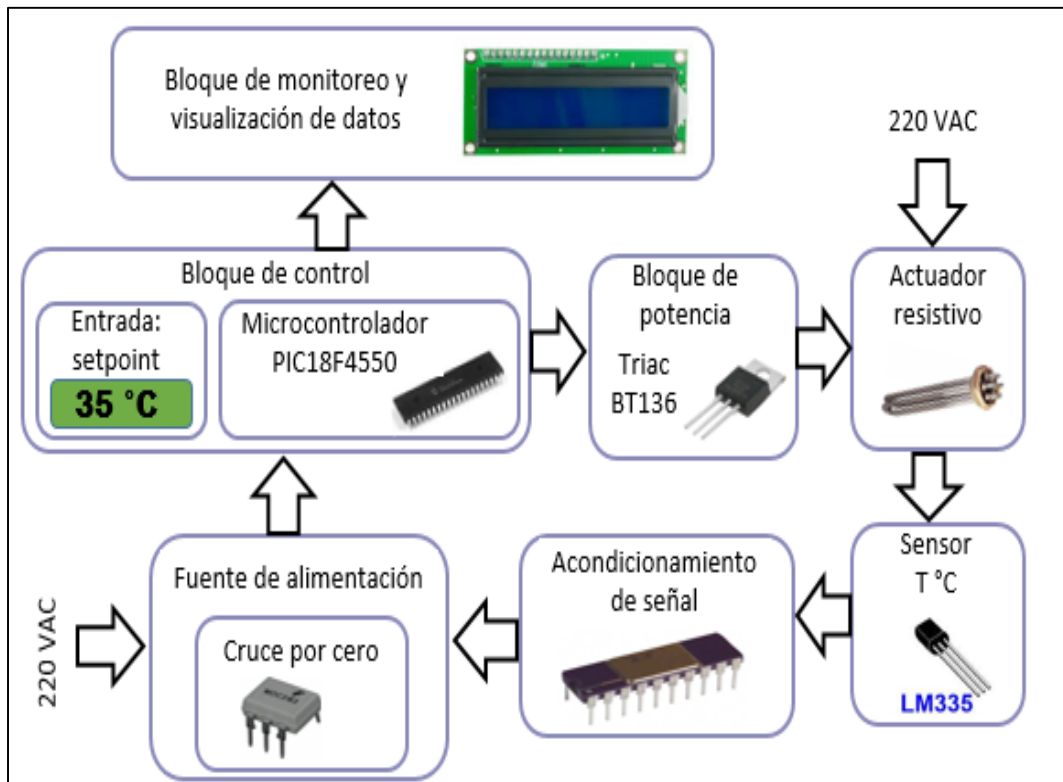


Figura 35. Diagrama de bloques del hardware.

Fuente: Adaptado de Vinicio Dávila.

3.2.2.1.2. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación a ser implementada en el módulo de control difuso tiene como objetivo principal, proporcionar el voltaje y la corriente necesaria para el funcionamiento y la activación de las partes que componen el sistema, está compuesta por varias secciones entre las cuales se puede mencionar; un transformador de 220 VAC a 12 VAC, un rectificador puente de diodos, una etapa de filtrado, y los reguladores de voltaje lineales. La fuente diseñada, utiliza un transformador, el cual se

encarga de reducir los 220 VAC de la línea eléctrica, a 12 VAC; este voltaje será filtrado, mediante un juego de capacitores conectados en paralelo, y regulado por los integrados 7805 y 7905, los cuales proporcionan una salida de voltaje de 5 VDC y -5 VDC respectivamente, los voltajes necesarios para activar los elementos que conforman la etapa de control del sistema.

3.2.2.1.3. Detección cruce por cero

El circuito para la detección de cruce por cero, tiene como principal componente el circuito integrado LM311, el diagrama de conexión se muestra en la Figura 36.

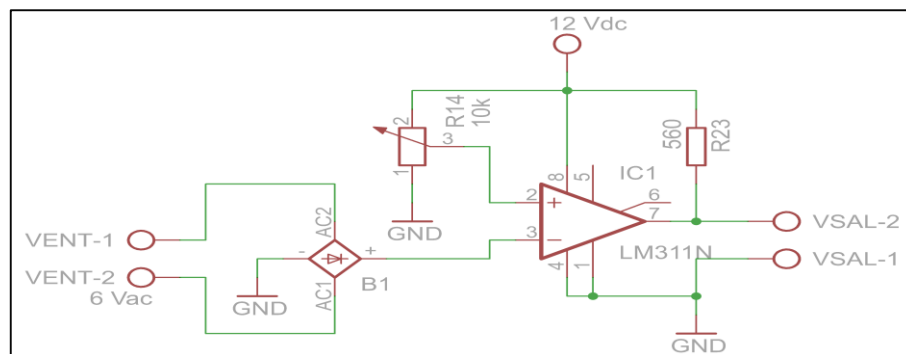


Figura 36. Diagrama esquemático detección cruce por cero de una señal de voltaje alterna

Fuente: Elaboración propia.

El LM311 de Nacional Semiconductor es una de las familias más populares en comparadores integrados. Puede operar con tensiones de ± 15 o con tensión simple de +5V y la salida es en colector abierto con tensiones de

alimentación independientes para seleccionar los niveles de tensión de salida. En la figura 37 se muestra la configuración típica del fabricante para la detección de cruce por cero. La operación del circuito es la siguiente:

- Si el voltaje de la entrada no inversora es mayor que la entrada inversora la salida será 0 voltios.
- Si el voltaje de la entrada no inversora es menor que la entrada inversora la salida será 12 voltios.

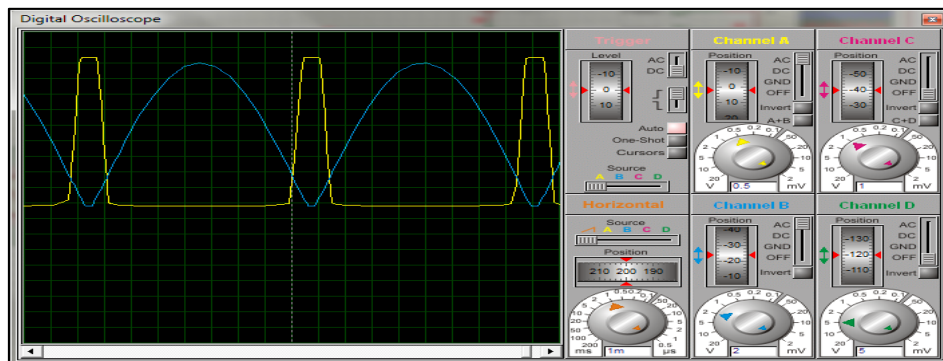


Figura 37. Detección de cruce por cero con Im311. Simulación en Software *Proteus*.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.1.4. Etapa de control

En este apartado se detalla los elementos de hardware que intervienen directamente con la etapa de control, específicamente el microcontrolador PIC18F4550, y los elementos que sirven para adecuar e ingresar las entradas al sistema, para su posterior procesamiento, además de las salidas del sistema. En la figura 38 se puede observar los pines del microcontrolador principal y hacia donde están direccionados.

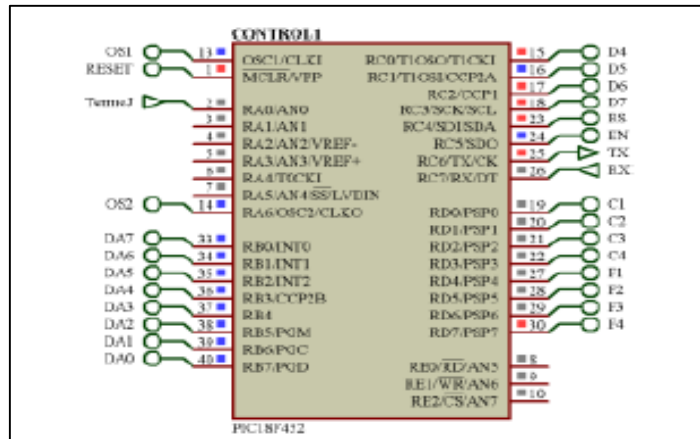


Figura 38. PIC18F4550 – Control principal.

Fuente: Datasheet PIC18F4550.

3.2.2.1.5. Entradas del sistema

El módulo de control permite al usuario del sistema ingresar una temperatura deseada (*set point*), esta temperatura se ingresa por medio de un teclado, las señales para controlar el teclado se observa en la Figura 39.

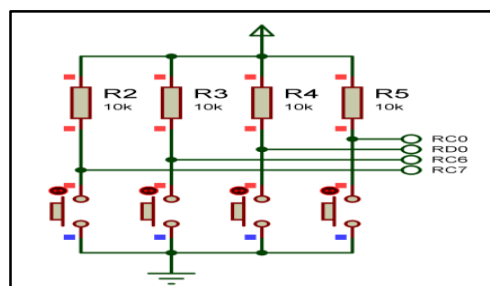


Figura 39. Hardware set point.

Fuente: Elaboración propia.

La segunda entrada para el módulo de control difuso es el error, este será calculado mediante software. Para obtener este dato es necesario censar la temperatura real que está proporcionando el sistema, para esto se utiliza el sensor LM335.

3.2.2.1.6. Salidas del sistema

Para visualizar los resultados del módulo de control se utiliza una pantalla LCD 16x2. En esta pantalla el operador podrá interactuar variando el *set point* y observando valores como la señal real, el error del sistema y salida.

Los pines de control y datos para manejo de pantalla son conectados al puerto D del microcontrolador principal. En la Figura 40 se puede observar la conexión de la pantalla LCD.

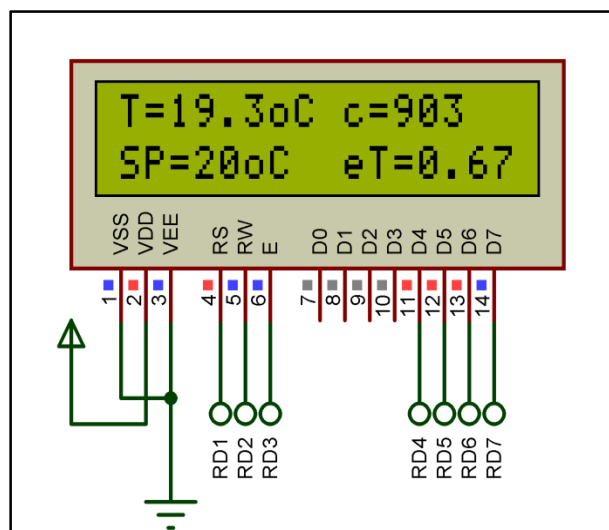


Figura 40. Hardware pantalla LCD 16x2.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.1.7. Etapa de potencia

El circuito para la etapa de potencia, se muestra en la figura 41, para regular la potencia aplicada a la resistencia eléctrica de 0 a 100% se realiza mediante la regulación por ángulo de fase. El circuito está conformado por el optoacoplador MOC3041 encargada del control del ángulo de disparo y triac BTA41 dispositivo de potencia que soporta corrientes de hasta 40 amperios.

Para control on/off de la electrobomba se utiliza el opto acoplador MOC3021 como circuito de disparo y el triac BT136 que soporta corrientes de hasta 15 amperios. En la Figura 41 se puede observar la conexión del hardware de potencia.

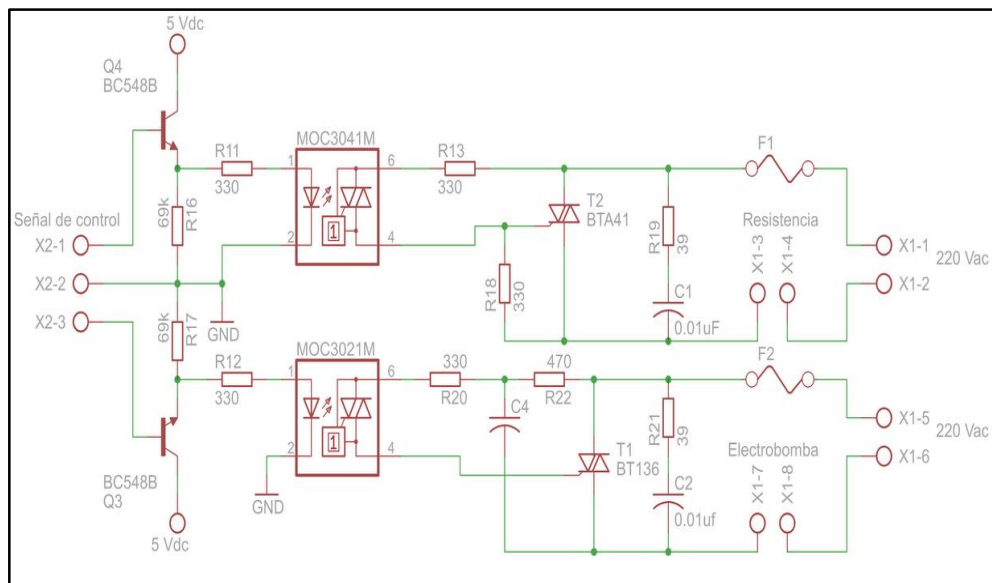


Figura 41. Conexión del hardware de potencia.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2. Construcción del biodigestor y operación del biodigestor

3.2.2.2.1. Construcción del biodigestor.

Diseño del biodigestor. Se ha escogido el biodigestor de modo discontinuo o batch planteado por Wanga & Zhonga (2007). Fue alimentado una sola vez y se pretendió minimizar la intervención del operador, generando una ventaja en el proceso anaeróbico, ya que el interior del biodigestor tuvo un contacto mínimo con el exterior.

Tanque biodigestor. Se escogió una proporción exterior de 0,26 m de diámetro y 0,40 m de altura, y dimensiones interiores de 0,19 m de diámetro y 0,26 m de altura, con un volumen de 0,0073 m³, equivalente a 7,3 litros, con una efectividad de una capacidad de 5 litros para el sustrato, con una chaqueta interior de 0,08 m de fondo (base) y 0,03 m a los costados para la recirculación del agua y calentamiento interno, con un diseño y montaje de un sistema de agitación.

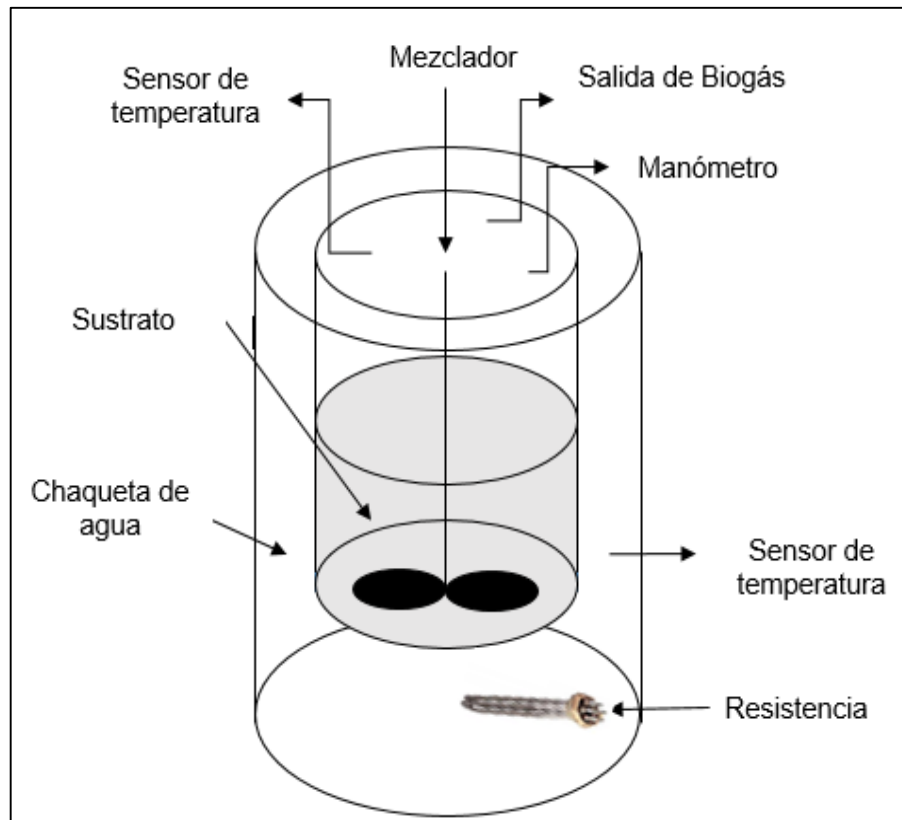


Figura 42. Estructura interna de un biodigestor anaeróbico.

Fuente: Elaboración propia.

Material: por la durabilidad se seleccionó el acero inoxidable 304 para la construcción del tanque, con un espesor de 1,1 mm.

- Sistema de agitación: sobre la cúpula del tanque se ha colocado un motor monofásico de 1 HP, 220 VAC, 60 Hz para la agitación interna, lo que se logra con un extensor de 1 ½'' de diámetro y una hélice de acero inoxidable de 0,2 m de diámetro, ubicado a 0,1 m del fondo, a fin de lograr mayor efecto de homogenización de la mezcla temperatura.

- Sistema de calentamiento: Para el mantenimiento de las condiciones térmicas internas adecuadas del biodigestor, se ha diseñado el sistema de recirculación de agua por una chaqueta interna, controlado automáticamente por un sensor de temperatura y un microcontrolador.
- Bombas de recirculación: la recirculación del agua caliente dentro de la chaqueta estará a cargo de una bomba de 1 HP de potencia.

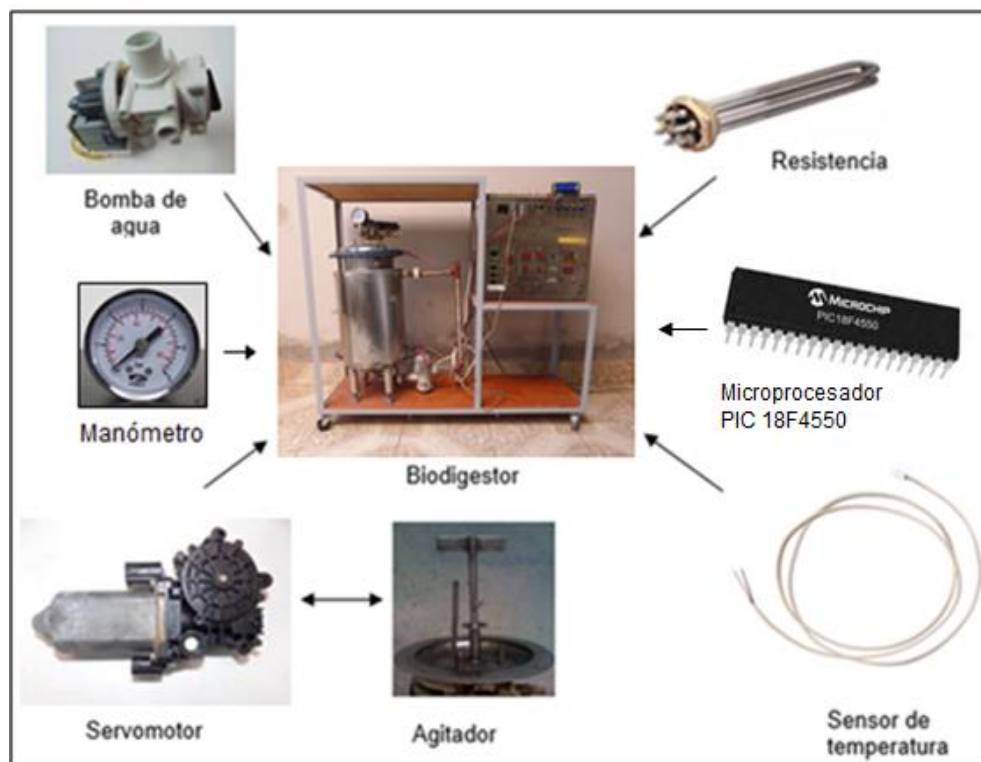


Figura 43. Componentes del funcionamiento del biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

- Bolsas de almacenamiento de biogás: se ha instalado una funda de geomembrana de 1 mm de espesor, para almacenar la producción de biogás.

3.2.2.2. Alimentación del biodigestor. Se utiliza el residuo orgánico (fruta, vegetales y restos de comida), estiércol de vacuno. El proceso comienza con la mezcla y el pesado de la biomasa. Seguido del mezclado con agua, la relación 1:3 entre el sustrato y el agua, se toma según el criterio dado por K. Komemoto (2009). Y por último se introduce la mezcla al biodigestor hasta alcanzar el sello hidráulico.

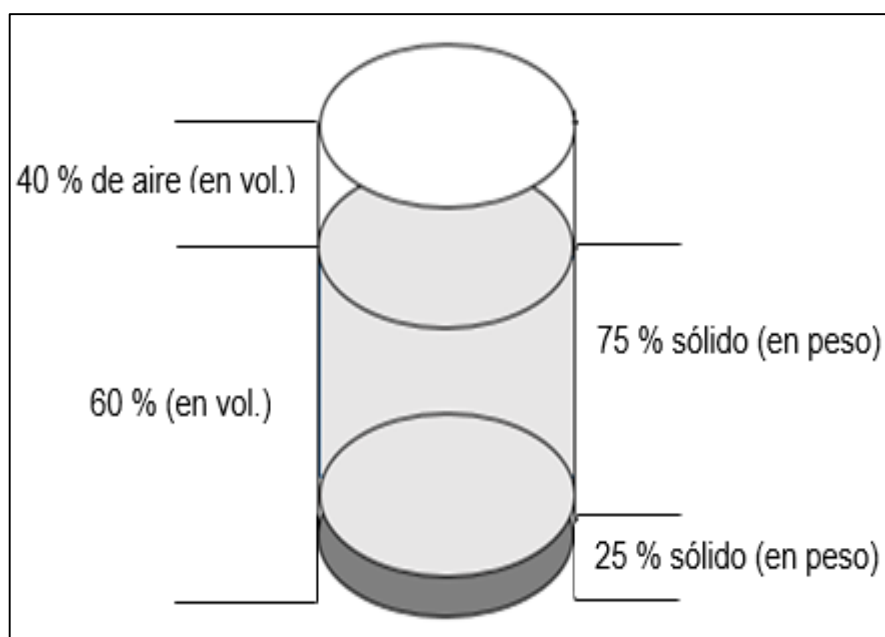


Figura 44. Porcentajes de carga.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2.3. Operación del biodigestor. Fijado la temperatura de operación el sistema de control difuso mantiene esa temperatura con la recirculación de agua con ayuda de una bomba de agua autocebante de 1 H.P. a través de una chaqueta de recirculación.

En la tabla 12, se muestran las características generales del biodigestor.

Tabla 12.

Características del biodigestor.

Características	Unidad de medida
Volumen total de la celda	0,0073 m ³
Volumen de llenado al 60 %	0,0051 m ³
Relación másica (sustrato/agua)	1:3
tipo de operación	Por lotes o tipo batch
Tiempo de retención de diseño	30 días
Temperatura promedio (set point)	35 °C
pH	6,5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2.4. Diseño e implementación del sistema de control

Después de realizar el estudio de sedimentación de la mezcla que se va a tener en el biodigestor y con base al sistema mecánico diseñado, se procedió a diseñar e implementar el sistema eléctrico y de control que permita cumplir los requerimientos técnicos de la planta de biogás.

Consideraciones generales para el diseño:

Para el diseño del sistema de control del prototipo de una planta de biogás se ha considerado cuatros aspectos importantes:

1. Garantizar y mantener las condiciones más favorables para dicho proceso, lo que prácticamente depende de una variable fundamental que es la temperatura al interior del biodigestor.
2. La seguridad, tanto para las personas como para los equipos.

3. El trabajo continuo de la planta, mediante la utilización de elementos robustos y confiables; y,
4. Que el sistema sea simple en su operación.

Con base a esas consideraciones, el sistema de control se encargará de:

1. Mantener la temperatura al interior del biodigestor según el *set point* previamente fijado, activando el control difuso mediante la operación de los elementos que influyen en la regulación de dicha variable.
2. Mantener la mezcla homogénea dentro de biodigestor para mejorar las condiciones de generación de biogás mediante un agitador.
3. Controlar la presión en la línea del biogás para evitar sobrepresión y posibles roturas de las juntas del tanque, mediante la presión máxima del manómetro como medida de seguridad.
4. Proporcionar al operador información visual de las variables del proceso y facilitar el control de la planta, mediante la pantalla LCD.

Implementación del control difuso:

Un microcontrolador de 8 bits PIC18F4550 de Microchip fue seleccionado como procesador embebido, para implementar el algoritmo de control difuso para la regulación de temperatura en el digestor anaeróbico, el algoritmo de control difuso fue escrito en Lenguaje C (ver figura 45).

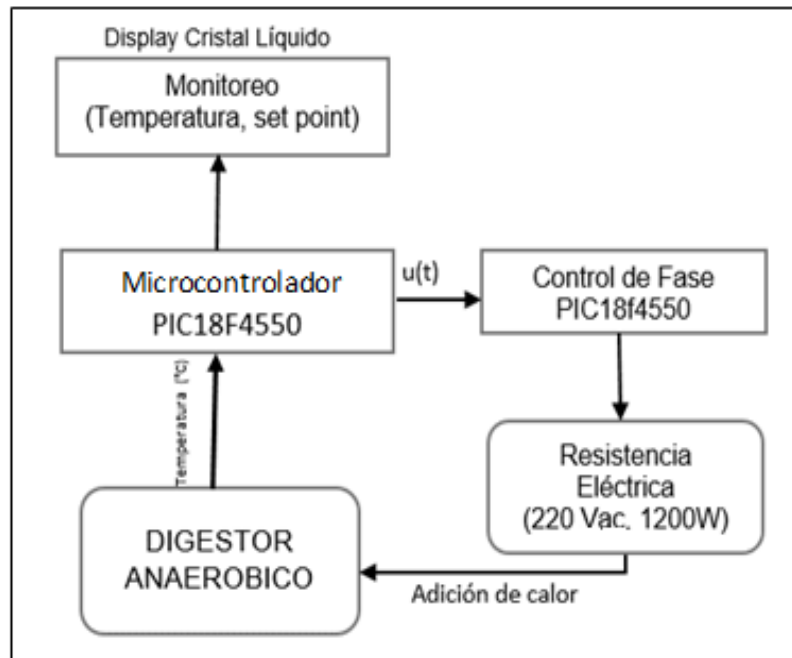


Figura 45. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura basado en microcontrolador.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 46 muestra el diagrama de bloques del sistema de control y sus respectivas interacciones.

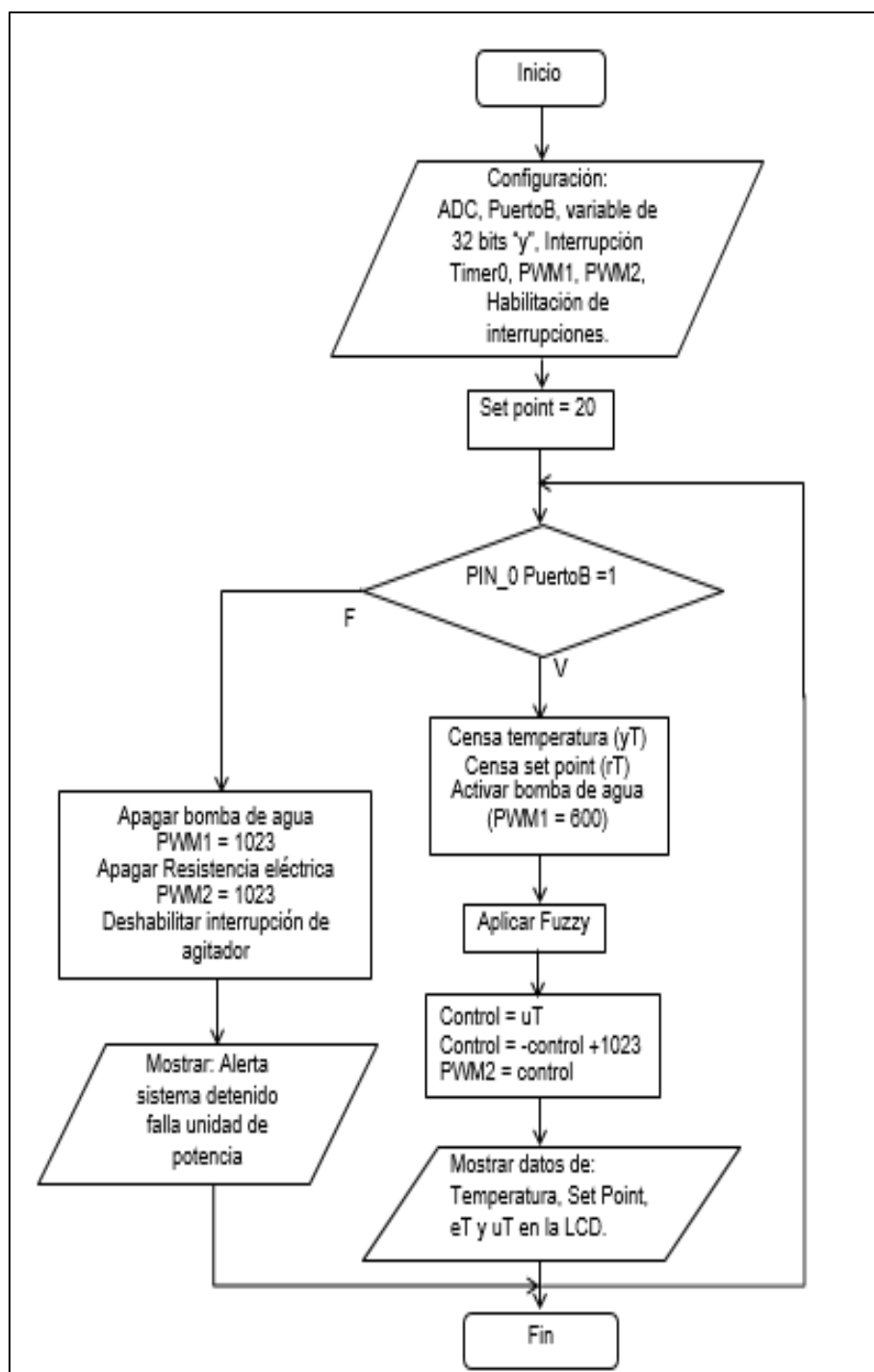


Figura 47. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el microcontrolador.

Fuente: Elaboración propia.

Inicio: determina el inicio del proceso de control, que gobernará el control difuso. Declaración e inicialización de variables globales y periféricos; se definen las variables a intervenir en todo el proceso con sus valores iniciales, además se inicializan los periféricos pantalla LCD, teclado, puerto B para comunicación serial. Censa la temperatura, censa el *set point*, calcula el error que es la entrada al sistema fuzzy, y muestra los datos en la pantalla LCD.

Para cambiar la temperatura deseada se presiona la tecla de cambio set point esta vuelve a inicializar las variables de entrada permitiendo el ingreso de un nuevo set point y finaliza el proceso.

- **Rutina de interrupción:** en la figura 48 se puede observar el diagrama de flujo correspondiente al método interrupción, necesario para el control on/off del agitador en el biodigestor.

Se inicia la interrupción por desbordamiento del TIMER0

Se inicializa la variable “y” definida previamente, en esta variable se almacena las veces que se realiza la interrupción por desbordamiento del TIMER0 del microcontrolador. Cuando este valor es menor de 600 mantiene desactivado el agitador del biodigestor, cuando el valor de la variable se encuentra entre 600 y 800 activa el agitador del biodigestor; caso contrario inicializa nuevamente la variable “y”.

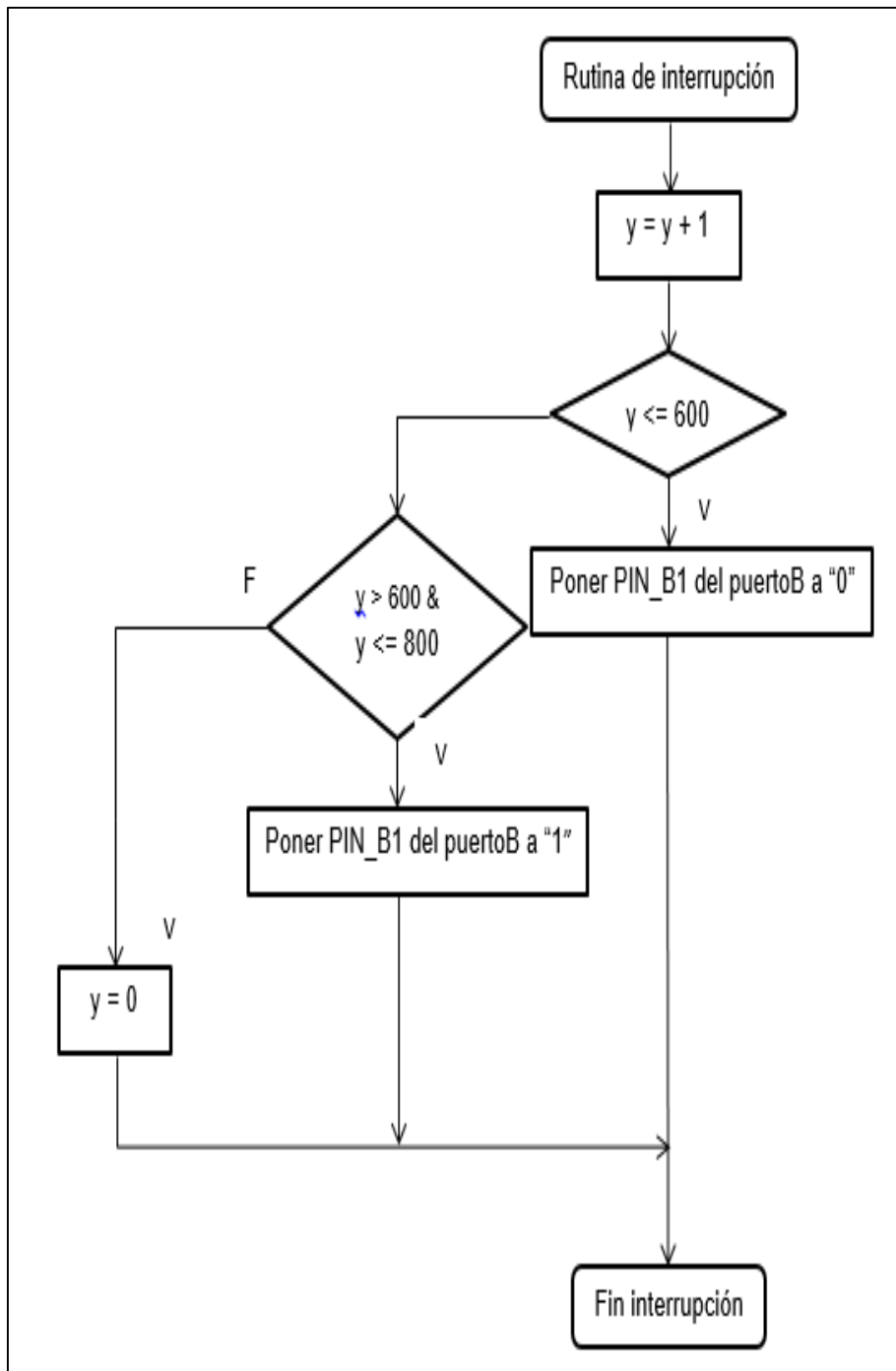


Figura 48. Diagrama de flujo de la rutina de interrupciones.

Fuente: Elaboración propia.

- Rutina Fuzzy

En la figura 49 se puede observar el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo diseñado.

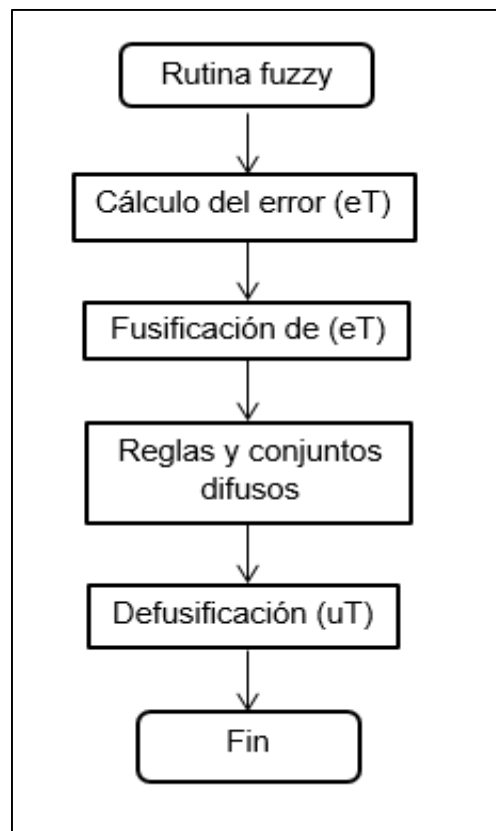


Figura 49. Diagrama de flujo de la rutina Fuzzy.

Fuente: Elaboración propia.

Rutina fuzzy:

Cálculo del error $e(T)$: se calcula el error que presente el sistema mediante la siguiente fórmula: $\text{error} = T(^{\circ}\text{C}) \text{ deseada} - T(^{\circ}\text{C}) \text{ real}$. Donde $T(^{\circ}\text{C})$ deseada es ingresada por el usuario y $T(^{\circ}\text{C})$ real es la lectura del sensor.

Fusificación: ingresa el error calculado que es evaluado en todas las funciones que pertenecen al conjunto difuso de temperatura. Estas funciones representan los valores de pertenencia hacia cada una de las variables lingüísticas del conjunto difuso temperatura.

Reglas y conjuntos difusos: las reglas, que se activan, dependen exclusivamente de los rangos de temperatura del error, en las cuales se evalúan los valores obtenidos por el proceso de fusificación, para las diferentes funciones que componen los conjuntos difusos de entrada, dependiendo de la regla que se active.

Defusificación: Ingresan los valores obtenidos de las reglas difusas implementadas. Cada regla representa un valor de pertenencia hacia una variable lingüística del conjunto difuso de salida, en caso de que se activen dos o más reglas que actúen sobre la misma variable, es necesario realizar la unión entre ellas, definida, en las operaciones con conjuntos difusos, como el valor máximo de los que estén interviniendo. Cada valor máximo obtenido depende de las reglas que se activen. Se almacena el valor obtenido en la variable $u(T)$ para ser enviado por medio del DAC hacia el microcontrolador para tomar acciones del control.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

El desempeño del sistema de control difuso fue probado experimentalmente para regular la temperatura en condiciones mesofílicas. Se estabilizó inicialmente el sistema a 35 °C y posteriormente se realizaron los cambios de tipo escalón unitario en el *set point* a valores de 40 °C y 45 °C para evaluar el comportamiento del controlador difuso basado en microcontrolador.

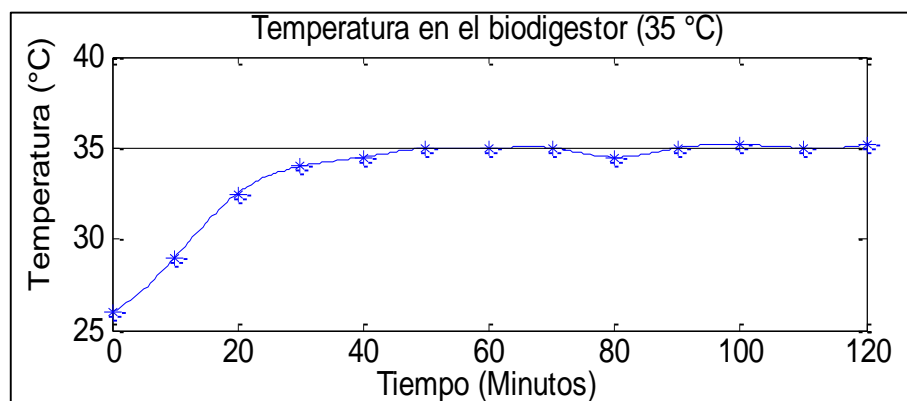


Figura 50. Respuesta del sistema de control difuso basado en microcontrolador.

Fuente: Elaboración propia.

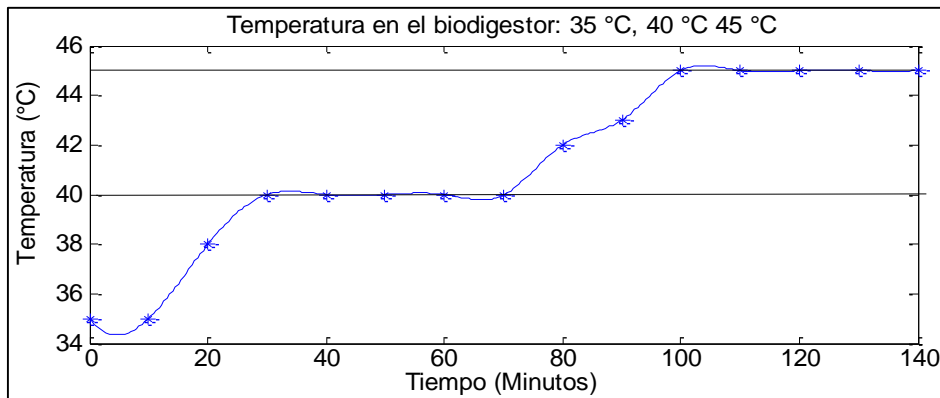


Figura 51. Respuesta del sistema de control difuso para diferentes temperaturas.

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados, los parámetros de desempeño del controlador difuso basado en microcontrolador son:

- Máximo sobre pico: 0 %
- Tiempo de estabilización: 20 min.
- Error en estado estacionario: 0 %
- Tiempo muerto: 3 min.

Según lo mencionado por K. Komemoto (2009), el tiempo estimado para el proceso de digestión anaeróbica es de 30 días aproximadamente dada su capacidad volumétrica y características del sustrato. Bajo esta condición se puede determinar que el sistema de control es adecuado para las pruebas que se desean efectuar para determinar el efecto de la temperatura en la calidad del biogás generado dentro del biodigestor.

El punto de operación inicial que se establece en el digestor anaeróbico es de 35 °C. La variación del punto de operación dentro del rango de temperatura mesofílico, permitirá evaluar y registrar los efectos de la temperatura en calidad del biogás generado en el biodigestor anaeróbico.

La muestra de prueba se preparará mezclando 800 gr de la Fracción de Residuos Sólidos Total (FRST) y 2 400 ml de agua de grifo, previamente reposada durante 24 horas para eliminar los efectos del cloro que pueden eliminar la población bacteriana.

Para la inoculación de la materia orgánica se utiliza estiércol de ganado vacuno, pues, optimiza el funcionamiento garantizando una población bacteriana especializada y suficiente, capaz de degradar la carga orgánica que se deposita en el biodigestor anaeróbico.

El sustrato obtenido es depositado en el biodigestor anaeróbico con capacidad de 5 Litros, y se dispuso del 30 % de su capacidad para almacenamiento de biogás generado en el proceso de fermentación. La relación de mezcla 1:3 entre el sustrato y agua, se toma según criterio dado por Komemoto (2009).

El pH de la muestra inicial depositada en el reactor anaeróbico fue medido con un potenciómetro HANNA pH 210 (UNJBG-FACI - Laboratorio de Química), el cual registró un valor de 6,90. De acuerdo a lo descrito por A.

Guevara (1996) este valor de pH se encuentra dentro del rango deseado (6,5 – 7,5); ya que si la muestra presenta un nivel de acidez alto (pH inferior a 6,5); es causal de inhibición de las bacterias metanogénicas.



Figura 52. Potenciómetro Hanna pH 210.

Fuente: Laboratorio de Química – FACI.

El análisis de los gases se realizó con el analizador de gases El AGS-688 de la prestigiosa marca italiana Brain Bee, es uno de los analizadores de gases más completo y versátiles del mercado mundial.



Figura 53. Analizador de gases AGS-688.

Fuente: SENATI – TACNA.

La presión fue medida con el manómetro Fimet, con un rango de presión de [0, 80] psi.



Figura 54. Manómetro de presión Fimet.

Para evaluar los efectos de la temperatura en la calidad del biogás, el experimento fue realizado durante un periodo de 30 días. El biodigestor fue sellado herméticamente y se mantuvo una agitación constante a 120 rpm durante 3 veces cada 8 horas. Geomembranas de 1 mm de espesor, para almacenar la producción de biogás.

La calidad del biogás fue medido en términos del porcentaje volumétrico de la Concentración del Metano (CH_4) y Dióxido de Carbono (CO_2), puesto que la calidad del biogás depende principalmente de la presencia de estos gases (Mandal, 1999) y (Vindis, 2008). La frecuencia de muestreo para el registro del valor de la concentración tanto del CH_4 como del CO_2 fue 1 muestra/día (muestreo cada 2 días).

Los residuos orgánicos fueron obtenidos del domicilio del investigador en el Distrito C. Gregorio Albarracín Lanchipa, de la provincia de Tacna. Los residuos recolectados se clasificaron en residuos de frutas, vegetales y comida. Las proporciones utilizadas para la preparación del sustrato del biodigestor con los residuos de fruta, son iguales debido a es igual la proporción de generación en la fuente (ver tabla 13).

Tabla 13.

Composición de la materia orgánica de residuos de fruta.

Componente	Fracción de Residuos Sólidos Urbanos (%)
Cascara de Papaya	25
Cascara de mandarina, naranja	25
Cascara de plátano, mango	25
Cascara de uva, manzana, sandía, melón	25

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 14, se muestra los volúmenes respectivos de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) que se obtuvieron con el sustrato compuesto con los residuos de fruta, agua y estiércol de ganado vacuno en el biodigestor con un control difuso de la temperatura de 35 °C.

Tabla 14.

Componentes del biogás generado con residuos de fruta.

Tiempo (Días)	CH ₄ (% Vol)	CO ₂ (% Vol)
1	2	2
3	7	6
5	8	5,5
7	11	5,5
9	16	4,8
11	24	6
13	25	4
15	32	9
17	32	5,8
19	37	7,1
21	41	5,3
23	42	5,9
25	47	6,7
27	51	7,2
30	63	7

Fuente: Elaboración propia.

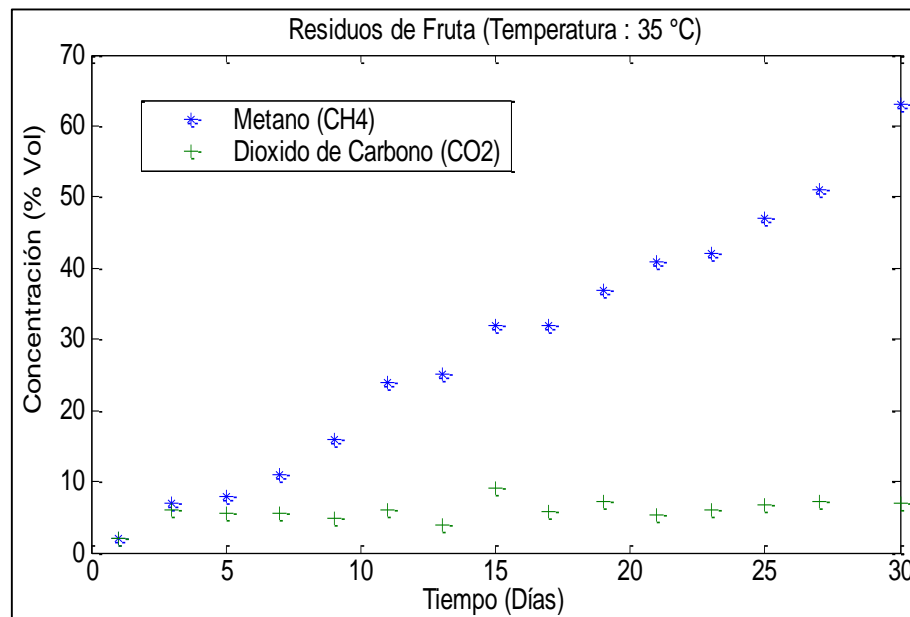


Figura 55. Generación de biogás, con residuos de fruta (35 °C).

Fuente: Elaboración propia.

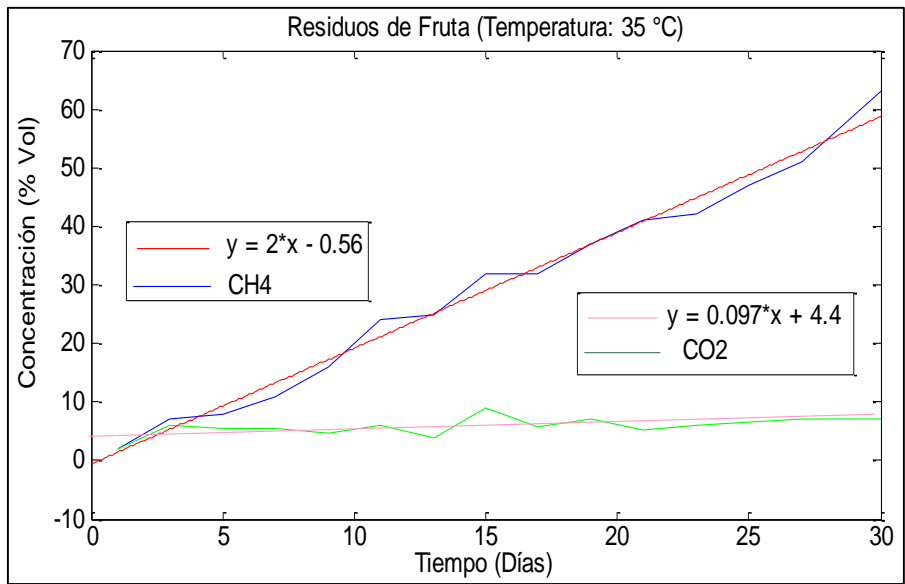


Figura 56. Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH₄ y CO₂ del biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15.

Presión generada del biogás con residuos de fruta.

Tiempo (Días)	Presión (psi)
1	8
3	16
5	21
7	23,5
9	25,5
11	27
13	29
15	32,5
17	35,5
19	39
21	42
23	43
25	44
27	44
30	44

Fuente: Elaboración propia.

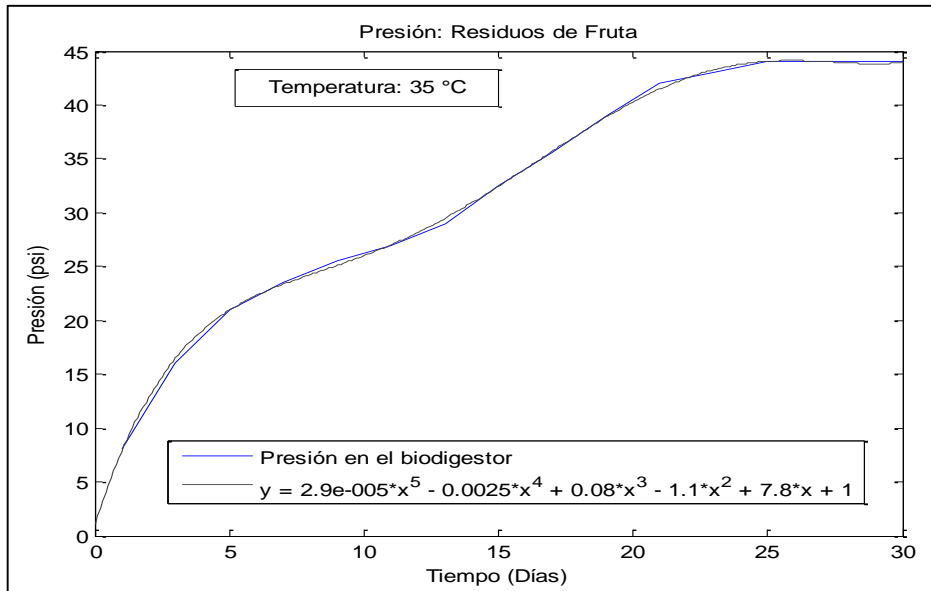


Figura 57. Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de fruta.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen del biogás generado por los residuos de fruta que se obtuvo con un control difuso de temperatura a 35 °C es de 0,024 m³.



Figura 58. Biogás almacenado de residuos de fruta.

Fuente: Elaboración propia.

Las proporciones utilizadas para la preparación del sustrato del biodigestor con los residuos de vegetales, son iguales debido a que es igual la proporción de generación en la fuente (ver tabla 16).

Tabla 16.

Composición de la materia orgánica de residuos de vegetales.

Componente	Fracción de Residuos Sólidos Urbanos (%)
Cascara de pepinos y espinacas	25
Cascara de zanahorias tomates	25
Cascara de papa, rabanito, brócoli	25
Restos de coliflor, lechuga, betarraga	25

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 17, se muestra los volúmenes respectivos de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) que se obtuvieron con el sustrato compuesto con los residuos de vegetales, agua y estiércol de ganado vacuno en el biodigestor con un control difuso de la temperatura de 35 °C.

Tabla 17.

Componentes del biogás generado con residuos de vegetales.

Tiempo (Días)	CH ₄ (% Vol)	CO ₂ (% Vol)
1	2	2
3	7,4	5
5	8,8	5
7	12	4,5
9	17	5,2
11	24,7	4,8
13	26	5,9
15	32,8	5
17	34	7
19	39	6,8
21	44	7
23	47	6,3
25	52	5,9
27	58	6,4
30	68	7

Fuente: Elaboración propia.

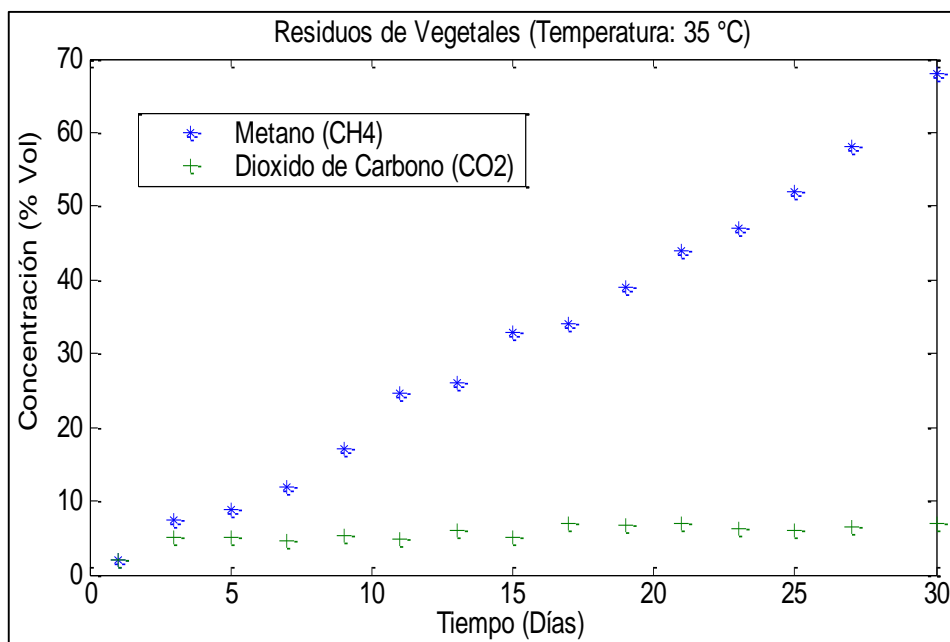


Figura 59. Generación de biogás con residuos de vegetales (35 °C).

Fuente: Elaboración propia.

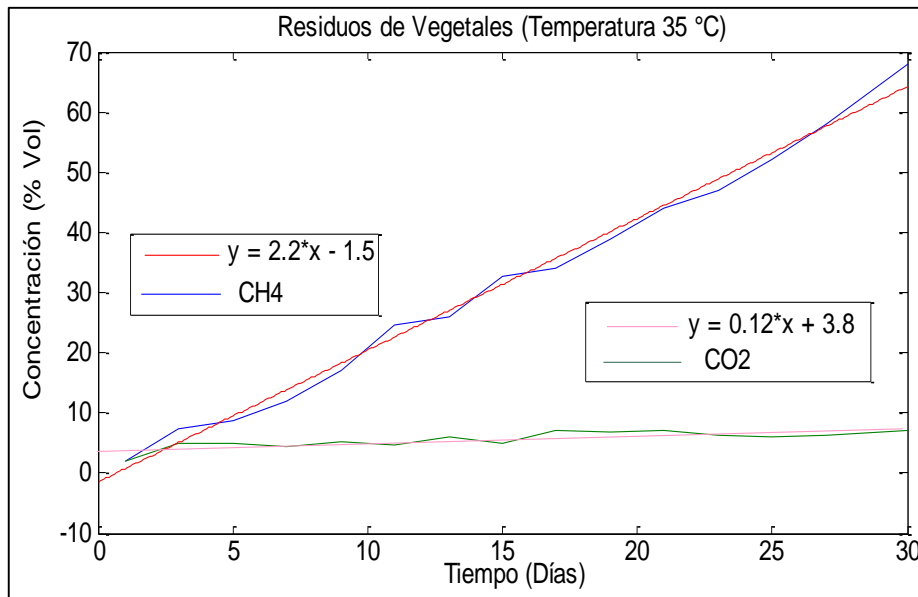


Figura 60. Aproximaciones lineales de las Concentraciones de CH₄ y CO₂ del biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18.

Presión generada del biogás con residuos de vegetales.

Tiempo (Días)	Presión (psi)
1	8
3	17
5	22
7	24
9	26,5
11	28
13	30
15	33,5
17	36
19	40,5
21	43
23	44,5
25	46
27	46
30	46

Fuente: Elaboración propia.

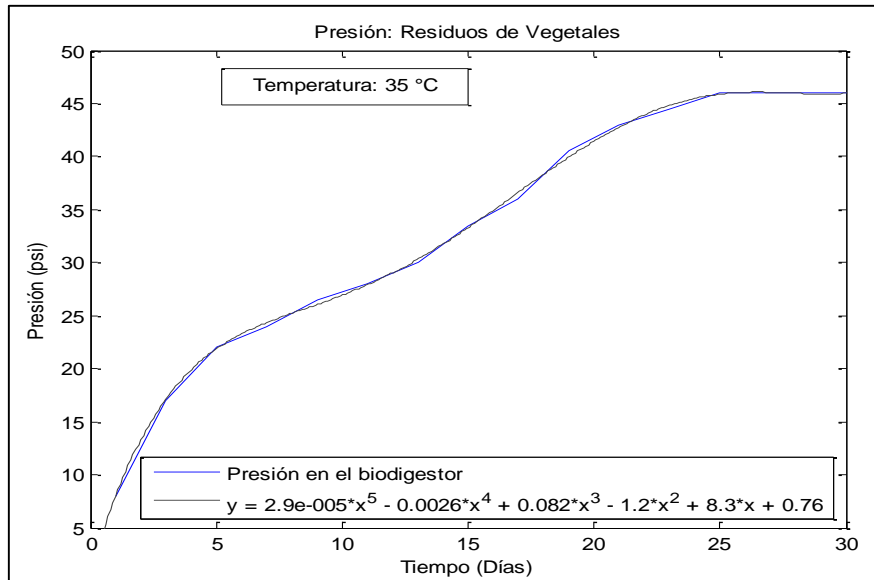


Figura 61. Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de vegetales.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen del biogás generado por los residuos de vegetales que se obtuvo con un control difuso de temperatura a 35 °C es de 0,026 m³.



Figura 62. Biogás almacenado de residuos de vegetales.

Fuente: Elaboración propia.

Las proporciones utilizadas para la preparación del sustrato del biodigestor con los residuos de comida, son iguales debido a su igual proporción de generación en la fuente (ver tabla 19).

Tabla 19.

Composición de la materia orgánica de residuos de comida.

Componente	Fracción de Residuos Sólidos Urbanos (%)
Residuos de arroz, frejoles, alverjas	25
Residuos de papas, verduras	25
Residuos de pescados y mariscos	25
Residuos de pollo, carne, huevos.	25

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 20, se muestra los volúmenes respectivos de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) que se obtuvieron con el sustrato compuesto con los residuos de comida, agua y estiércol de ganado vacuno.

Tabla 20.

Componentes del biogás generado con residuos de comida.

Tiempo (Días)	CH ₄ (% Vol)	CO ₂ (% Vol)
1	3	2,5
3	8	4
5	9,2	4,9
7	13,8	4,6
9	18	5,8
11	25,7	5,3
13	28	5,6
15	33,8	5
17	37	6
19	41	6,5
21	47	7,1
23	53	6,8
25	58	5,4
27	66	6,1
30	75	6,8

Fuente: Elaboración propia.

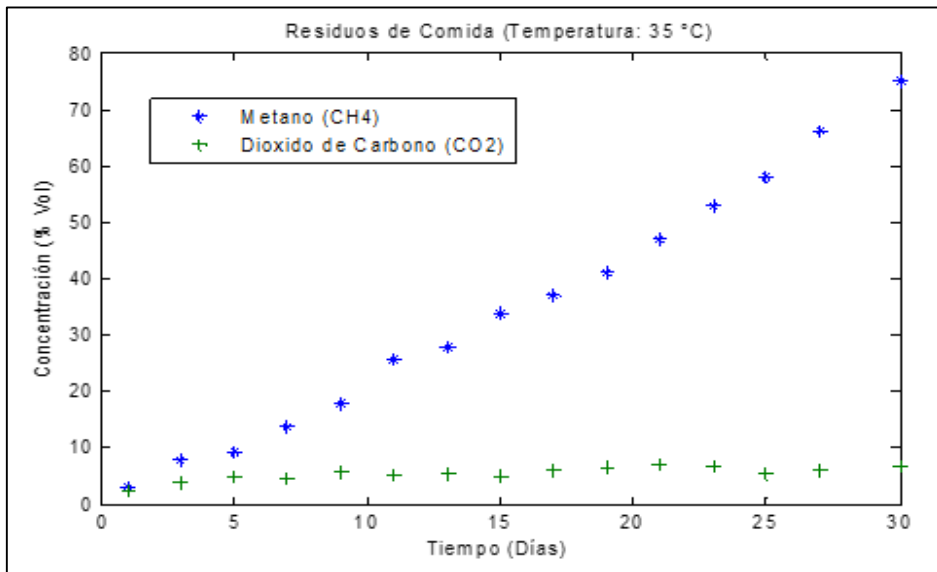


Figura 63. Generación de biogás con residuos de comida (35 °C).

Fuente: Elaboración propia.

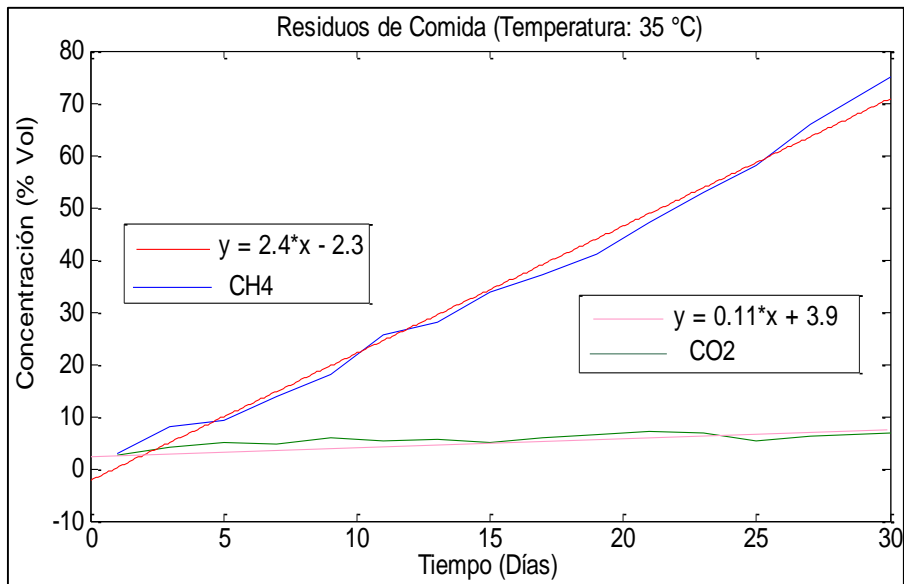


Figura 64. Aproximaciones lineales de las Concentraciones de CH₄ y CO₂ del biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21.

Presión generada del biogás con residuos de comida.

Tiempo (Días)	Presión (psi)
1	8,5
3	18
5	24
7	25,5
9	28
11	30
13	32,5
15	35
17	38
19	42,5
21	45
23	46,5
25	47
27	48
30	48

Fuente: Elaboración propia.

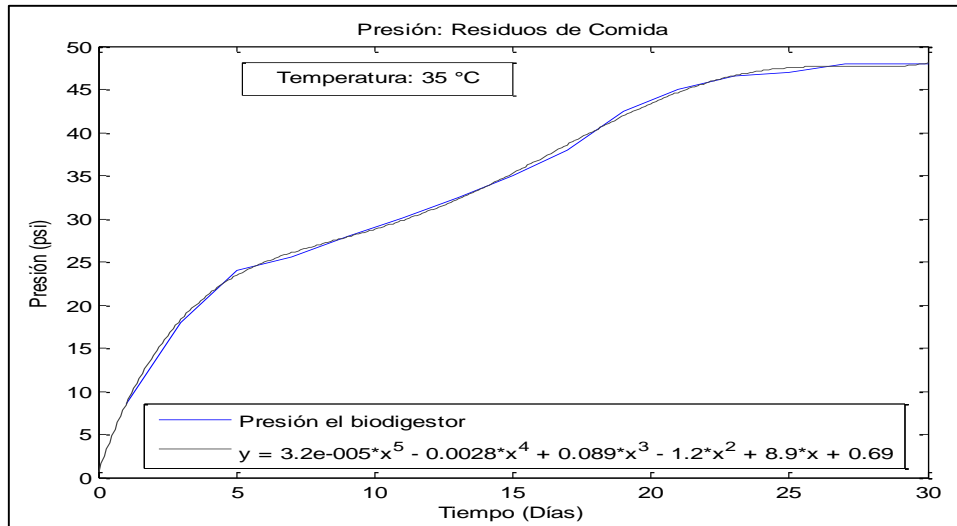


Figura 65. Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de comida.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen del biogás generado por los residuos de comida que se obtuvo con un control difuso de temperatura a 35 °C es de 0,029 m³.



Figura 66. Biogás almacenado de residuos de comida.

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo se preparó un sustrato con la mezcla de residuos de fruta, vegetales y comida en las proporciones que se indican en la tabla 22.

Tabla 22.

Composición de materia orgánica de residuos de fruta, vegetales y comida.

Componente	Fracción de Residuos Sólidos Urbanos (%)
Restos de fruta	33
Restos de vegetales	33
Restos de comida	34

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 23, se muestra los volúmenes respectivos de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) que se obtuvieron con el sustrato compuesto con los residuos de fruta, vegetales y comida, agua y estiércol de ganado vacuno.

Tabla 23.

Componentes del biogás generado con residuos de fruta, vegetales y comida.

Tiempo (Días)	CH ₄ (% Vol)	CO ₂ (% Vol)
1	2,8	2,7
3	8,2	4
5	9	4,8
7	13	4,6
9	17,8	5,8
11	25	5,3
13	27,8	5,6
15	33,4	5,2
17	36,8	6
19	40,5	6,5
21	46,8	7
23	52	6,8
25	57	5,4
27	65	6,2
30	73	6,5

Fuente: Elaboración propia.

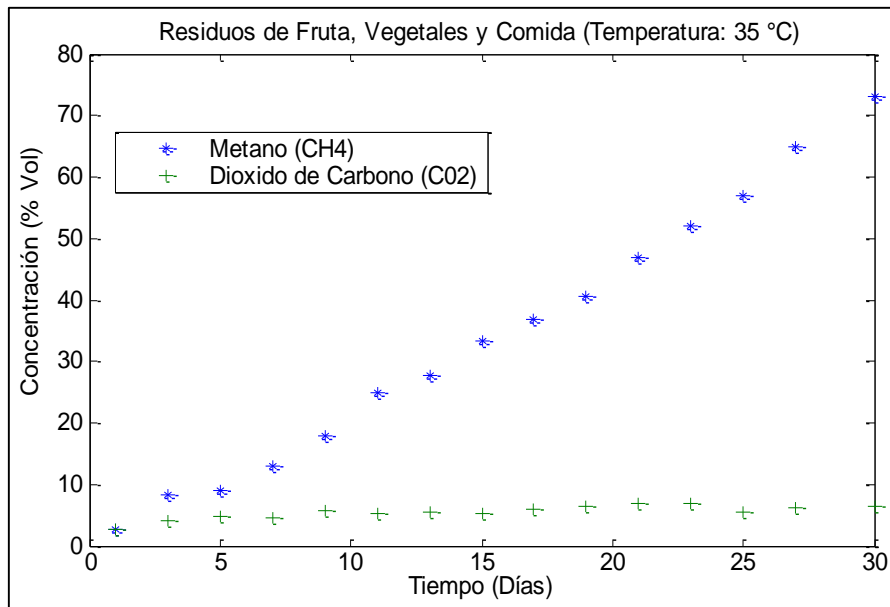


Figura 67. Generación de biogás con residuos de fruta, vegetales y comida (35 °C).

Fuente: Elaboración propia.

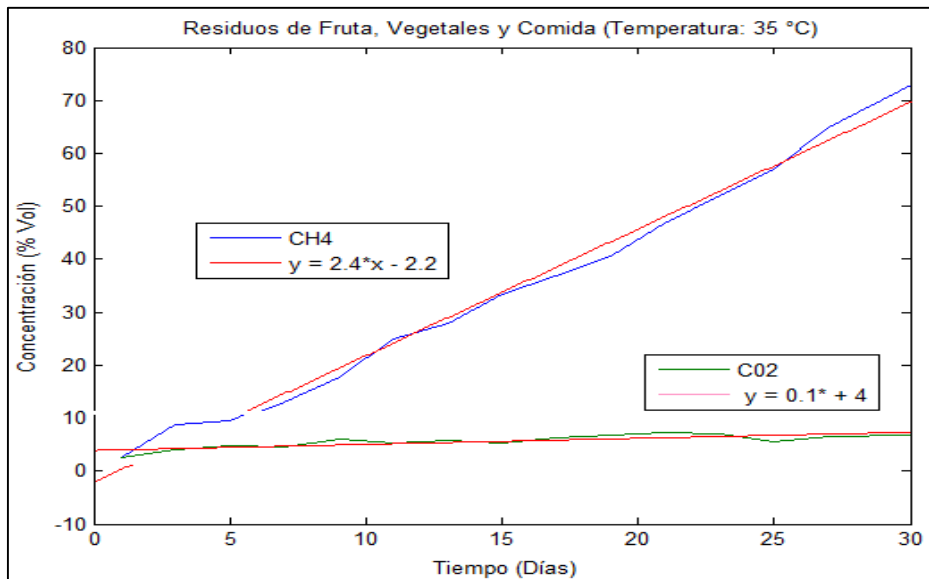


Figura 68. Aproximaciones lineales de las Concentraciones de CH₄ y CO₂ del biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24.

Presión generada del biogás con residuos de fruta, vegetales y comida.

Tiempo (Días)	Presión (psi)
1	8
3	15,5
5	24
7	24,5
9	28
11	30
13	32
15	35,4
17	38,3
19	42
21	45,2
23	46,3
25	46
27	46,8
30	46,9

Fuente: Elaboración propia.

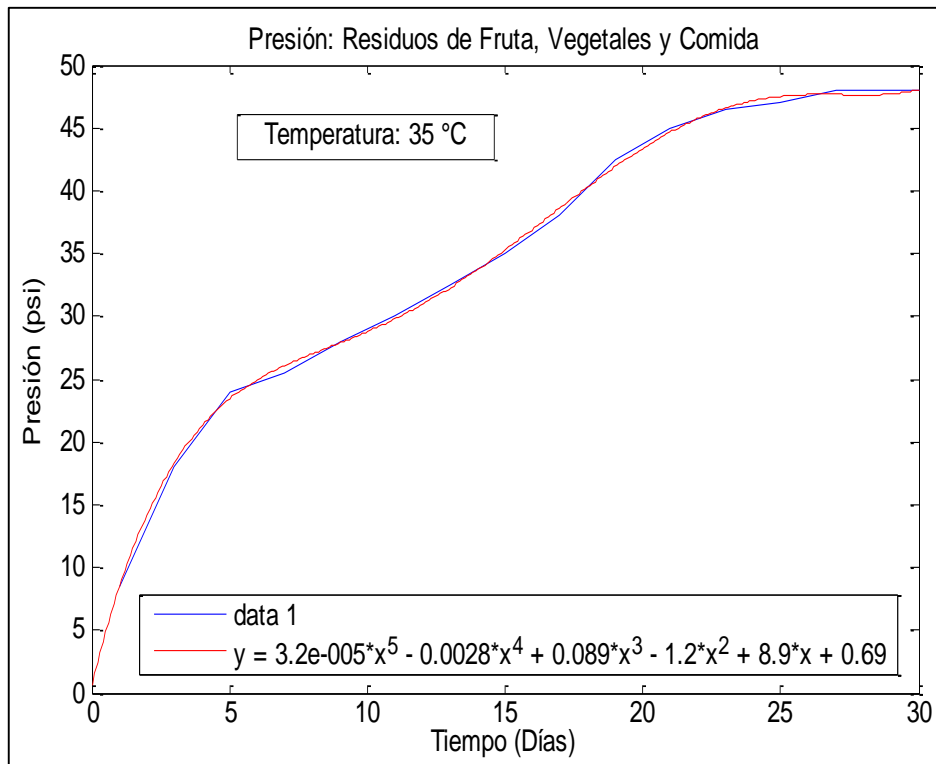


Figura 69. Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de fruta vegetales y comida.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen del biogás generado por los residuos de fruta, vegetales y comida que se obtuvo con un control difuso de temperatura a 35 °C es de 0,0285 m³.

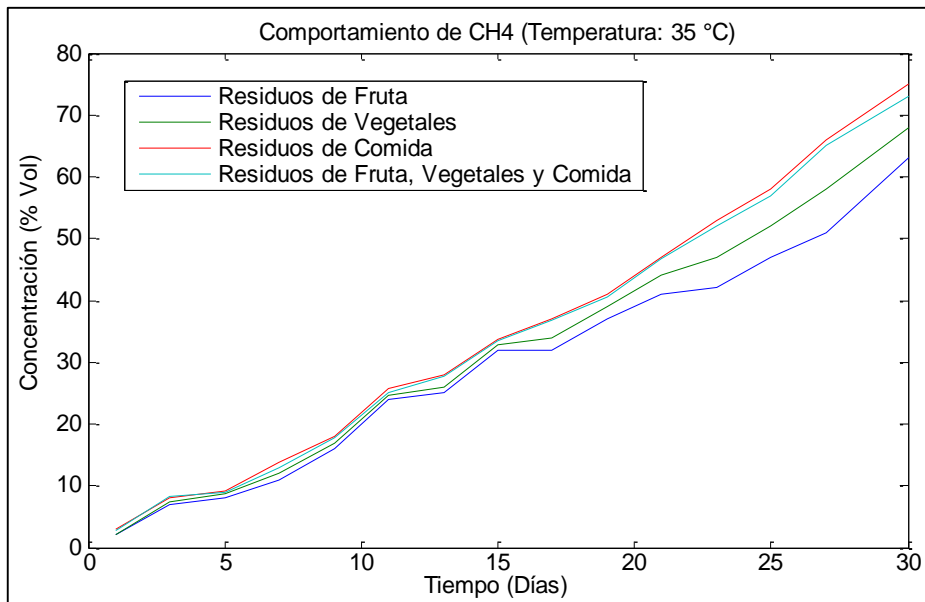


Figura 70. Generación de biogás a temperatura de 35 °C, con diferentes tipos de residuos.

Fuente: Elaboración propia.

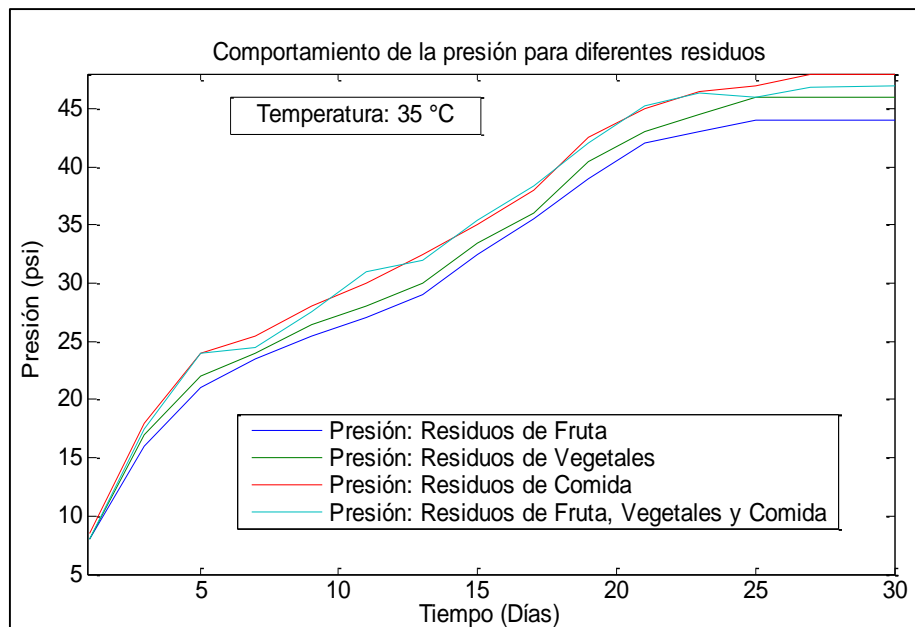


Figura 71. Variación de la presión respecto al tiempo, con diferentes tipos de residuos.

Fuente: Elaboración propia.

Tratamiento anaeróbico convencional para generar biogás en un biodigestor a temperatura ambiente.

El tratamiento anaeróbico convencional de un biodigestor expuesto a temperatura ambiente para generar biogás, consiste en un reactor de mezcla completa sin recirculación de agua. Esto significa que el biodigestor posee un sistema de agitación que tiene como fin mantener los sólidos en suspensión y el sustrato homogéneo para evitar la sedimentación de los sólidos y promover una distribución homogénea de los mismos en la fase acuosa. En estos reactores el tiempo de retención de sólidos (SRT) es igual al tiempo de residencia hidráulico (HRT) (ver figura 72).

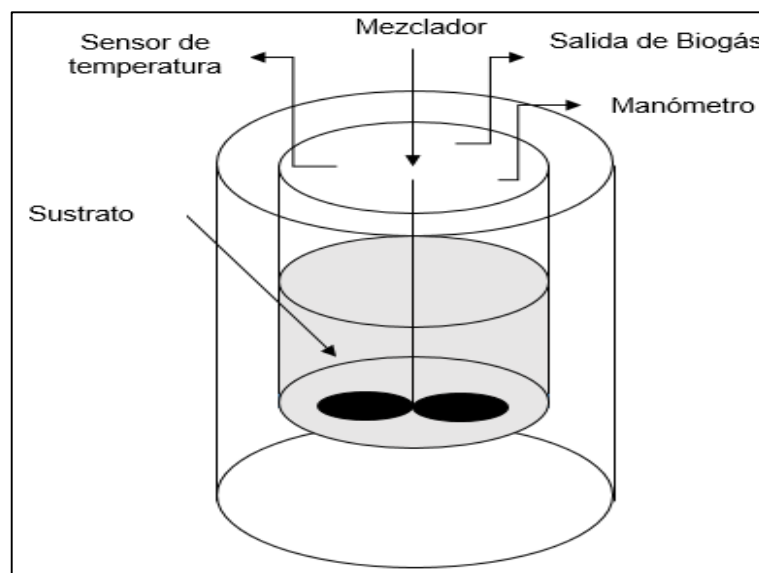


Figura 72. Tratamiento convencional para generar biogás en un biodigestor a temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Las proporciones utilizadas para la preparación del sustrato, compuesto por residuos de comida en el biodigestor a temperatura ambiente, se muestra en la tabla 25.

Tabla 25.

Composición de la materia orgánica de residuos de comida.

Componente	Fracción de Residuos Sólidos Urbanos (%)
Residuos de arroz, frejoles, alverjas	25
Residuos de papas, verduras	25
Residuos de pescados y mariscos	25
Residuos de pollo, carne, huevos.	25

Fuente: Elaboración propia.

Para el biodigestor en condiciones de invernadero, se registró la temperatura en el horario de 10:00 a 11:00 horas en el periodo de un mes, del 10 de abril del 2015 al 10 de mayo del 2015, censadas por el censor de temperatura LM335 dentro del biodigestor, que se registra en la pantalla LCD, a una temperatura ambiente (ver figura 73).

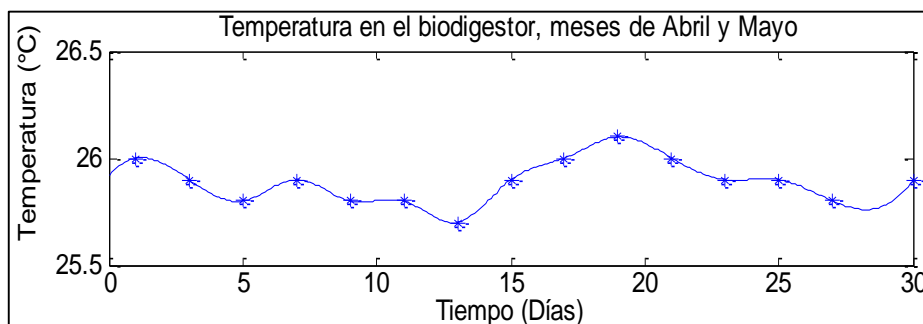


Figura 73. Variaciones de temperatura en el biodigestor durante los meses de abril, mayo (2015).

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 26, se muestra los porcentajes de volúmenes respectivos de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) que se obtuvieron del biodigestor con el sustrato compuesto con los residuos de comida, agua y estiércol de ganado vacuno a temperatura ambiente.

Tabla 26.

Componentes del biogás generado con residuos de comida a temperatura ambiente.

Tiempo (Días)	CH ₄ (% Vol)	CO ₂ (% Vol)
1	1	2
3	3	4
5	5	3,5
7	6	4
9	9	3,8
11	10	4
13	12	4,5
15	13	5
17	15	4,4
19	16	4,2
21	18	4
23	19	4,9
25	20	4,7
27	22	4,2
30	24	4

Fuente: Elaboración propia.

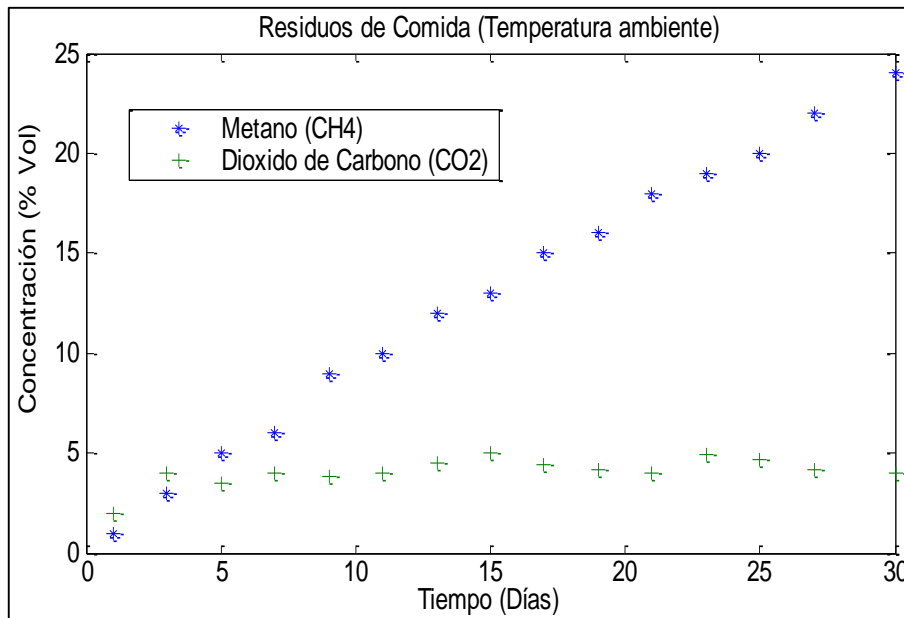


Figura 74. Generación de biogás con residuos de comida a temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

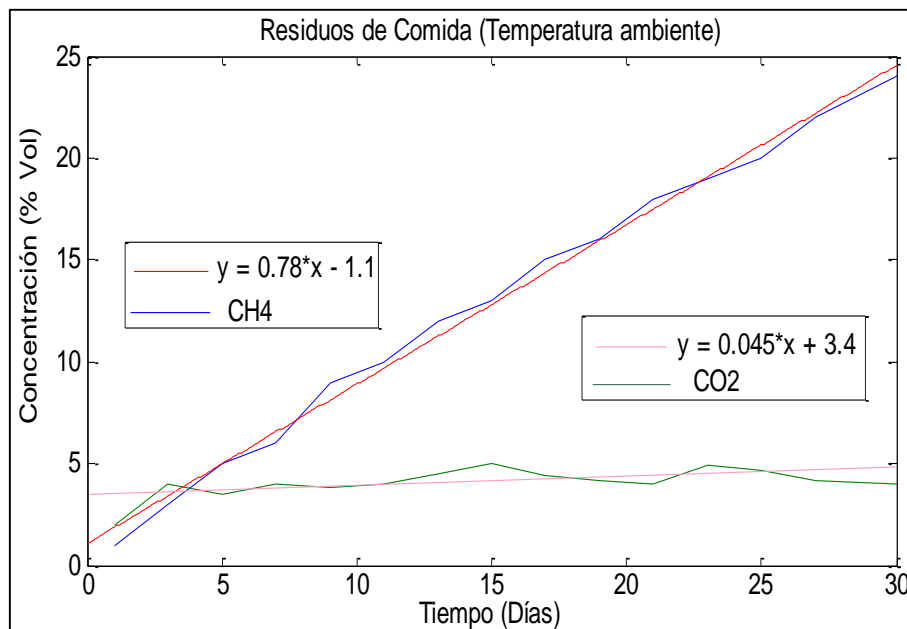


Figura 75. Aproximaciones lineales de las concentraciones de CH₄ y CO₂ del biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27.

Presión generada del biogás con residuos de comida a temperatura ambiente.

Tiempo (Días)	Presión (psi)
1	6
3	9
5	10
7	11
9	11,5
11	12,5
13	13
15	14
17	15,5
19	16,5
21	18
23	19
25	19,5
27	21,5
30	22

Fuente: Elaboración propia.

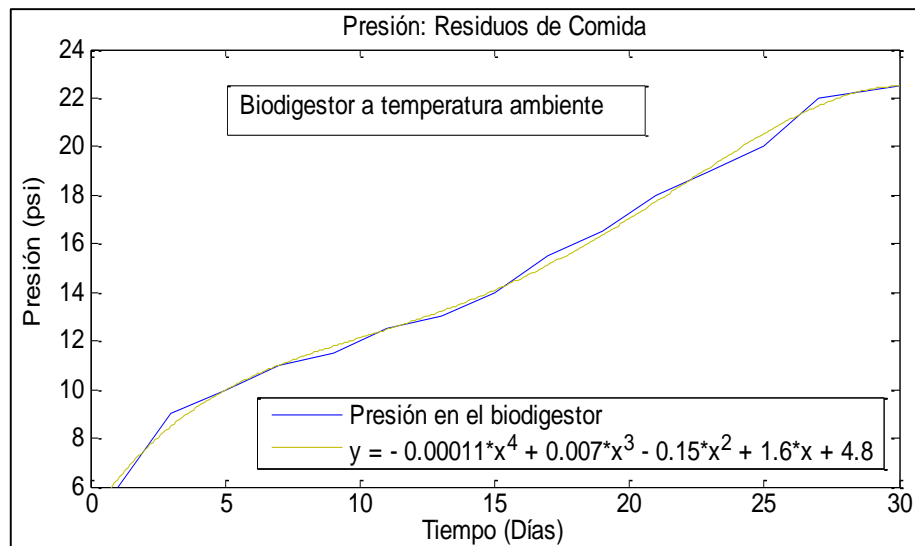


Figura 76. Variación de la presión respecto al tiempo de residuos de comida a temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 77, se muestra el comportamiento del CH₄ generado con residuos de fruta, vegetales, comida y una combinación de ellos con un control difuso de temperatura de 35 °C, y el comportamiento del CH₄ con residuos de comida a una temperatura ambiente en el biodigestor anaeróbico.

En la figura 78, se muestra el comportamiento de la presión (psi) generado por el biogás que se obtiene con los residuos de fruta, vegetales, comida y una combinación de ellos con un control difuso de temperatura de 35 °C, y la presión del biogás que se obtiene con los residuos de comida.

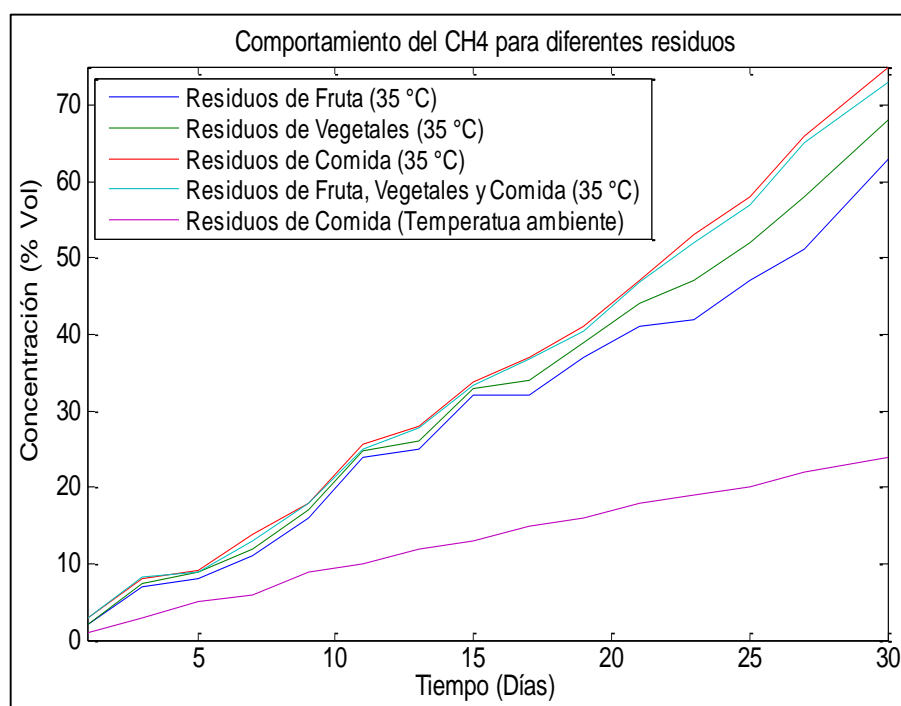


Figura 77. Efectos de la temperatura en la calidad del biogás (CH₄), a 35 °C y a temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

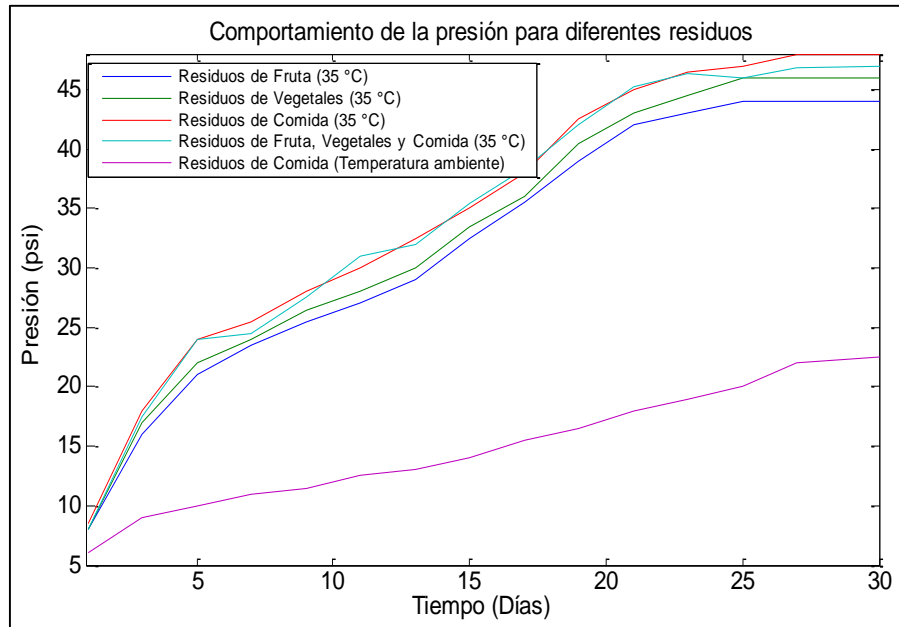


Figura 78. Variación de la presión respecto al tiempo con residuos de frutas, vegetales y comida (35 °C y temperatura ambiente).

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados

El sistema de control difuso basado en microcontrolador para la regulación de la temperatura en el digestor anaeróbico resultó apropiado para los propósitos requeridos en el experimento de digestión anaeróbica, puesto que siempre mantuvo la temperatura en el punto de operación establecido, con un error en estado estacionario de 0 % y con un tiempo de estabilización de 20 minutos.

El punto de operación fue de 35 °C, el sistema de control no registró sobreamortiguación en la señal de temperatura, en el cual se analizó el efecto de la temperatura en el rango mesofílico en los niveles de concentración de estos gases (CH₄ y CO₂) en el biogás generado.

Inicialmente se registró una actividad en la producción en promedio de Metano del 4,7 % Vol y de 2,5 % Vol en la concentración del Dióxido de carbono con un control difuso de temperatura de 35 °C.

Se puede observar una tendencia de incremento de 1,682 % Vol/día en la Concentración del gas Metano, tal como se muestra en la Figura 77.

5.1. Análisis estadístico (Software InfoStat)

Los objetivos del análisis estadístico fueron:

- Determinar con cual sustrato se obtiene un mayor rendimiento en función de su contenido, y con cuál se generó más biogás (cantidad de CH₄), utilizando el mismo sistema de digestión anaeróbica con un control difuso de temperatura de 35 °C y a temperatura ambiente.
- Determinar con cual sustrato se genera una mayor presión (psi) en función de su contenido utilizando el mismo sistema de digestión anaeróbica con un control difuso de temperatura de 35 °C y a temperatura ambiente.

Para ambos objetivos, se realizó el análisis descriptivo de los datos y el análisis inductivo, para inferir a partir de la muestra presentada resultados aplicables a la población en estudio. En particular, se buscó identificar si existen diferencias en la cantidad de biogás (CH₄) generado a partir de diferentes sustratos, y mezclándolos con un control difuso de temperatura de 35 °C y a temperatura ambiente dentro del biodigestor.

Para el procesamiento de los datos se usó el software estadístico *InfoStat*. Consideramos que es uno de los que más amplia utilización tiene en diversas áreas, en particular en ciencias experimentales e ingenierías.

Tabla 28.

Resultados estadísticos para el biogás (CH₄) generado con residuos de fruta.

Resultados						
Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
CH ₄ (% Vol)	15	0,99	0,99	6,94	69,91	72,04
Coeficiente de regresión y estadísticos asociados						
Coeficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95%)	T	p-valor
Constante	-0,57	1,12	-3,00	1,86	-0,5	0,6237
Tiempo (Días)	1,98	0,06	1,84	2,12	30,60	<0,0001

Fuente: Software infoStat.

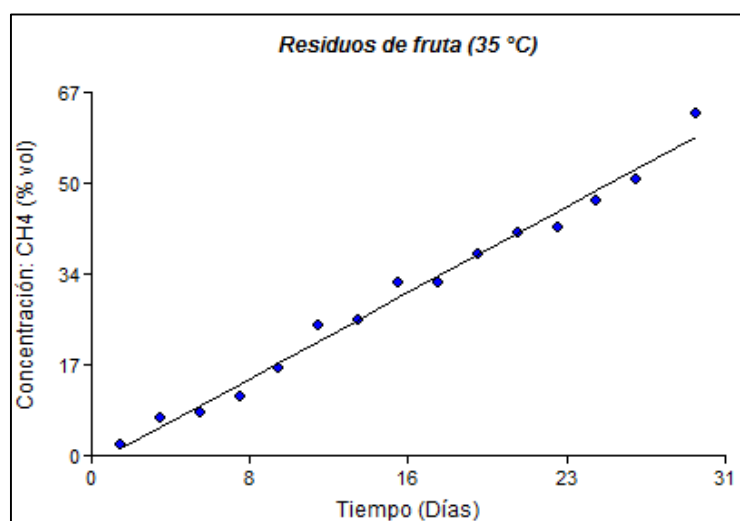


Figura 79. Relación entre tiempo y el biogás (CH₄) en el biodigestor para residuos de fruta

Fuente: Elaboración propia.

Existe una relación positiva alta entre la generación de biogás (CH₄) con los residuos de fruta en un biodigestor en relación con el tiempo transcurrido con un sistema de control difuso de temperatura a 35 °C, tiene un comportamiento lineal ($R^2 = 0,99$; $y = 1,98x - 0,57$) esto significa que a mayor tiempo transcurrido hay mayor generación de biogás en un tiempo determinado (30 días).

Tabla 29.

Resultados estadísticos para el biogás (CH₄) generado con residuos de vegetales.

Resultados						
Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
CH ₄ (% Vol)	15	0,99	0,99	5,02	64,70	66,82
Coeficiente de regresión y estadísticos asociados						
Coeficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95%)	T	p-valor
Constante	-1,47	0,95	-3,51	0,58	-1,55	0,1450
Tiempo (Días)	2,19	0,05	2,07	2,31	40,34	<0,0001

Fuente: Software infoStat.

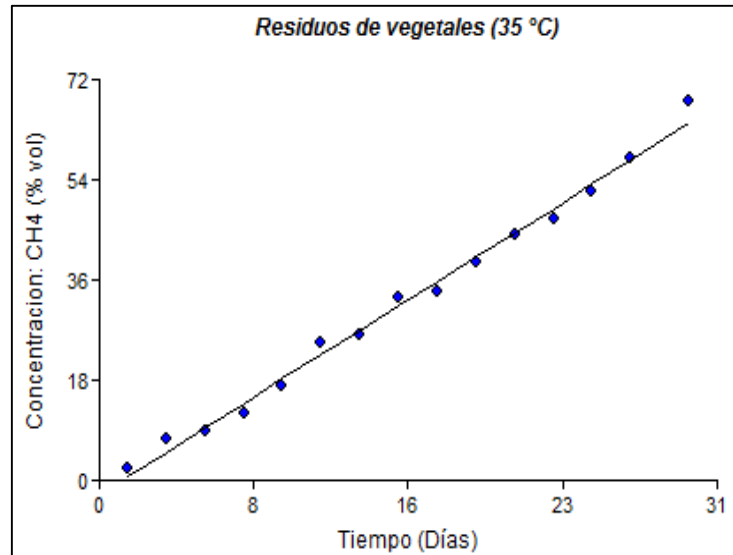


Figura 80. Relación entre tiempo y el biogás (CH₄) en el biodigestor para residuos de vegetales.

Fuente: Elaboración propia.

Existe una relación positiva alta entre la generación de biogás (CH₄) con los residuos de vegetales en un biodigestor en relación con el tiempo transcurrido con un sistema de control difuso de temperatura a 35 °C, tiene un comportamiento lineal ($R^2 = 0,99$; $y = 2,19x - 1,47$) esto significa que a mayor tiempo transcurrido hay mayor generación de biogás en un tiempo determinado (30 días).

Tabla 30.

Resultados estadísticos para el biogás (CH₄) generado con residuos de comida.

Resultados						
Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
CH ₄ (% Vol)	15	0,99	0,99	7,70	70,92	73,04
Coeficiente de regresión y estadísticos asociados						
Coeficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95%)	T	p-valor
Constante	-2,28	1,16	-4,79	0,24	-1,96	0,0722
Tiempo (Días)	2,44	0,07	2,29	2,58	36,50	<0,0001

Fuente: Software infoStat.

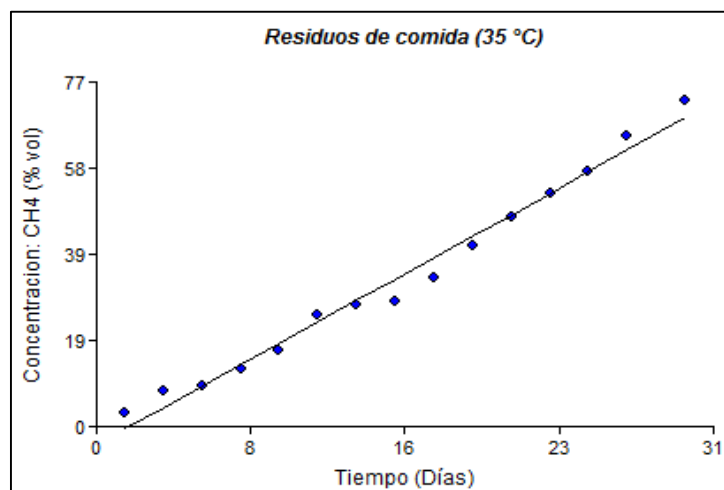


Figura 81. Relación entre tiempo y el biogás (CH₄) en el biodigestor para residuos de comida.

Fuente: Elaboración propia.

Existe una relación positiva entre la generación de biogás (CH₄) con los residuos de comida en un biodigestor en relación con el tiempo transcurrido con un sistema de control difuso de temperatura a 35 °C, tiene un comportamiento lineal, ($R^2 = 0,99$; $y = 2,44x - 2,28$) esto significa que a mayor tiempo transcurrido hay mayor generación de biogás en un tiempo determinado (30 días).

Tabla 31.

Resultados estadísticos para el biogás (CH₄) generado con residuos de fruta, vegetales y comida.

Resultados						
Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
CH ₄ (% Vol)	15	0,99	0,99	6,46	68,35	70,47
Coeficiente de regresión y estadísticos asociados						
Coeficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95%)	T	p-valor
Constante	-2,18	1,07	-4,49	0,12	-2,04	0,1617
Tiempo (Días)	2,39	0,06	2,26	2,53	39,05	<0,0001

Fuente: Software infoStat.

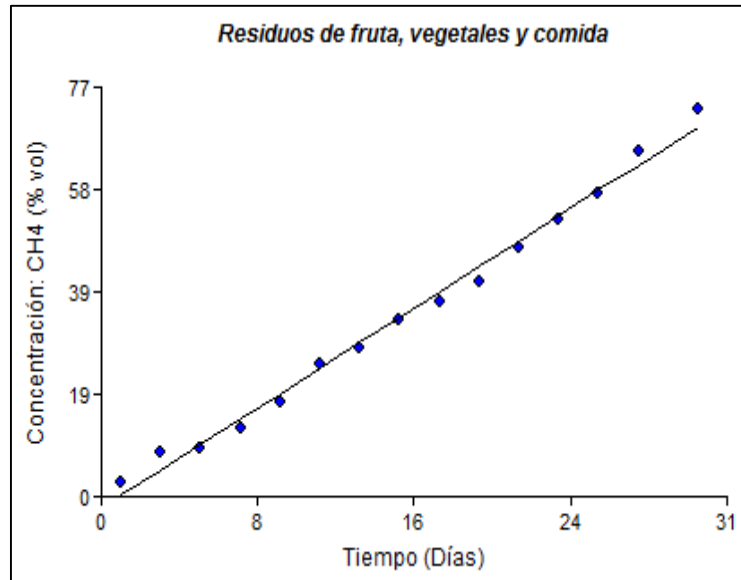


Figura 82. Relación entre tiempo y el biogás (CH₄) en el biodigestor para residuos de fruta, vegetales y comida.

Fuente: Elaboración propia.

Existe una relación positiva entre la generación de biogás (CH₄) con los residuos de fruta, vegetales y comida en un biodigestor en relación con el tiempo transcurrido con un sistema de control difuso de temperatura a 35 °C, tiene un comportamiento lineal, ($R^2 = 0,99$; $y = 2,39x - 2,18$) esto significa que a mayor tiempo transcurrido hay mayor generación de biogás en un tiempo determinado (30 días).

Tabla 32.

Resultados estadísticos para el biogás (CH₄) generado con los residuos de comida a temperatura ambiente.

Resultados						
Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
CH ₄ (% Vol)	15	0,99	0,99	0,44	29,07	31,20
Coeficiente de regresión y estadísticos asociados						
Coeficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95%)	T	p-valor
Constante	1,08	0,29	0,45	1,70	3,73	0,0025
Tiempo (Días)	0,78	0,02	0,75	0,82	47,30	<0,0001

Fuente: Software infoStat.

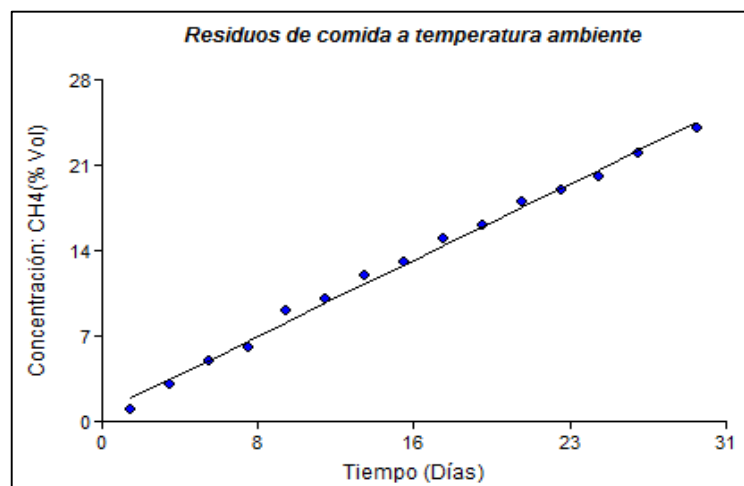


Figura 83. Relación entre tiempo y el biogás (CH₄) en el biodigestor a temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Existe una relación positiva entre la generación de biogás (CH₄) con los residuos de comida en un biodigestor expuesto a temperatura ambiente en relación con el tiempo transcurrido, tiene un comportamiento lineal, ($R^2 = 0,99$; $y = 0,78x + 1,08$); significa que a mayor tiempo transcurrido hay mayor generación de biogás en un tiempo determinado (30 días).

La generación de biogás en el biodigestor con residuos de Frutas, Vegetales y Comida con un control difuso de temperatura de 35 °C presenta diferencias significativas respecto a la generación de biogás con residuos de comida a temperatura ambiente. En la generación de biogás a 35 °C de temperatura, el mayor promedio es obtenido con los residuos de comida según las prueba de contraste que se muestra en la figura 83.

Esto se puede verificar con las respectivas ecuaciones lineales, dado el tiempo de 20 días, la cantidad de biogás (CH₄) que se obtiene es la siguiente:

Para residuos de Frutas: $CH_4(x) = ax + b = 1,98x - 0,57 \rightarrow CH_4(20) = 1,98(20) - 0,57 = 39,03 \text{ \% Vol.}$

Para residuos de Vegetales: $CH_4(x) = ax + b = 2,19x - 1,47 \rightarrow CH_4(20) = 2,19(20) - 1,47 = 42,33 \text{ \% Vol.}$

Para residuos de Comida: $CH_4(x) = ax + b = 2,44x - 2,28 \rightarrow CH_4(20) = 2,44(20) - 2,28 = 46,52 \text{ \% Vol.}$

Para la mezcla de residuos de fruta, vegetales y comida: $CH_4(x) = ax + b = 2,39x - 2,18 \rightarrow CH_4(20) = 2,39(20) - 2,18 = 45,62 \% \text{ Vol.}$

A temperatura ambiente (residuos de comida): $CH_4(x) = ax + b = 0,78x + 1,08 \rightarrow CH_4(20) = 0,78(20) + 1,08 = 16,68 \% \text{ Vol.}$

La generación de biogás con residuos de Frutas, Vegetales y Comida presenta diferencias, La generación de biogás de mayor promedio es obtenido por los residuos de comida según las prueba de contraste que se muestra en la figura 84.

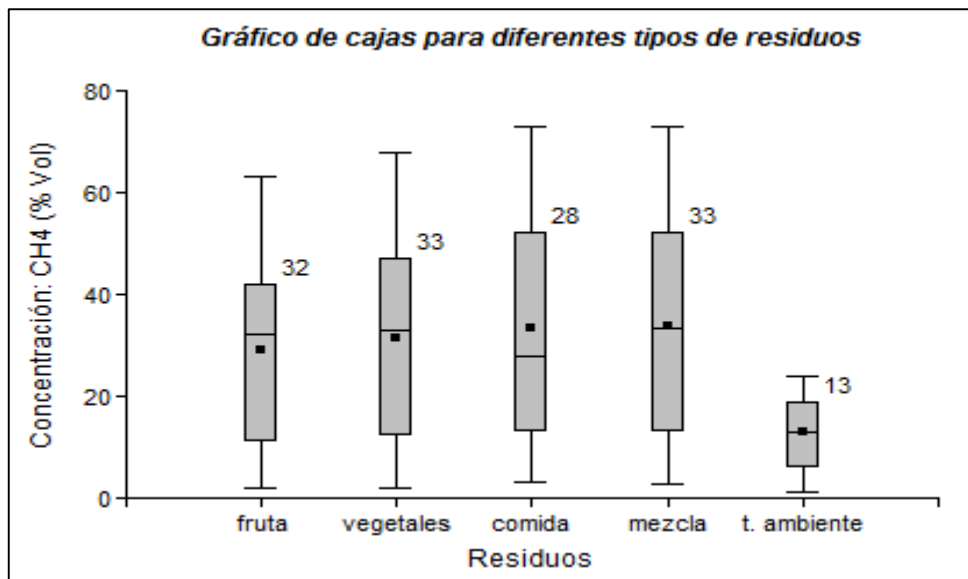


Figura 84. Gráfico de cajas para los residuos de frutas, vegetales y comida (35 °C) y de comida (temperatura ambiente) en un biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada: con un control difuso de temperatura de 35 °C a mayor tiempo transcurrido es mayor la generación de biogás, en un tiempo determinado (30 días).

Esto concuerda con los resultados obtenidos en el artículo “El sector de biogás agroindustrial en España” (Mesa de biogás, 2010), donde se afirma que uno de los residuos que produce más metros cúbicos de biogás por cada kilogramo de sólidos volátiles son los restos de alimentos con una producción de 0,5 a 0,6 m³/Kg de sólidos volátiles (ver tabla 33).

Tabla 33.

Resumen de las características más significativas de los sustratos agroindustriales más habituales.

Residuo	ST(%)	SV(%ST)	C:N	Producción de biogás (m ³ /Kg de SV)	Tiempo de retención (días)	CH ₄ (%)
Purín de cerdo	3 a 8	70 a 80	3 a 10	0,25 a 0,50	70 a 80	70 a 80
Estiércol	5 a 12	75 a 85	6 a 20	0,20 a 0,30	55 a 75	55 a 75
Gallinaza	20 a 30	7 a 80	6 a 20	0,35 a 0,60	60 a 80	60 a 80
Residuos de fruta	10 a 20	75	35	0,25 a 0,50	8 a 20	50 a 70
Restos de alimentos	10	80	4 a 10	0,50 a 0,60	10 a 20	70 a 80
Vinazas	1 a 5	80 a 95	8 a 12	0,35 a 0,55	3 a 10	55 a 75
paja	70	90	90	0,35 a 0,45	10 a 50**	55 a 65

Fuente: Adaptación de Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. (1998). Feddstocks for Anaerobic Digestion.

Variable biogás calculado en función de % Vol CH₄. Diagrama de caja

En la figura 82, se representa los diagramas de caja de cada sustrato, así tenemos que en la caja que representa al sustrato residuos de fruta, la mediana (32,00) representada por la línea que divide a la caja, no se encuentra en el centro (media 29,20) por lo cual se deduce que la

distribución es asimétrica. Los extremos de los bigotes nos indican el valor mínimo de la variable (2 % Vol CH₄) y el valor máximo (63 % Vol CH₄).

Tabla 34.

Medidas de resumen estadístico para el biogás (CH₄) generado con diferentes tipos de residuos según la prueba de contraste.

Medidas de resumen							
Residuos	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Mediana
Comida	CH ₄ (% Vol)	15	33,18	21,85	3,00	73,00	27,80
Fruta	CH ₄ (% Vol)	15	29,20	18,02	2,00	63,00	32,00
Vegetales	CH ₄ (% Vol)	15	31,51	19,91	2,00	68,00	32,80
Mezcla	CH ₄ (% Vol)	15	33,87	21,77	2,80	73,00	33,40
t. ambiente	CH ₄ (% Vol)	15	12,87	7,11	1,00	24,00	32,80

Fuente: Software infoStat.

En la tabla 35 Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) que tuvo por objeto comparar varios grupos de una variable cuantitativa. La variable independiente que define los grupos que se desea comparar son los diferentes sustratos utilizados para alimentar al biodigestor anaerobio tipo batch.

Se planteó la hipótesis nula: “No existen diferencias significativas entre las medias (promedios) para los sustratos comparados y para la variable biogás (% Vol CH₄)”. El criterio de decisión estableció que si el valor crítico significativo es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis.

En la tabla 35, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de varianza (ANOVA), se calcula la variabilidad de los datos dentro del sistema, el resultado se observa después de aplicar los grados (4) de libertad y obtener los cuadrados medios. El p-valor es 0,0153, entonces se rechaza la hipótesis nula. Por tanto se concluye que el supuesto de que las medias son iguales no es razonable. Por consiguiente se concluye que existen diferencias significativas en la generación de biogás entre los sustratos: residuos de fruta, vegetales, comida, mezcla (35 °C) y residuos de comida (temperatura ambiente), por tal motivo se rechaza la hipótesis.

Tabla 35.

ANOVA aplicado a la comparación de los sustratos.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CH4 (% Vol)	75	0,16	0,11	66,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p - valor
Modelo	4560,74	4	1140,19	3,31	0,0153
Residuos	4560,74	4	1140,19	3,31	0,0153
Error	24120,76	70	344,58		
Total	28681,51	74			

Fuente: Software infoStat.

En un tiempo de 30 días de evaluación con un control difuso de temperatura de 35 °C bajo condiciones de un invernadero, el biodigestor con los residuos de frutas, vegetales y comida tuvieron diferentes comportamientos en cuanto a la generación de biogás (CH₄), obteniéndose mayor generación con los residuos de comida.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

- La concentración de CH₄ resultado de la digestión anaeróbica de los residuos orgánicos utilizados se encuentra dentro del rango óptimo de producción [50 – 70] % (IDAE, 2007). Esto se atribuye a que no hay fluctuaciones de temperatura en el biodigestor (Lindofer, 2008).
- Se obtuvo más concentración de CH₄ con los residuos de comida (Mesa de biogás, 2010).
- El método de cuantificación de metano y dióxido de carbono se valida, se llegó a esta conclusión tras análisis estadísticos mediante la utilización de intervalos de confianza. La media aritmética obtenida por Orellana (2012), se encuentra dentro del intervalo de confianza, lo que indica que los datos obtenidos mediante esta metodología son consistentes y por lo tanto, el método utilizado es válido.
- El programa de control *Fuzzy*, generado con el código fuente en lenguaje C y ejecutado por el PIC 18F4550 permitió mantener el control de la temperatura fijada (Barragán, 2005).

CONCLUSIONES

Primera: El proceso de diseño e implementación de un sistema de control con la utilización de herramientas fuzzy ha permitido controlar la temperatura fijada en el biodigestor, garantizando un óptimo proceso de digestión anaerobia de los residuos orgánicos para la generación de biogás. Los resultados muestran que con un control difuso de la temperatura la generación de biogás contiene una concentración volumétrica de metano (75 % Vol), tres veces más que lo generado en el biodigestor a temperatura ambiente (24 % Vol).

La aplicación de un controlador difuso permitió determinar que, la calidad del biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica a partir de una fracción de residuos sólidos orgánicos fue bueno, considerando que una concentración de 77 % Vol de gas Metano es una concentración que para 1m³ de biogás puede llegar a contener una capacidad calorífica equivalente a la proporcionada por 0,8 L de gasolina. Dentro parámetros que se consideraron importantes durante el proceso de digestión anaeróbica dentro del biodigestor para la obtención de este resultado es principalmente la variable temperatura, la cual gracias al sistema de control difuso implementado se mantuvo en el valor establecido.

Segunda: El diseño e implementación del controlador difuso basado en un microcontrolador PIC18F4550 de la familia microchip muestra una gran capacidad en la velocidad de respuesta, así como un bajo porcentaje de utilización de los recursos de memoria ROM para almacenamiento de programa (50%) y memoria RAM para datos (20%).

Se demostró la eficiencia y viabilidad de implementar sistemas embebidos a partir de este tipo de dispositivos programables para la obtención de controladores en tiempo real, que mejora el desempeño del sistema controlado y disminuye los costos de implementación del sistema de control. En base a los resultados de las pruebas realizadas, se puede concluir que el sistema implementado tiene operatividad y funcionalidad requerida inicialmente.

Tercera: Se comprobó que la temperatura en el proceso de biodigestión es el parámetro más importante a considerar al momento del diseño de un biodigestor, también se comprobó que la actividad bacteriana tuvo un buen desarrollo con el control difuso de la temperatura, 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 (Aguilar, 2013).

RECOMENDACIONES

Primera: Se debe implementar un esquema de biodegradación del cual, además del tratamiento y estabilización de una amplia gama de residuos, se pueden obtener valiosos insumos para otros sectores industriales, adicionalmente, el *compost* obtenido puede desempeñar un papel importante en el sector agrícola en calidad de un abono de bajo costo, y el biogás producido puede contribuir a disminuir los costos energéticos del proceso integral de biodegradación.

Segunda: El control difuso ofrece nuevas posibilidades de trabajo en el campo de la automatización, este permite utilizar eficientemente recursos tecnológicos actuales como los microcontroladores y los programas de modelación y simulación de sistemas difusos, por lo tanto permite desarrollar aplicaciones que cubran requerimientos puntuales con especificaciones bien definidas.

Los controladores basados en lógica difusa presentan una gran robustez al momento de controlar alguna variable en un proceso, sin embargo sería factible desarrollar un control más sofisticado en el cual pueda intervenir la lógica difusa en combinación con otro tipo de controles como por ejemplo un FuzzyPID.

Tercera: Debido al volumen de generación de la materia orgánica, es necesario fomentar la separación de residuos orgánicos desde los hogares, con el fin de enviarlos a un centro de compostaje, para que de alguna manera se pueda reducir el volumen de los mismos y considerar su valorización energética. Sería conveniente seguir utilizando la metodología establecida en esta investigación, debido a que los datos obtenidos fueron consistentes.

Cuarta: Se debe implementar tecnologías y desarrollar investigación enfocada a asegurar un desarrollo sustentable, parte de esto es el desarrollo de biocombustibles. De manera particular el biogás es una alternativa ecológica viable para ser usado como combustible, ya que la materia prima para su producción son los residuos orgánicos, lo que ayudará a la resolución de la disposición de residuos, contaminación y generación de energía limpia.

Es necesario el desarrollo de la infraestructura básica, que permita generar el cambio de patrón de botaderos y vertederos de residuos sólidos en rellenos sanitarios, para que se pueda recuperar el biogás para su posterior aprovechamiento como recurso energético y posible candidato de presentarse como proyecto mecanismo de desarrollo limpio, bajo el marco que brinda el Protocolo de Kyoto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar,A. (2013). *Control de temperatura y pH en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala.* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Alonso & Rodríguez (1985). *Los Microorganismos Dentro de los Procesos de Digestión.* Universidad de Chile, Valdivia-Chile.
- Barrena, M., Gamarra, O. & Maicelo, J. (2010). *Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento.* *Revista Aporte Santiaguino*, N° 1, pp. 86 – 92.
- Bermúdez C. & Díaz M. (2010). *“Instrumentation of an animal manure biodigestor to analyze its dynamic behavior”*
- Brown (1987). *Biogás systems in development.* *Appropriate Technology* 14(3): 5 -7.
- Buenrostro O., Silke g., Bernache G. & Bocco G. (2000). *La digestión anaeróbica como alternativa de tratamiento 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.
- Cabello A. (2006). *Energías alternativas: Solución para el desarrollo sustentable.*

Cacua, K., Amell, A. & Olmos, L. (2011) *Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno*. Revista Ingeniería e Investigación, N° 1, pp. 233-241.

Carrillo, H. (2003). *Microbiología Agrícola*. Argentina, Unas.

Casillas & Mendieta (2003). *Generación de Gas Metano Mediante Procesos de Digestión*.

Catalán Lafuente J. (1997). *Depuradoras Bases científicas*. Bellisco, Madrid.

Crable, B., Plugge, C., McInerney, M. & Stams, A. (2011). *Formate Formation and Formate Conversion in Biological Fuels Production*. SAGE-Hindawi.

Deffis (1994). *Generación de Gas Metano Mediante Procesos de Digestión*.

Duque, C. & Bravo, J. (2007). *Manual técnico para la construcción y operación de Biodigestores*. Ibarra: PROCANOR.

FAO (1983). *Generación de Gas Metano Mediante Procesos de Digestión*.

Fernández, J. (2007). *Energías renovables para todos – Biomasa*. Madrid: Iberdrola.

Francese, A., Aboagye, M., Olsen, T., Cordoba, P. & Siñeriz, Y. (1999).

- Gallardo, A. & Riofrío, A. (2010). *Factibilidad técnica y económica para el desarrollo de una instalación termoeléctrica de 160 kw mediante la combustión de biogás para la hacienda TARRAGONA*. Ecuador.
- Gerardi, M. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*
- Guenneron, C. (2008). *Dimensionamiento, Diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. s.l.: Aqualimpia Beratende Ingenieure.
- Guevara, V. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.
- Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores*. Lima: CEPIS.
- Hernández A. (2012). *Diseño de un biodigestor instrumentado electrónicamente para la generación de biogás en casa habitación*. (Tesis de Maestría).
- Hernandez, A. (2000). *Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 4ª edición, Madrid, España.

- Hernández, A. (1988). *Depuración de Aguas Residuales*. 3° edición, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Hidalgo, A. (2012). *Valorización de residuos de biomasa en la industria de la construcción*. Energía sostenible para todos.
- Hilbert, J. (2003). *Manual para la producción de biogás*, Buenos Aires, Argentina, Instituto de Ingeniería Rural, I.N.T.A., Castelar.
- Huerta, N. (2010). *Degradación Anaerobia de Residuos de restaurantes de Ciudad Universitaria*. (Tesis de Maestría).
- Hulshoff, L. & Lettinga, G. (1984). *New technologies for Anaerobic Wastewater Treatment*, Water Science and Technology, 18(12), p 41-53.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE (2007). *Biomasa: Digestores Anaerobios*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España. ISBN: 978-84-96680-21-0. Madrid Octubre de 2007.
- Jiménez, B. (2002). *La contaminación ambiental en México*. México: Editorial Limusa.
- Kalyuzhny, S., Sklyar, V., Epov, A., Arkhipchenko, I., Barboulina, I. & Orlova, O. (2003). *Sustainable Treatment and Reuse of Diluted Pig Manure Streams in Russia*. Humana Press.

- Kiely, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. Madrid: McGRAW – HILL, VOL.2
- Komemoto, K. (2009). *Effect of temperatura on VFA´s and biogás producción in anaerobic solubilization of food waste*, published by Elsevier Ltd.
- Lee, Ch. (1990). *Fuzzy Logic Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I and II*, IEEE Trans. on SMC, Vol 20, N° 2, Marzo/Abril 1990.
- Lindorfer, H. (2008). *New data on temperatura optimum and temperatura changes in energy crop digesters*, published by Elsevier Ltd.
- Liriano, R. (2005). *Aplicación de biofertilizantes como alternativa nutricional, ambiental y económica en la agricultura urbana*. (Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Agrícolas). Doctorado de cooperación en “Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible”. Universidad de Girona. España. 157 p.
- Magaña, L., Torres, R., Martínez G., Juárez, C. & Hernández, R. (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.
- Mandal, T. (1990). *Determination of the Quality of Biogas by Flame Temperature Measurement*. Energy Conversion & Management, Elsevier Science Ltda.

- Marchaim, U. (1992). *Biogás processes for sustainable development*, FAO Agricultural Services Bulletin, 95, p. 238.
- Martí, J. (2008). *Biodigestores Familiares*. La Paz: GTZ.
- Martí, N (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Dissertation.com. Boca raton, Florida, U.S.A.
- McInerney, M., Bryant, M. & Stafford, D. (1980). *Metabolic stages and energetic of microbial*. London: s.n., págs., 91-98.
- Medina, L. (1984). *Evaluación técnico-económica del uso de estanques prefabricados de asbestos-cemento; modificados para producir biogás*. (Tesis de grado). Facultad de Agronomía. Macaray, Aragua. Venezuela.
- Moncayo, G. (2008). *Dimensionamiento, Diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. s.l.: Aqualimpia Beratende Ingenieure.
- Orellana, D. (2012). *Análisis de residuos sólidos urbanos del DMQ para cuantificación de carbono, metano como gas de efecto invernadero*. Universidad Internacional SEK, F. de Ciencias Ambientales, Quito.
- Pacheco, A. (2001). *Inteligencia artificial en el control de molienda de minerales*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann – Tacna (Tesis de Maestría).

- Palacios, E., Remiro, F. & López, L. (2008). *Microcontroladores PIC18F4550, Desarrollo de Proyectos*. México: Alfaomega, Rama.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Puentes, S., Charry, P., Andrey, C. & García, E. (2013). *Generación automática de Sistemas Lógicos Difusos tipo Mamdani sobre microcontrolador de 8 bits*. Tecnura.
- Roati, C., Fiore, S., Ruffino, B., Marchese, F., Novarino, D. & Zanetti, M. (2012). American Journal of Environmental Sciences. 8 (3). Torino, Italia, Science Publications. 6 p.
- Roberts, E. (2000). *Water Quality Control Handbook*. Mc. Graw Hill, U.S.A.
- Scriban, L. (1979). *Generación de Gas Metano Mediante Procesos de Digestión*.
- Solari, G. (2004). *Ficha Técnica Biodigestores*. Universidad Alas Peruanas. Lima: s.n.
- Speece, R. (1996). *Anaerobic Biotechnology for industrial Wastewaters*. Archae Press, Vanderbilt University, U.S.A.
- Suquilanda, M. (1996). *Agricultura orgánica: Alternativa tecnológica del futuro* – 1era Edición, Editoriral Fundagro, Quito – Ecuador.

- Taiganides, D. (1980). *Diseño de un Biodigestor para obtener Gas Metano y Fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la facultad de agronomía de la universidad nacional de la pampa*. CLEC EP., Bolivia.
- Taylhardat, L. (1985). *El biogás. Fundamentos e infraestructura rural*. Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. Macaray, Aragua. Venezuela. 68p.
- Taylhardat, L. (1985). *Biodigestores. Su utilización como estructuras alternativas y como fuente alterna de energía*. S.I.: Porciven. Vol. 2.
- Tindall, B., & Trüper, H. (2005). *The Role of the ICSP (International Committee on Systematics of Prokaryotes) in the Nomenclature and Taxonomy of Prokaryotes*. London: ICSP.
- Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile. 119 p.
- Vázquez, D., Fernández, S., Manzote, R. & Abrahantes, H. (1997) Plantas biogás de pequeñas dimensiones para fincas lecheras Agrotecnia de Cuba. Vol. 27 (2-3)pp. 185-190, Biogás; explotaciones agrarias.
- Vindis, P. (2008). *Biogas Production with the use of mini digester*. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*.
- Wanga, S. & Zhonga, J. (2007). *Bioreactor Engineering*. (S.-T. Yang, Ed.) Elsevier.

Weiss, A., Jérôme, V., Freitag, R., & Helmut, M. (2008). *Diversity of the*

Ying, H. (2000). *Fuzzy control and modeling*. Analytical Foundation and Applications. IEEE press.

Zavala, A. & Nieto, O. (2012). *Fuzzy Hardware: A Retrospective and Analysis*, Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, vol.20 no. 4 pp. 623 – 635. Aug. 2012.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992). *Declaración de Río Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Río de Janeiro, Brasil, consultado el 12 de enero 2013, disponible en: <http://www.pnuma.org/docamb/dr1992.php>

Deublein, D. & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources* (en línea). Consultado 29 de octubre de 2014. Disponible en: <http://www.books.google.hn>

Fernández, A. & Sánchez, M. (2007). *Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos*. Dirección Provincial de Servicios Comunes de Ciudad de La Habana. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Disponible en internet: <http://www.unido.org/fileadmin/import>

Kepler (2009). *¿Por qué basta con un digestor en las plantas de biogás de alto rendimiento según Rottaler Modell?*. Rottaler Modell, consultado el 12 de enero 2013, disponible en:

<http://es.scribd.com/doc/69059530/Biodigestor-HIDROLIZADO>

Moncayo, R. (2008). *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás*. AquaLimpia Berantende Ingenieure, Alemania. Consultado el 20 de junio 2014, disponible en:

<http://www.aqualimpia.com>

Barragán, M. & Villacrés, M. (2005). *Estudio e implementación de un método de ajuste de controladores PID Difusos aplicado en el control de nivel de líquido*. Consultado el 10 de abril 2013, disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/>

Castillo, Á. (2008). Tutorial de Introducción de Lógica Borrosa, Historia de la Lógica Borrosa. Consultado el 4 de julio 2012, disponible en:

<http://www.dma.fi.upm.es>

Gómez, J. (2008). *Fuzzy Control*. (E.d. Nacional, Ed.) Consultado el 4 de julio de 2012, disponible en:

http://www.edutecne.utn.edu.ar/fuzzy_control/UTN-FCONTR.pdf

Hurtado, E. (2011). *Introducción a la Inteligencia Artificial*. Consultado el 29 de setiembre 2013, disponible en: <http://gorrostieta.com/pdfs/IAC.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1.

Código fuente en Lenguaje C.

Código fuente para funciones de pertenencia triangular y trapezoidal.

```
//-----  
// Funciones de pertenencia de la entrada  
//-----
```

```
void trian(float x)  
{  
    if (x<=a) y = 0;  
    if (x<=b && x>a) y = (x-a)/(b-a);  
    if (x<=c && x>b) y = (c-x)/(c-b);  
    if (x>=c) y=0;  
}
```

```
void trapmfiz(float x)  
{  
    if (x<=a) y = 1;  
    if (x<=b && x>a) y = (b-x)/(b-a);  
    if (x>b) y = 0;  
}
```

```
void trapmfder(float x)  
{  
    if (x<=a) y = 0;  
    if (x<=b && x>a) y = (x-a)/(b-a);  
    if (x>b) y = 1;
```

Código fuente para definición de conjuntos difusos de entrada.

```
//-----  
//Definición de los conjuntos difusos de entrada  
//-----  
//-----  
//Conjunto difuso NG  
//-----  
a = -3,0; b = -1,5; trapmfiz(x); NG = y;  
//-----  
//Conjunto difuso NP  
//-----  
a = -3,0; b = -1,5; c = 0,0; trian(x); NP = y;  
//-----  
//Conjunto difuso CERO  
//-----  
a = -1,5; b = 0,0; c = 1,5; trian(x); CERO = y;  
//-----  
//Conjunto difuso PP  
//-----  
a = 0,0; b = 1,5; c = 3,0; trian(x); PP = y;  
//-----  
//Conjunto difuso PG  
//-----  
a = 1,5; b = 3,0; c = 1,5; trapmfder(x); PG = y;
```

Código fuente para definición de conjuntos difusos de salida.

```
//-----  
//Función de pertenencia de salida  
//-----  
  
void desbtrapder (float y)  
{  
datos[num] = y;  
W[num] = (y*(b - a)) + a;  
}  
void desbtrapiz (float y)  
{  
datos[num] = y;  
W[num] = (y* (-b + a)) + b;  
}  
void desbtriang (float y)  
{  
datos[num] = y;  
W[num] = (y*(b - a)) + a;  
num++;  
datos[num] = y;  
W[num] = (y*(-c + b)) + c;  
}
```

Código fuente para base de reglas.

```
//-----  
//Reglas del controlador para una sola entrada  
//-----  
  
for(num = 0; num<8; num++)  
{  
datos[num] = 0;  
W[num] = 0;  
}  
Num = 0;  
if(NG>0) //APAGAR  
{  
a = 28,0; b = 96,0; y = NG; desbtrapiz(y);  
}  
if(NP>0) //APAGAR  
{  
a = 28,0; b = 96,0; y = NP; num++; desbtrapiz(y);  
}  
if(CERO>0) //MANTENER  
{  
a = 48,0; b = 96,0; c = 144,0; y = CERO; num++; desbtriang(y);  
}  
if(PP>0) //MEDIO ENCENDER  
{  
a = 96,0; b = 144,0; c = 192,0; y = PP; num++; desbtriang(y);  
}
```

```
if(PG>0)    //APAGAR
{
a = 144,0; b = 220,0; y = PG; num++; desbtrapder(y);
}
```

Código fuente para defuzzificación

```
//-----
//Método de defusificación
//-----

Mx = 0;
Yx = 0;
for(num = 0; num<8; num++)
{
Mx = Mx + datos[num];
Yx = Yx + datos[num]*W[num];
}
Salida = Yx/Mx;
}
```

ANEXO 2.

PIC 18F4550

MICROCHIP PIC18F2455/2550/4455/4550													
28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers with nanoWatt Technology													
Universal Serial Bus Features:						Peripheral Highlights:							
<ul style="list-style-type: none"> • USB V2.0 Compliant SIE • Low-speed (1.5 Mb/s) and full-speed (12 Mb/s) • Supports control, interrupt, isochronous and bulk transfers • Supports up to 32 endpoints (16 bidirectional) • 1-Kbyte dual access RAM for USB • On-board USB transceiver with on-chip voltage regulator • Interface for off-chip USB transceiver • Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only) 						<ul style="list-style-type: none"> • High current sink/source: 25 mA/25 mA • Three external interrupts • Four Timer modules (Timer0 to Timer3) • Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules: <ul style="list-style-type: none"> - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (T_{CV}/16) - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{CV}) - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit • Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module: <ul style="list-style-type: none"> - Multiple output modes - Selectable polarity - Programmable dead-time - Auto-Shutdown and Auto-Restart • Addressable USART module: <ul style="list-style-type: none"> - LIN bus support • Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes • 10-bit, up to 13-channels Analog-to-Digital Converter module (A/D) with programmable acquisition time • Dual analog comparators with input multiplexing 							
Power Managed Modes:						Special Microcontroller Features:							
<ul style="list-style-type: none"> • Run: CPU on, peripherals on • Idle: CPU off, peripherals on • Sleep: CPU off, peripherals off • Idle mode currents down to 5.8 µA typical • Sleep current down to 0.1 µA typical • Timer1 oscillator: 1.1 µA typical, 32 kHz, 2V • Watchdog Timer: 2.1 µA typical • Two-Speed Oscillator Start-up 						<ul style="list-style-type: none"> • C compiler optimized architecture with optional extended instruction set • 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical • 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical • Flash/data EEPROM retention: > 40 years • Self-programmable under software control • Priority levels for interrupts • 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier • Extended Watchdog Timer (WDT): <ul style="list-style-type: none"> - Programmable period from 41 ms to 131s • Programmable Code Protection • Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins • In-Circuit Debug (ICD) via two pins • Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V) 							
Flexible Oscillator Structure:													
<ul style="list-style-type: none"> • Five Crystal modes, including High-Precision PLL for USB • Two External RC modes, up to 4 MHz • Two External Clock modes, up to 40 MHz • Internal oscillator block: <ul style="list-style-type: none"> - 8 user selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz - User tunable to compensate for frequency drift • Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz • Fail-Safe Clock Monitor <ul style="list-style-type: none"> - Allows for safe shutdown if any clock stops 													
Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (oh)	CCP/ ECCP (PWM)	SPP	MSSP		USART	Comparators	Timers 8/16-bit
	FLASH (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					8PI	Master I ² C			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

Figura 85. PIC 18F4550.

Fuente: Datasheet pic 18F4550.

ANEXO 3.

DATASHET DEL SENSOR LM35

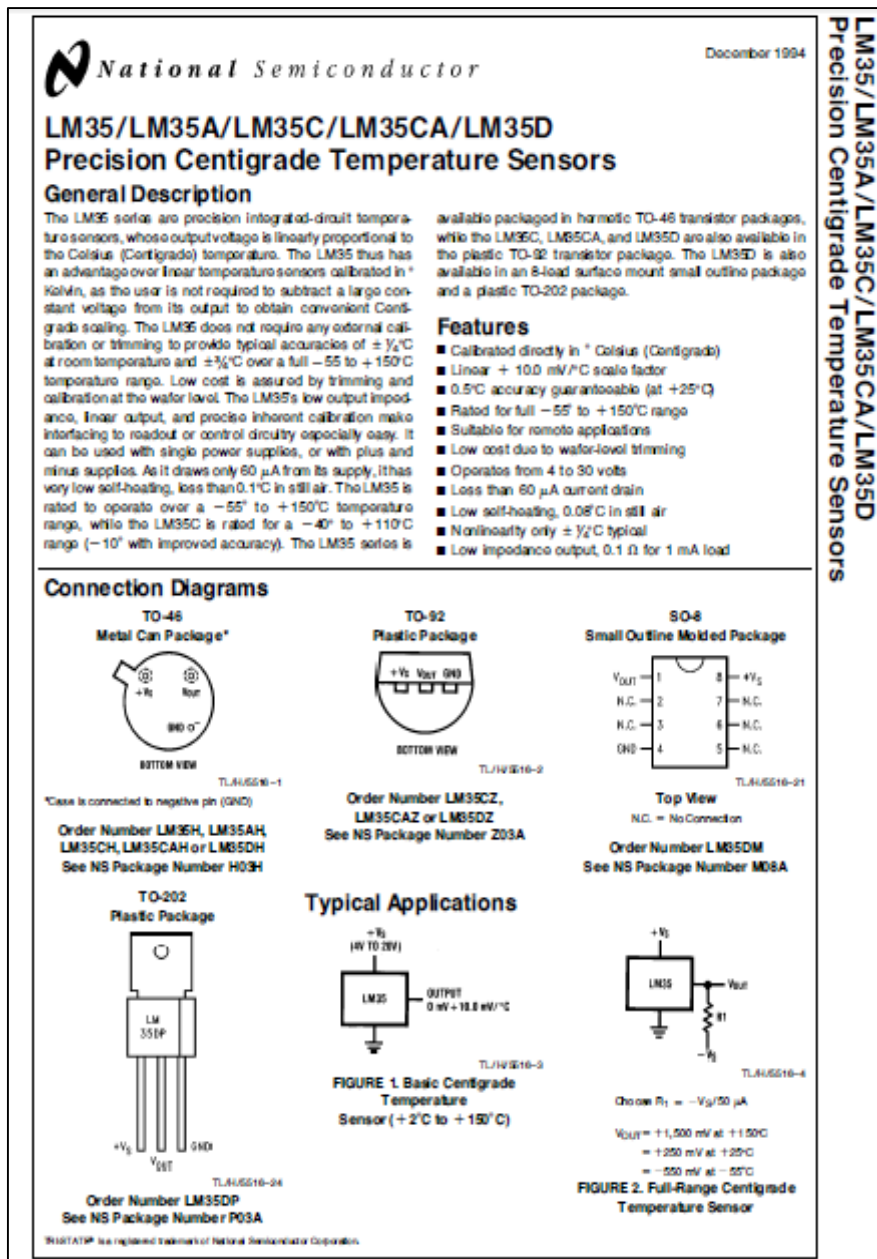


Figura 87. Sensor LM35.

Fuente: Datasheet sensor LM35.

ANEXO 4.

COSTOS

4.1. Costo módulo de control difuso de temperatura

En este apartado se detalla el costo de cada etapa para la elaboración del proyecto: desde el diseño matemático del algoritmo difuso, hardware, software, e incluyendo elementos de montaje y estructura.

4.1.1. Costo diseño matemático

En esta sección se detalla, todo el procedimiento, y actividades realizadas por el diseñador para la elaboración y definición del algoritmo matemático difuso que va a gobernar el control de temperatura. Estableciendo un valor de S/. 30 soles como costo hora de un diseñador; el detalle de actividades y el costo total por el diseño matemático (Ver tabla 36).

Tabla 36.

Costo diseño matemático.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Definición de parámetros del proyecto: Elaboración de conjuntos difusos de entrada Elaboración de conjuntos difusos de salida Diseño de etapa de evaluación de conjuntos, creación de reglas difusas.	90,00
TOTAL	S/. 90,00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Costo hardware

En esta apartado se detalla el costo de los materiales necesarios para la elaboración de las placas electrónicas que conforman el módulo de control difuso de temperatura y además el costo del diseño del mismo.

4.1.2.1. Materiales hardware

En la tabla 37 se presenta una lista con los materiales utilizados para la construcción de las placas electrónicas, tanto para la placa de control como para la de potencia.

Tabla 37.

Costo de materiales del hardware.

MATERIAL	TOTAL (S/.)
Microcontrolador PIC18F4550	
Acondicionador sensor LM35	
Termocupla DAC0808	
Convertor DAC0808	
Comunicación serial MAX232	
Conector DB9 Macho	
Cable serial – USB	
Opto acoplador 4N25	
Pantalla LCD 20x4 TR204-1	
Regulador de voltaje positivo 7805	
Regulador de voltaje negativo 7905	
Disipador para regulador de voltaje	
Capacitor electrolítico 2200uF	

Capacitor electrolítico 220uF	
Capacitor electrolítico 1uF	
Capacitor cerámico 100nF	
Capacitor cerámico 22uF	
Diodos LED	
Resistencias ¼ W 100 K Ω	
Resistencias ¼ W 10 k Ω	
Resistencias ¼ W 1 K Ω	
Trimer 20 KΩ	
Trimer 1KΩ	
Diodo 1N4007	
Fusible 110 VAC	
Borneras para placa 2 espacios	
Switch encendido	
SUB TOTAL	500.00
PLACA POTENCIA	
Opto acoplador MOC3021	
TRIAC BT139	
Resistencia ¼ W 270 Ω	
Resistencia ¼ W 180 Ω	
SUB TOTAL	250,00
ELEMENTOS GENERALES	
Transformador 120 VAC – 12 VAC	
Estaño	
Pasta para soldar	
SUB TOTAL	150,00
TOTAL	900,00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2. Diseño y construcción del hardware

En este apartado se detallan las actividades realizadas para la elaboración de las placas electrónicas, tanto control como potencia, además el costo de cada una de las placas.

Tabla 38.

Costo diseño y construcción del hardware.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Elaboración Placas Electrónicas	
Placa Control (16 x 17 cm ²)	S/. 80,00
Diseño circuito control en software electrónico de simulación PROTEUS y diseño automático de pistas, incluido la revisión de pistas generadas (tiempo aproximado 1 hora 30 minutos)	S/. 70,00
Elaboración placa control, incluye:	
Impresión pistas y fijado sobre placa de cobre	
Limpieza de residuos de cobre sobre las pistas	
Perforación huecos de la placa	
Soldadura de elementos.	
Placa Potencia	S/. 30,00
Diseño circuito potencia en software electrónico PROTEUS y diseño electrónico de pistas.	
Elaboración placa control, incluye:	
Impresión de pistas y fijado placa de cobre	
Etapa ácido (eliminación de cobre excedente)	
Limpieza de residuos de cobre sobre las pistas	
Perforación huecos de la placa	
Soldadura de elementos	S/. 30,00
TOTAL	S/. 210,00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Costo diseño software

Para establecer el costo del diseño de software, se toma en cuenta el tiempo necesario por el diseñador para implementar el algoritmo matemático de control difuso diseñado, en el microcontrolador mediante el lenguaje de programación C para PIC. Cabe resaltar que el tiempo de ejecución, investigación y desarrollo del proyecto no tiene costo, lo único que se reconocerá es el tiempo necesario para modificar el código base del algoritmo difuso ya creado, e implementarlo en nuestro PIC. Se toma como referencia S/. 30.00 el costo hora de un programador o diseñador.

Tabla 39.

Costo diseño del software.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Programación del algoritmo difuso, para control de temperatura (tiempo aproximado 6 horas), incluye: Modificación código fuente del algoritmo base creado (conjuntos difusos entrada, salida, reglas de inferencia y método de defusificación). (6 horas x 30 soles)	S/. 180.00
Modificación y monitoreo de datos. (2 horas x 30 soles)	S/. 60.00
TOTAL	S/. 240.00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Costo del biodigestor

Se toma en cuenta el tiempo necesario por el diseñador para implementar el biodigestor. Referencia S/. 30.00 el costo hora de un diseñador.

Tabla 40.

Costo del biodigestor.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Diseño del prototipo del biodigestor, para la biofermentación de los residuos (tiempo aproximado 20 horas), incluye: Diagramación de las entradas: materiales, resistencia, sensores de temperatura, sensores de CH ₄ , sensor CO ₂ , tarjeta arduino uno, bomba de recirculación, conexiones (20 horas x 30 soles)	S/. 600.00 S/. 1 200.00
Materiales y mano de obra del biodigestor	
TOTAL	S/. 1 800.00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Costo total

Resumen de todos los costos que intervienen en el proyecto.

Tabla 41.

Costo total – Módulo de control.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Costo diseño matemático	90,00
Costo materiales hardware	900,00
Costo diseño y construcción hardware	240,00
Costo biodigestor	1 800,00
TOTAL	3 150,00

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 5.

Fotografías del módulo de control difuso de temperatura.



Figura 88. Módulo de control difuso de temperatura en el biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 89. Manómetro de control de la presión en el biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

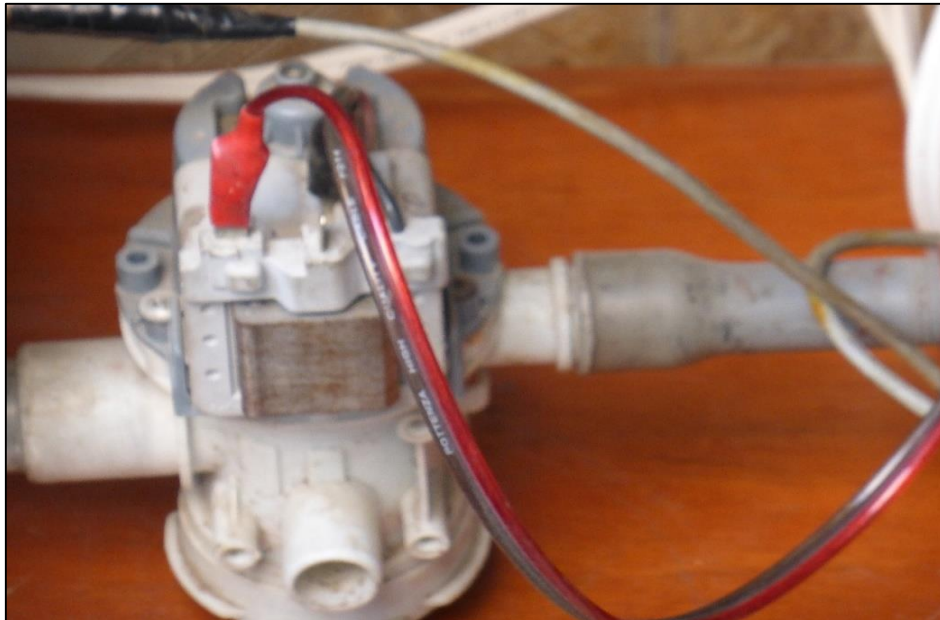


Figura 90. Bomba de recirculación de agua en la chaqueta del biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.

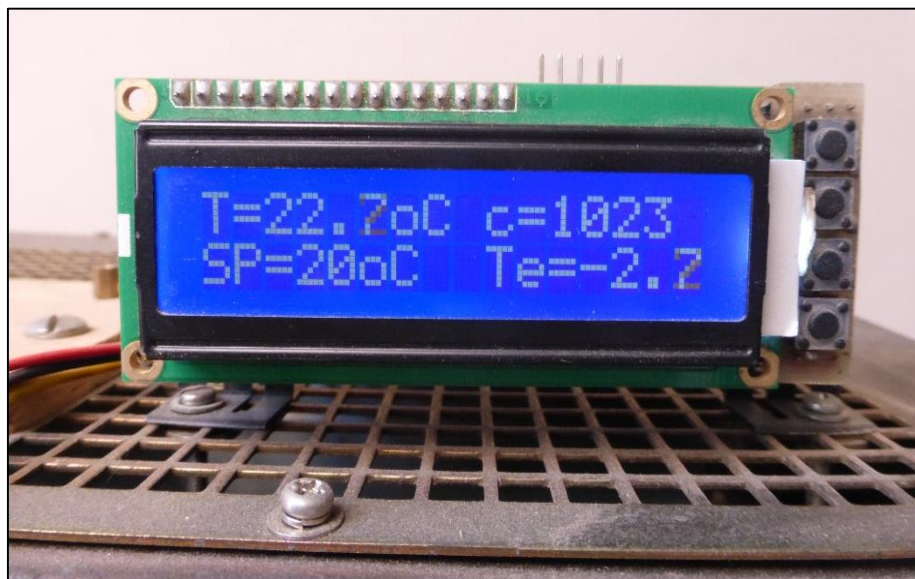


Figura 91. Pantalla LCD 16x2, control de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Módulo de control. Es una caja metálica de 0,39 m de largo; 0,25 m de ancho y 0,35 m de altura, cuyo interior aloja un conjunto de dispositivos de control, protección y seguridad del sistema de control.

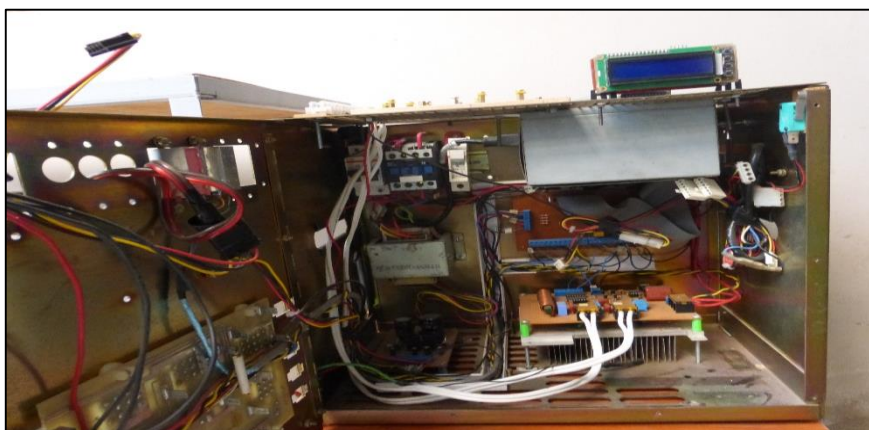


Figura 92. Circuitería interna en el módulo de control de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 93. Extracción y almacenamiento del biogás del biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 94. Biol extraído del biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 95. Biosol extraído del biodigestor.

Fuente: Elaboración propia.