



# **UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

## **UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

### **CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BIOMASA, BIOGÁS PARA  
GENERAR ELECTRICIDAD PARA UNA CASA TÍPICA DE LA  
AMAZONÍA ECUATORIANA

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTOR: MIGUEL EFRAÍN PICÓN ORTEGA**

**DIRECTOR: DR. SAMUEL SAMI-HOWARD PE, PHD, JD.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2021**

*Yo me gradué en  
los 50 años de La Cato!  
... y sostuve la Universidad*

## DECLARACIÓN

Yo, Miguel Efraín Picón Ortega, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.



---

**Miguel Efraín Picón Ortega**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Miguel Efraín Picón Ortega, bajo mi supervisión.

*Dr. Samuel Sami Howard*

---

**Dr. Samuel Sami-Howard PE, PhD, JD.**

**DIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por la salud y vida.

A mi familia, por el apoyo y sacrificio.

A la Universidad Católica de Cuenca por permitir formarme como profesional.

Al Dr. Samuel Sami-Howard PE, PhD, JD, por guiarme y asesorarme.

Al Ing. Edwin Marín, por aconsejarme, guiarme y asesorarme.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como propósito determinar la validación de un sistema de biogás para la generación de energía eléctrica para una casa típica de la amazonia ecuatoriana. Para el desarrollo de la metodología se utilizó el sistema de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup> de Puxin y el modelo matemático de digestión anaeróbica (ADM1) de la asociación internacional del agua (IWA). La experimentación se realizó en Cuenca provincia del Azuay con parámetros promedios de temperatura de 19 °C, pH de 6 y 25kg de residuos orgánicos, que fueron transformados a biogás de aproximadamente 1m<sup>3</sup>/día y de ello se obtuvo una generación eléctrica de 285Wh/día, donde cuya eficiencia sin considerar el consumo eléctrico fue de 28.5% y considerando el consumo del sistema de biogás fue de 8.95%. Para la simulación de la experimentación, en el modelado ADM1 se ingresaron los datos de temperatura, pH, carga orgánica, características del sistema de biogás y las constantes modificadas del modelado ADM1 adaptadas para el sistema de biogás, lo cual se obtuvo 1.012m<sup>3</sup>/día, que, a su vez, de cuya calidad de biogás se adquirió 328Wh/día con una eficiencia del 32% y considerando el consumo eléctrico se llegó a obtener 133Wh/día a una eficiencia de 13%. Mientras tanto para la amazonia se utilizaron parámetros máximos del sistema de biogás para tener 2m<sup>3</sup>/día los cuales fueron, un nivel de 7, temperatura no menor a 20 °C y carga orgánica de 25kg. La simulación de generación eléctrica determinó 1292Wh/día, y considerando el consumo eléctrico se obtuvo 1051Wh/día.

Palabras clave: biogás, biodigestor, generación eléctrica, digestión anaerobia, ADM1.

## ABSTRACT

The purpose of this research work was to determine the validation of a biogas system for the generation of electrical energy for a typical house in the Ecuadorian Amazon. For the development of the methodology, the Puxin family biogas system of 3.4m<sup>3</sup> and the mathematical model of anaerobic digestion (ADM1) of the international water association (IWA) were used. The experimentation was carried out in the Ecuadorian highlands with average temperature parameters of 19 °C, pH of 6 and 25kg of organic waste, which were transformed to biogas of approximately 1m<sup>3</sup> / day and from this an electricity generation of 285Wh / day was obtained, where whose efficiency without considering electricity consumption was 28.5% and considering consumption was 8.95%. With the data of the experiment of temperature, pH, organic load, characteristics of the biogas system and the modified constants of the ADM1 modeling adapted for the biogas system, 1,012m<sup>3</sup> / day was obtained, which, in turn, of whose biogas quality 328Wh / day was acquired with an efficiency of 32% and considering the electricity consumption of the biogas system, 133Wh / day was obtained at an efficiency of 13%. On the other hand, for the Amazon, for the simulation with the ADM1 modeling, the temperature of said zone of 23 - 25 °C averages, the constants of the experimental simulation, pH level 6.5 and the characteristics of the biogas system were added, which yielded results of biogas production of 1,277m<sup>3</sup>, in addition with said fuel gas data the generation of electrical energy estimated by the bio-generator was calculated which was 446Wh / day, giving an efficiency of 36% and considering the consumption of the system of Biogas-electricity was obtained 205Wh / day with an efficiency of 16%.

Keywords: Biogas, Methane, Biodigester, Electric Generation, Anaerobic Digestion, ADM1.

## Tabla de contenido

1. DECLARACIÓN .....	II
2. CERTIFICACIÓN .....	III
3. AGRADECIMIENTOS .....	IV
<b>RESUMEN</b> .....	V
<b>ABSTRACT</b> .....	VI
4. Tabla de contenido.....	- 13 -
5. LISTA DE FIGURAS .....	- 15 -
6. LISTA DE ANEXOS .....	- 19 -
7. INTRODUCCIÓN .....	- 20 -
1. CAPITULO 1 .....	- 23 -
1.1. Objetivos .....	- 23 -
1.1.1. Objetivo general.....	- 23 -
1.1.2. Objetivos específicos.....	- 23 -
1.2. Alcance .....	- 23 -
1.3. Justificación .....	- 24 -
2. CAPITULO 2 .....	- 25 -
2.1. Biogás .....	- 25 -
2.1.1. Etapas de la digestión anaeróbica.....	- 25 -
2.1.2. Condiciones necesarias para la producción eficiente de biogás.....	- 27 -
2.2. Biodigestores .....	- 33 -
2.2.1. Composición de un biodigestor.....	- 33 -
2.2.2. Clasificación de biodigestores.....	- 33 -
2.2.3. Principales tipos de biodigestores.....	- 34 -
3. CAPITULO 3 .....	- 37 -
3.1. Modelo de digestión anaerobia No.1 (ADM1).....	- 37 -
3.1.1. Procesos bioquímicos.....	- 37 -
3.1.2. Modelado del biorreactor.....	- 38 -
3.2. Modelo energético .....	- 40 -
4. CAPITULO 4 .....	- 41 -
4.1. Experimentación .....	- 41 -
4.1.1. Sistema de biogás familiar de 3.4m <sup>3</sup> de Puxin.....	- 41 -
4.1.2. Procesos tras operación de la planta de biogás.....	- 48 -

4.1.3. Generación de energía eléctrica por biogás. ....	- 51 -
4.2. Sistema de monitoreo.....	- 54 -
4.2.1. Ubicación de los sensores en el sistema de biogás. ....	- 54 -
4.2.2. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.....	- 55 -
4.2.3. Sensores. ....	- 56 -
4.2.4. Programación en Arduino mega 2560.....	- 70 -
4.2.5. Plataforma Ubidots. ....	- 74 -
5. CAPITULO 5 .....	- 78 -
5.1. Resultados experimentales .....	- 78 -
5.1.1. Datos de pH .....	- 78 -
5.1.2. Datos de temperatura ambiente y del biodigestor. ....	- 79 -
5.1.3. Datos de corriente y voltaje. ....	- 81 -
5.1.4. Biogás producido. ....	- 83 -
5.1.5. Generación de energía eléctrica. ....	- 84 -
5.1.6. Eficiencia del sistema obviando el consumo eléctrico de la planta de biogás. ....	- 86 -
5.1.7. Eficiencia del sistema .....	- 87 -
5.2. Simulación de resultados experimentales.....	- 89 -
5.2.1. Producción de biogás. ....	- 89 -
5.2.2. Generación eléctrica. ....	- 91 -
5.2.3. Eficiencia del sistema sin considerar el consumo eléctrico de la planta de biogás. ....	- 93 -
5.2.4. Eficiencia del sistema. ....	- 94 -
5.2.5. Diferencias entre la experimentación y la simulación de la experimentación. .	- 95 -
5.3. Validación .....	- 95 -
5.4. Estimación de generación de energía eléctrica en la amazonia .....	- 100 -
5.4.1. Producción de biogás .....	- 100 -
5.3.1.1 Poder calorífico .....	- 101 -
5.4.2. Generación eléctrica. ....	- 101 -
5.4.3. Eficiencia del sistema sin considerar el consumo eléctrico de la planta de biogás. ....	- 101 -
5.4.4. Eficiencia del sistema. ....	- 102 -
6. 6 CONCLUSIONES .....	- 104 -
7. 7 RECOMENDACIONES.....	- 106 -
8. 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	- 107 -
9. Bibliografía.....	- 107 -
10. 9 ANEXOS.....	- 109 -

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Proceso bioquímico de la digestión anaeróbica.....	- 26 -
Fig. 2. Actividad metanogénica con respecto al pH .....	- 31 -
Fig. 3. Tipo de biodigestores .....	- 34 -
Fig. 4. Clasificación de los biodigestores según el modo de operación .....	- 34 -
Fig. 5. Biodigestor tipo Chino .....	- 35 -
Fig. 6. Biodigestor Taiwán o tipo tubular.....	- 35 -
Fig. 7. Proceso de conversión bioquímico y fisicoquímico .....	- 37 -
Fig. 8. Procesos de la digestión anaeróbica .....	- 38 -
Fig. 9. Modelado del biodigestor .....	- 38 -
Fig. 10. Biodigestor de 3.4m <sup>3</sup> de Puxin.....	- 41 -
Fig. 11. Bomba de recirculación.....	- 43 -
Fig. 12. Filtro de vapor de agua (H <sub>2</sub> O) .....	- 43 -
Fig. 13. Filtro de sulfuro de hidrogeno (H <sub>2</sub> S).....	- 44 -
Fig. 14. Medidor de biogás.....	- 44 -
Fig. 15. Generador de presión de biogás .....	- 45 -
Fig. 16. Licuadora industrial .....	- 45 -
Fig. 17. Sustrato acelerador de la digestión anaerobia .....	- 46 -
Fig. 18. Válvula de biogás .....	- 46 -
Fig. 19. Generador eléctrico a biogás .....	- 48 -
Fig. 20. Hacienda la dolorosa.....	- 48 -
Fig. 21. Pesado e ingresado de la excreta .....	- 49 -
Fig. 22. Retiro del aire de la planta de biogás .....	- 49 -
Fig. 23. Bombeo del sustrato del biodigestor .....	- 50 -
Fig. 24. Llama del biogás .....	- 50 -
Fig. 25. Alimentación al biorreactor.....	- 51 -
Fig. 26. Bolsa llena de biogás .....	- 52 -
Fig. 27. Niveles de líquidos alto y bajo .....	- 52 -
Fig. 28. Preparación del generador.....	- 53 -
Fig. 29. Encendido del generador .....	- 54 -
Fig. 30. Ubicación de los sensores en el sistema de biogás.....	- 54 -
Fig. 31. Diagrama de bloques del equipo electrónico .....	- 55 -
Fig. 32. Sensor de temperatura ds18b20 .....	- 56 -

Fig. 33. Conexión del sensor de temperatura al Arduino .....	- 57 -
Fig. 34. Conexión del sensor de temperatura del biodigestor al Arduino. ....	- 57 -
Fig. 35. Sensor de temperatura ds18b20 para líquidos .....	- 58 -
Fig. 36. Curva de rendimiento .....	- 58 -
Fig. 37. Sensor pH 4502C .....	- 59 -
Fig. 38. Nivel de pH en función del voltaje del sensor.....	- 61 -
Fig. 39. Código para calcular el nivel de pH .....	- 62 -
Fig. 40. Sensor de corriente alterna sct-013-030 .....	- 63 -
Fig. 41. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030 .....	- 63 -
Fig. 42. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030 .....	- 64 -
Fig. 43. Visualización de la corriente medida a través del monitor serial y serial plotter ..	- 64 -
Fig. 44. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030 .....	- 65 -
Fig. 45. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030 .....	- 66 -
Fig. 46 Sensor flujo de agua YF-S201 .....	- 67 -
Fig. 47. Diagrama de calibración del sensor .....	- 68 -
Fig. 48. Arduino mega 2560 .....	- 69 -
Fig. 49. Modulo de Arduino shield Ethernet.....	- 69 -
Fig. 50. Diagrama de flujo, caudal de agua .....	- 71 -
Fig. 51. Diagrama de flujo, temperatura .....	- 72 -
Fig. 52. Diagrama de flujo, pH .....	- 73 -
Fig. 53. Diagrama de flujo, sistema de monitoreo .....	- 74 -
Fig. 54. Página web de Ubidots .....	- 75 -
Fig. 55. Comunicación entre Arduino y Ubidots a través del token .....	- 75 -
Fig. 56. Visualización de datos de sensores en Ubidots .....	- 76 -
Fig. 57. Ventana de sensores en Ubidots.....	- 76 -
Fig. 58. Descarga de datos de Ubidots.....	- 77 -
Fig. 59. Eventos de Ubidots .....	- 77 -
Fig. 60. pH en la fase de experimentación .....	- 79 -
Fig. 61. Voltaje del generador eléctrico a biogás.....	- 82 -
Fig. 62. Corriente eléctrica del circuito.....	- 82 -
Fig. 64. Producción de biogás en la fase de experimentación.....	- 84 -
Fig. 63. Medición de 1m <sup>3</sup> de biogás.....	- 84 -
Fig. 65. Carga eléctrica de la experimentación .....	- 85 -
Fig. 66. Experimentación de generación eléctrica.....	- 86 -
Fig. 67. Eficiencia del sistema de biogás en la fase de experimentación.....	- 87 -

Fig. 68. Eficiencia del sistema en la fase experimentación .....	- 89 -
Fig. 69. Variables de modelado de generación eléctrica .....	- 92 -
Fig. 70. Diagrama de bloques del modelado .....	- 92 -
Fig. 71. Eficiencia del sistema de generación en la fase simulación .....	- 94 -
Fig. 72. Eficiencia del sistema en la fase simulación .....	- 95 -
Fig. 73. Eficiencia sin considerar el consumo eléctrico en la experimentación y en la simulación de la experimentación .....	- 99 -
Fig. 74. Eficiencia considerando el consumo eléctrico en la experimentación y en la simulación de la experimentación .....	- 100 -
Fig. 75. Fracción molar de gases en el biogás .....	- 101 -
Fig. 76. Eficiencia del sistema de generación en la fase simulación .....	- 102 -
Fig. 77. Eficiencia del sistema en la fase simulación .....	- 103 -

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición del biogás .....	- 25 -
Tabla 2. Composición de diferentes estiércoles .....	- 28 -
Tabla 3. Composición de diferentes residuos orgánicos.....	- 28 -
Tabla 4. Solidos totales en residuos de animales y vegetales.....	- 29 -
Tabla 5. Tiempo de fermentación en función del rango de temperatura .....	- 30 -
Tabla 6. Relación de carbono nitrógeno (C/N) en residuos de animales y vegetales.....	- 32 -
Tabla 7. Medidas del biodigestor .....	- 42 -
Tabla 8. Especificaciones técnicas del generador .....	- 47 -
Tabla 9. Características del sensor flujo de agua YF-S201 .....	- 67 -
Tabla 10. Porcentaje de error. ....	- 68 -
Tabla 11. Pines ocupados en el sistema de monitoreo.....	- 70 -
Tabla 12. Datos de pH en la fase estable.....	- 78 -
Tabla 13. Datos de temperatura ambiente por cada 2 días .....	- 80 -
Tabla 14. Datos de temperatura de biodigestor por cada 2 días .....	- 81 -
Tabla 15. Datos de producción de biogás. ....	- 83 -
Tabla 16. Datos de eficiencia.....	- 87 -
Tabla 18. Valores de entrada para la simulación experimental .....	- 90 -
Tabla 19. Valores generados por la simulación experimental.....	- 90 -
Tabla 20. Datos técnicos del sistema de biogás de 3.4m <sup>3</sup> de Puxin y datos calculados..	- 91 -
Tabla 21. Resultados promedios del experimento y simulación del experimento .....	- 97 -

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Componentes del sistema de biogás familiar de 3.4m <sup>3</sup> de la compañía de Puxin....	-
109	-
Anexo 2: Nomenclatura del modelo matemático de digestión anaerobia ADM1.....	- 111 -
Anexo 3 Parámetros para la simulación del sistema de biogás.....	- 115 -
Anexo 4 Datos de sensores .....	- 123 -

## INTRODUCCIÓN

En el transcurso del tiempo, la población mundial ha ido aumentando al igual que la demanda energética, para el año 2050 se prevé que el consumo de energía eléctrica se incrementará un 60%, por lo tanto, para abastecer la demanda sin perjudicar al planeta será esencial apostar por proyectos de energía limpia o renovables. (Catalina, 2020).

La necesidad de mejorar la calidad de vida de las personas y contribuir con el desarrollo de la sociedad, ha impulsado a la creación de nuevas tecnologías para la generación, siendo una de ellas la energía eléctrica, lo cual en la mayoría de los casos se utiliza combustibles fósiles para su generación, siendo uno de los contribuyentes para la contaminación del medio ambiente y a su vez el acelerado proceso de agotamiento. Una de las salidas a este problema es la utilización de las energías renovables o energías limpias que se caracterizan por ser amigables con el medio ambiente, ya que la emisión de gases de efecto invernadero son mínimas o nulas, así como también, son fuentes de energía ilimitadas siendo capaces de regenerarse en tan poco tiempo (Posso, 2002).

El sol viene siendo el origen de las energías renovables, ya que el calor emitido a la tierra provoca las diferencias de presión, lo que genera los vientos que son aprovechados para la generación eólica. Se necesita del sol para la realización de la fotosíntesis de las plantas para vivir, donde se aprovecha para la generación de energía por la biomasa. La evaporación del agua lo cual genera nubes y de las nubes las lluvias, que a su vez se forman los ríos, siendo estos aprovechados con la implementación de plantas hidroeléctricas (Merino, 2007).

Las energías renovables no convencionales como: la energía solar, la energía eólica, la biomasa, la mareomotriz, la geotérmica, etc., son una solución para el suministro del servicio de energía eléctrica a las zonas rurales donde no llegan las redes de las empresas eléctricas. El encarecimiento, agotamiento y los efectos negativos que causan al planeta, los combustibles fósiles son motivos para optar por las energías renovables no convencionales. (\*Sami, 2017), (Sami, 2017).

El descubrimiento del biogás comenzó en el año de 1630, Van Helmont detecta un gas inflamable que se genera a partir de la descomposición de la materia orgánica, en el año de 1776, Alessandro Volta concluye que es directamente proporcional la cantidad de gas que se produce con la cantidad de materia orgánica que se descompone. En el año 1804, John Dalton determina que hay un alto porcentaje de metano en el biogás. En 1888, tras un experimento Gayon, generó biogás con la mezcla de estiércol (inóculos) y agua a una temperatura 35 °C. En el año de 1896, se alumbró una calle de Exeter (Inglaterra), tras la obtención de biogás

producido por las aguas residuales. En 1900, se aprovecha los desechos humanos para generar electricidad en Matunga (India). En el año 1906, se descubre la formación de metano a través del hidrogeno y dióxido de carbono por Soehngen, Imhoff inicia con la construcción de biodigestores anaeróbicos (ausencia de oxígeno) de tratamiento de aguas residuales (Vreugdenhil, 2012).

Entre los años 1930 hasta 1939, Buswell identifica las condiciones favorables para la generación de biogás. A finales de la 2da guerra Mundial en Alemania y las áreas ocupadas por los nazis, existió la escasez de combustibles, cuya solución fue la obtención de metano a partir del estiércol. En 1950, Barker descubre las bacterias anaeróbicas generadoras de metano. En el año 1955, se reduce la importancia del biogás debido a la abundancia del petróleo. En los años setenta, aumenta la demanda de biogás por escasez de petróleo. En 1975, se comienza a ejecutar plantas de biogás de forma masiva con el eslogan "biogás para cada hogar". En 1991, en Alemania pagan por Kilovatio producido a los agricultores que generen electricidad a partir de sus desechos. En el 2006, en las zonas rurales de China existen más de 18 millones de digestores a biogás, con una producción de 145 billones de m<sup>3</sup>. En el 2007, entran en operación 3700 plantas de biogás en Alemania y en el 2009, en Italia se incentiva con 0.28 euros por cada kilovatio generado a partir del biogás, siempre y cuando la producción de biogás sea inferior a un Megavatio (Lotina, 2012).

En Ecuador, las ciudades de Quito y Cuenca generan energía eléctrica a través del tratamiento de la basura orgánica, en Quito se genera 40 Megavatios de energía eléctrica al día, beneficiando a 20.000 familias y evita una huella de 215.107 toneladas de dióxido de carbono al año (eltelégrafo, Quito inaugurara planta de electricidad a biogás, 2017). En Cuenca se genera 2MW de electricidad con un total de 20.192 MW de potencia al año, beneficiando a 7.300 familias con un consumo de 160 kWh/mes y evita 46.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año que equivale aproximadamente a la reducción de contaminación de 14.000 vehículos livianos (EMAC, 2016).

El presente documento va enfocado a la simulación de un sistema de biomasa, para la generación de energía eléctrica para una casa típica de la amazonia ecuatoriana. Se utilizará el sistema de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup> de la compañía china Puxin para la ejecución de este trabajo previo a la obtención del título de ingeniero eléctrico, en donde tras la degradación de materia de origen orgánico se obtendrá el biogás, lo cual, es conducido por filtros que impiden el paso de las impurezas y finalmente es dirigido hacia un generador eléctrico a biogás que es el encargado de producir la electricidad. Además, de producir biogás tras la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos, se obtendrá fertilizante (biol) liquido natural de alta calidad que mejora el rendimiento de las plantas (PUXIN, PUXIN, 2019). Este sistema de biogás es una alternativa de generación de energía eléctrica para personas que

no cuentan o gozan del servicio de energía eléctrica, ya que la materia prima es producida en las cocinas de las viviendas también llamado residuos orgánicos. Puxin es una compañía de china que realiza sistemas a biogás para diferentes aplicaciones como: industrias, rellenos sanitarios, aguas servidas, familias, etc. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015).

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objetivos

#### 1.1.1. Objetivo general.

Generar biogás y utilizar un generador para proveer de electricidad a 1200 Watt/día con 300 Watt/hr en 4 horas.

#### 1.1.2. Objetivos específicos.

- Revisar el estado del arte del proceso para la obtención de biogás a través de residuos orgánicos.
- Disminuir la contaminación ambiental a través del aprovechamiento de materia orgánica para generar electricidad.
- Utilizar un modelado matemático del sistema de obtención de biogás y del sistema de generación de energía para analizar la predicción de generación de biogás y electricidad en la amazonia ecuatoriana.
- Dar valor agregado y tratamiento a los residuos orgánicos generados en los hogares.
- Elaborar un sistema de monitoreo para almacenar y visualizar los datos en tiempo real a través de la plataforma de Ubidots.
- Dar a conocer el principio de funcionamiento, el proceso de uso diario y el mantenimiento al sistema familiar 3.4 m<sup>3</sup> de biogás.
- Dar a conocer los resultados del proyecto para determinar la factibilidad del sistema familiar de 3.4 m<sup>3</sup> a biogás.

### 1.2. Alcance

El sistema de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup> de la compañía china Puxin es capaz de generar energía eléctrica utilizando como combustible el biogás que es obtenido tras las bacterias anaeróbicas que actúan sobre la materia orgánica en un ambiente anaeróbico es de decir en un ambiente sin oxígeno, el sistema será analizado tanto en generación de biogás como de energía eléctrica para la obtención del modelado matemático y así simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, lo cual va a ser comparado con los datos que se obtendrán del sistema de monitoreo que medirán los parámetros de: Potencial de hidrogeno (pH), Temperatura en grados Celsius (°C) del biodigestor y del ambiente, Volumen del agua que ingresa al biodigestor y Energía eléctrica producida por el generador (Kw/h).

Para obtener el biogás necesario para que funcione el generador eléctrico se tomaran en cuenta las condiciones necesarias para la producción de biogás que rige el manual de la compañía china Puxin.

### **1.3. Justificación**

El servicio de energía eléctrica facilita las actividades diarias y contribuye con el desarrollo de la sociedad, no obstante, no todos gozan de dicho servicio en la amazonia ecuatoriana. En la comunidad amazónica Mawka Llakta perteneciente a la parroquia Sarayaku en la provincia de Pastaza, se han instalado paneles solares para proveer de energía eléctrica por la empresa eléctrica Ambato (EEASA), pero la falta de mantenimiento tanto correctivo como preventivo ha sido la causa de la degradación de los equipos, obteniendo un saldo de desabastecimiento de energía eléctrica a dicha comunidad. Parte de la comunidad utiliza leña y linternas para obtener energía lumínica y algunas familias de posibilidad han optado por la generación de energía eléctrica con pequeños generadores eléctricos a combustible fósil (Gasolina) pero por motivo del transporte y costo del combustible se limitan al servicio de energía eléctrica (Santiago, 2018).

El sistema familiar de 3.4 m<sup>3</sup> de la compañía china de Puxin se puede instalar en 30min con tres personas sin haber realizado ningún curso acerca de ello, donde se lo puede ubicar en la superficie, considerando que no se necesita excavar o realizar construcciones pesadas. Todos los desperdicios orgánicos que se generan en las cocinas de los hogares de la amazonia ecuatoriana se dan un valor agregado para la obtención de biogás y a su vez ese gas combustible es aprovechado para generar energía eléctrica. Dicho sistema es interactivo ya que todos los días se tiene que alimentar al biodigestor de materia orgánica contribuyendo al manejo adecuado de dichos desperdicios. (PUXIN, PUXIN, 2019).

## CAPITULO 2 MARCO TEORICO

En el presente capítulo se detallan los conceptos, la digestión anaerobia, los factores que determinan la eficiencia del biogás y los principales tipos de biodigestores en el medio.

### 2.1. Biogás

El biogás puede ser producido por medios naturales o dispositivos específicos como biodigestores, y es definido como un gas combustible que se obtiene tras la degradación anaeróbica de materia orgánica, es decir degradación de materia orgánica en un ambiente sin oxígeno. El biogás está compuesto por gran cantidad de metano (CH<sub>4</sub>) que se encuentra entre el 50-70%, de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de vapor de agua (H<sub>2</sub>O), de hidrógeno (H), de monóxido de (CO) y de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), (Tabla 1). El poder calorífico del gas combustible es de 5142 kcal / m<sup>3</sup>. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015).

Tabla 1. Composición del biogás

Fuente: (Coronel Durazno, 2018)

Componentes	Formula Química	Porcentaje
Metano	CH <sub>4</sub>	55-80
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	20 -45
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	1
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,1
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	0,1
Agua	H <sub>2</sub> O	0,05

#### 2.1.1. Etapas de la digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica o biometanización es un proceso microbiológico que, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica es desintegrada, transformada y estabilizada a través de una serie de reacciones bioquímicas que ocurre de forma simultánea en el digestor, por la acción de las bacterias anaeróbicas, teniendo como resultado, biogás y bioabono. (Varnero Moreno & Romero, 2011).

Los estudios realizados de conversión de materia orgánica que ocurre en la digestión anaeróbica han detectado cuatro fases o procesos, los cuales son, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. (Varnero Moreno & Romero, 2011), (Figura 1).

El primer proceso de la digestión anaeróbica es la hidrolisis, donde los microorganismos convierten la materia orgánica compleja en fracciones mucho más pequeñas. Los

microorganismos de la etapa fermentativa o acidogénica y con la ayuda de los microorganismos hidrolíticos transforman la materia orgánica disuelta en aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes, productos intermedios como (propiónico, butírico, valérico, etc.), ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono. En la etapa acetogénica, los microorganismos transforman los productos intermedios producidos por las etapas anteriores en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono que se agregan con los ya producidos en la fase anterior, las bacterias homoacetogénicas producen ácido acético a través del hidrogeno y el dióxido de carbono. Finalmente, en la etapa de la metanogénica hay dos tipos de bacterias las cuales son las bacterias acetoclásticas y las bacterias hidrogenotróficas. Las bacterias acetoclásticas consumen el acetato y lo transforman en metano y dióxido de carbono. Las bacterias hidrogenotroficas transforman el hidrogeno y dióxido de carbono en metano. (Huertas, 2015) .

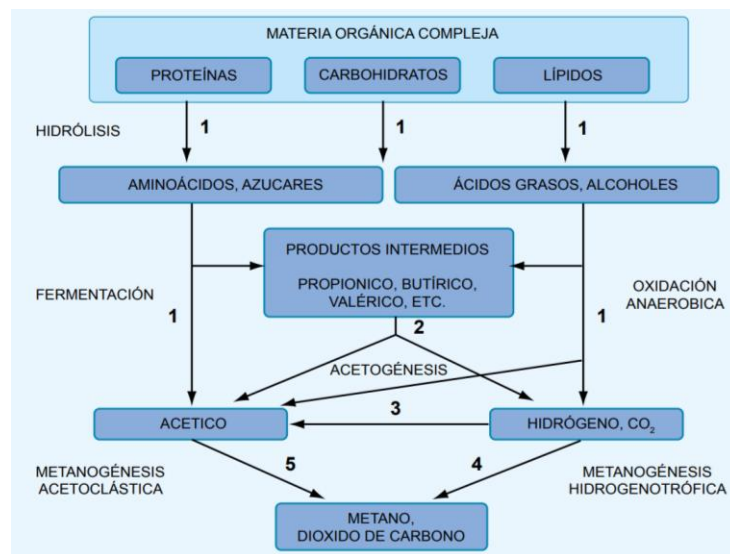


Fig. 1. Proceso bioquímico de la digestión anaeróbica

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

### 2.1.1.1. Hidrólisis.

El primer proceso de la digestión anaeróbica es la hidrolisis el cual degrada la materia orgánica compleja en fracciones mucho más pequeñas ya que los microorganismos no pueden atravesar la pared celular de la materia orgánica sin haberse hidrolizado. (Huertas, 2015).

La fase de la hidrolisis transforma, las proteínas, carbohidratos, lípidos y otros complejos orgánicos producidos por la fase de desintegración a, monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga. (Huertas, 2015).

### **2.1.1.2. Acidogénesis.**

En la etapa fermentativa o acidogénica, las bacterias producen compuestos que son alimento para el siguiente grupo de bacterias de la etapa acetogénica y metanogénica. Las bacterias además de producir alimento para las siguientes fases, también eliminan las trazas de oxígeno del sistema. (Huertas, 2015).

### **2.1.1.3. Acetogénesis.**

Las bacterias acetogénicas utilizan los productos intermediarios producidos por las bacterias acidogénicas para producir o transformar en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono(CO<sub>2</sub>). (Huertas, 2015).

### **2.1.1.4. Metanogénesis.**

En la etapa metanogénica hay dos tipos de bacterias donde las bacterias acetoclásticas producen metano y dióxido de carbono a partir del ácido acético y las bacterias hidrogenotróficas producen metano (CH<sub>4</sub>) a partir del hidrogeno. (Huertas, 2015)

## **2.1.2. Condiciones necesarias para la producción eficiente de biogás.**

Es importante evaluar los factores que determinan la eficiencia del biogás. Los agentes de la digestión anaeróbica son susceptibles a los cambios que provienen del ambiente. Los investigadores determinan el desempeño de la digestión anaerobia en función del porcentaje de metano que se encuentra en el biogás. Las condiciones necesarias para la producción eficiente de biogás son, ambiente anaeróbico, composición bioquímica moderada de la biomasa, suficientes inóculos, sólidos totales, temperatura, pH y relación de carbono/nitrógeno (C/N). (Varnero Moreno & Romero, 2011)

### **2.1.2.1. Ambiente anaeróbico.**

Es necesario un ambiente sin oxígeno ya que las bacterias metanogénicas son sensibles y no pueden sobrevivir en ambientes aeróbicos, por lo tanto, se utilizan los biodigestores ya que son dispositivos capaces de mantener un ambiente anaeróbico. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015).

### **2.1.2.2. Composición bioquímica de la biomasa.**

La biomasa debe permitir el desarrollo y actividad microbiana, para que esto suceda es necesario mantener la relación de carbono y nitrógeno (C/N) a un nivel de 25/1 o 30/1. El material biodegradable debe tener proporciones equitativas de sales minerales como, (cobalto, níquel, azufre, potasio, fosforo, tungsteno, molibdeno, calcio, zinc, magnesio, selenio, entre otros), (tabla 2 y 3). (Varnero Moreno & Romero, 2011).

Tabla 2. Composición de diferentes estiércoles

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

Estiércol	Disponibilidad Kg/día*	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m³/kg húmedo	m³/día/año
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.021
Excretas humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

Tabla 3. Composición de diferentes residuos orgánicos

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

Residuos	Cantidad residuo Ton/ha	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m³/Ton	m³/ha
<b>Cereales (paja)</b>				
Trigo	3.3	123:1	367	1200
Maíz	6.4	45:1	514	3300
Cebada	3.6	95:1	388	1400
Arroz	4.0	58:1	352	1400
<b>Tubérculo (hojas)</b>				
Papas	10.0	20:1	606	6000
Betarragas	12.0	23:1	501	6000
<b>Leguminosas (paja)</b>				
Porotos	3.2	38:1	518	1650
Habas	4.0	29:1	608	1400
<b>Hortalizas (hojas)</b>				
Tomate	5.5	12:1	603	3300
Cebolla	7.0	15:1	514	3600

### 2.1.2.3. Suficientes inóculos.

Los inóculos o bacterias son los agentes de la digestión anaerobia encargados de consumir los sustratos orgánicos y producir biogás, del mismo modo cuanto mayor sea la población microbiana, mayor será la producción de biogás. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015).

### 2.1.2.4. Sólidos totales.

La movilidad de los agentes de la digestión anaeróbica en la biomasa, se ve afectado a medida que el porcentaje de sólidos totales (ST) vaya aumentando, como resultado se tiene la baja calidad y cantidad de biogás. (Varnero Moreno & Romero, 2011).

Se ha demostrado experimentalmente que el contenido de sólidos totales en una carga orgánica de biodigestores semicontinuos no debe exceder del 8 o 12% para garantizar el correcto proceso de digestión anaeróbica. En biorreactores de carga discontinua el porcentaje de sólidos totales es de 40 o 60%. (Varnero Moreno & Romero, 2011).

Tabla 4. Sólidos totales en residuos de animales y vegetales

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

Materias primas	% Sólidos totales
<b>Residuos animales</b>	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprinos	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
<b>Residuos vegetales</b>	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.0 – 80.0

Para determinar la cantidad de agua a mezclar con la materia orgánica, con el fin de proveer el porcentaje adecuado de sólidos totales, es necesario saber el porcentaje de sólidos totales de la materia orgánica a utilizar. En la tabla 4 se observa que el rango de sólidos totales de residuos animales y vegetales. (Varnero Moreno & Romero, 2011)

A continuación, se realiza el cálculo para determinar la cantidad de agua que se debe ingresar para iniciar la planta de biogás de 3.4m<sup>3</sup> de Puxin. Como dato, Puxin recomienda ingresar 500kg de estiércol de bovino para iniciar la planta de biogás, teniendo en cuenta que el estiércol es fresco se determina un porcentaje de sólidos totales del 20% y el porcentaje de sólidos totales para la materia orgánica diluida es del 8%.

$$\% S.T. (Carga diluida) = \frac{kg\ excreta * \% S.T. excreta\ fresca}{kg\ excreta\ fresca + agua\ agregada} \quad (1)$$

$$0.08 = \frac{500 * 0.2}{500 + agua\ agregada}, \quad agua\ agregada = A$$

$$0.08A + 40 = 100$$

$$A = 750L$$

### 2.1.2.5. Temperatura adecuada.

Las bacterias de metano pueden fermentar los sustratos orgánicos en un rango de temperatura de 8 a 65 °C. La temperatura juega un papel importante en la cantidad de producción de biogás, es decir a mayor temperatura, más activas y mayor crecimiento de las bacterias metanogénicas, por lo tanto, mayor será la producción de biometano. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015). En la tabla 5 se observa, tres rangos de temperatura con los respectivos tiempos de fermentación, donde las bacterias anaeróbicas pueden trabajar, rango psicrófilico (8° a 25° C) a un tiempo de fermentación sobre los 100 días, mesófilico (25° - 45° C) de fermentación entre 30 a 40 días, y el rango termófilico que tiene el menor tiempo de fermentación por su rango temperatura elevada, que se encuentra entre 45° - 65° C. (Varnero Moreno & Romero, 2011).

Tabla 5. Tiempo de fermentación en función del rango de temperatura

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

### 2.1.2.6. Potencial de hidrogeno (pH).

Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a los cambios de niveles de pH óptimos que el resto de agentes de la digestión anaerobia. El rango de pH óptimo para las bacterias anaeróbicas es:

Fermentativas: 5.5 a 6.5

Acetogénicas: 7.0 a 7.2

Metanogénicas: 6.8 a 7.5

Debido a que el consorcio de bacterias anaeróbicas les gusta reproducirse en un ambiente neutro o ligeramente alcalino es necesario controlar el pH a niveles de 6.8 a 7.5.

El pH de la carga orgánica del digestor puede disminuir la producción y calidad del biogás. De hecho, si el pH desciende de 6, disminuye el porcentaje de metano, provocando la no combustión del biogás, (figura 2). (Tello, 2013).

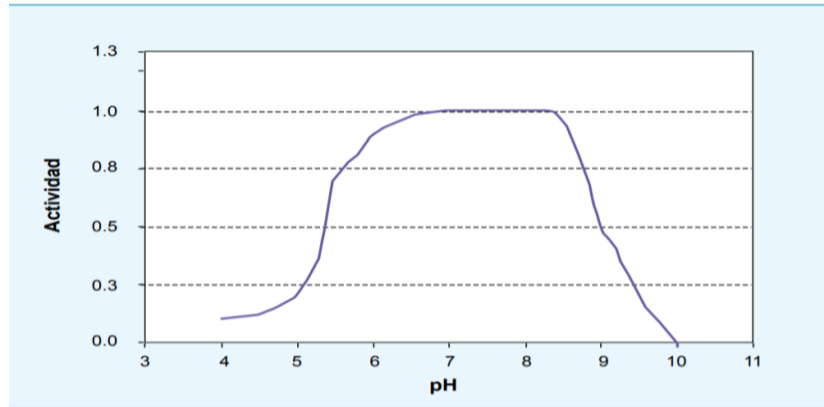


Fig. 2. Actividad metanogénica con respecto al pH

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

### 2.1.2.7. Relación de carbono/nitrógeno (C/N).

El alimento principal de las metano-bacterias es el carbono y nitrógeno, las bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo tanto, la relación ideal de C/N del material orgánico "fresco o seco", es de 30/1 o hasta 20/1. Como el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno la formación de nuevas células, el alto contenido de Carbono de 35/1, disminuye la descomposición de la materia orgánica por el simple hecho de tener bajo contenido de bacterias metanogénicas, y si la relación de C/N es de 8/1, el proceso se vuelve tóxico por exceso de amonio provocando la inhibición del proceso. (Varnero Moreno & Romero, 2011).

Los valores de C/N se pueden calcular teniendo como dato el porcentaje de carbono y nitrógeno (tabla 6).

$$K = \frac{C1*Q1+C2*Q2+\dots+Cn*Qn}{N1*Q1+N2*Q2+\dots+Nn*Qn} \quad (2)$$

$$K = \frac{C}{N} \text{ de la materia organica}$$

$$C = \% \text{ de carbono del sustrato}$$

$C1 \rightarrow C2 \rightarrow Cn \rightarrow$  Es el porcentaje de carbono para "n" residuos organicos

$$N = \% \text{ de nitrogeno del sustrato}$$

$N1 \rightarrow N2 \rightarrow Nn \rightarrow$  Es el porcentaje de nitrógeno para "n" residuos organicos

$Q =$  peso de cada sustrato organico, en kg o toneladas  $T_n$

$Q1 \rightarrow Q2 \rightarrow Qn \rightarrow$  Es el peso de "n" residuos organicos

Tabla 6. Relación de carbono nitrógeno (C/N) en residuos de animales y vegetales

Fuente: (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015)

Materia prima	C%	N%	C: N	Contenido de metano de biogás producido (%)	Duración del gas (d)	Contenido del material seco (%)	Tasa de producción del biogás de material seco (L.KG)	Tasa de producción de biogás de materia prima (L/.KG)
Paja de trigo seco	46	0.53	87:1	59		82	425	348
Paja de arroz seco	42	0.63	67:1	61		83	409	340
Tallos de maíz	40	0.75	53:1	53 ~ 59	90	80	412	
Hierba fresca	11	0.54	26:1	70	60	24	455	107
Estiércol fresco de oveja	16	0.55	29:1					
Estiércol fresco de vaca.	7.3	0.29	25:1	50 ~ 60	90	17	205	35
Estiércol fresco de cerdo	7.8	0.60	13:1	65	60	18	425	77
Estiércol fresco de humano	2.5	0.65	2.9:1	50	30	20	426	85
Estiércol fresco de caballo	10	0.24	24:1	60	90		279	

## **2.2. Biodigestores**

Un biodigestor es considerado como un dispositivo cerrado que mantiene la materia orgánica en un ambiente anaeróbico, lo cual se realiza un proceso de descomposición por la población microbiana, que contribuye con la producción de biogás y biol. (Coronel Durazno, 2018).

### **2.2.1. Composición de un biodigestor.**

Los componentes de un biodigestor son, un reactor donde se almacena la materia orgánica, un dispositivo que recolecta el biogás, accesorios para la salida del biogás, entrada y salida de la sustancia orgánica. En algunos casos algunos biodigestores tienen un orificio para la conducción de malos olores producidos por la materia orgánica. (Coronel Durazno, 2018).

#### **2.2.1.1. Reactor.**

El reactor es el encargado de almacenar y mantener la materia orgánica en un ambiente libre de oxígeno. En el reactor ocurre el proceso bioquímico, la forma del reactor puede ser cúbica, cilíndrica, ovoide o rectangular como es el sistema de biogás de 3.4m<sup>3</sup> de Puxin. Algunos reactores les suelen ubicar en un invernadero para mantener el calor y los cambios bruscos de temperatura. (Coronel Durazno, 2018).

El biodigestor de Puxin de 3.4m<sup>3</sup> está cubierto de un plástico que tiene la entrada donde ingresa la carga orgánica, inóculos y el agua, tiene una salida de biol que es usado como abono para la agricultura, un orificio para salida de mal olor y finalmente un orificio para la salida del gas almacenado.

### **2.2.2. Clasificación de biodigestores.**

#### **2.2.2.1. Según su tecnología.**

Los biodigestores se clasifican según el tipo de tecnología en tres generaciones, donde la primera generación, el proceso de digestión anaeróbica y la materia orgánica se encuentra en suspensión, en la segunda y tercera generación los microorganismos son retenidos por el reactor en forma de biopelícula, (figura 3). (Coronel Durazno, 2018).

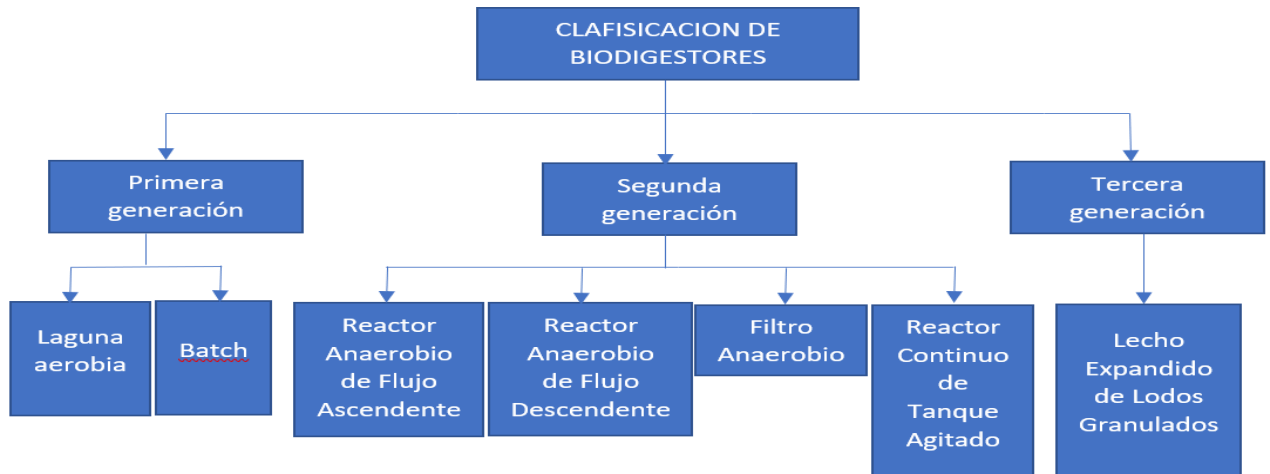


Fig. 3. Tipo de biodigestores

Fuente: (Coronel Durazno, 2018)

### 2.2.2.2. Según el modo de operación.

De acuerdo en la figura 4 los biodigestores se clasifican en continuos, semicontinuos y discontinuos. Los digestores continuos cuentan con un reactor adicional o tanque de post digestión (TPD), con el objeto de almacenar el exceso de materia orgánica enviada por el reactor principal tras el almacenamiento de sustratos. El tanque de post digestión se encuentra sellado para captar biogás del efluente del reactor principal. Los procesos semicontinuos almacenan el material bio-degradable al digestor y antes de aprovecharse completamente se expulsa para seguir almacenando más materia orgánica provocando el bajo rendimiento en la obtención del biogás en comparación con los otros dos procesos. El proceso de discontinuo almacena la biomasa y lo retiene hasta producir la máxima cantidad de biogás y cuando comienza a reducir la producción se retira el sustrato retenido y se almacena otra cantidad de material biodegradable para nuevamente producir biogás. (Coronel Durazno, 2018).

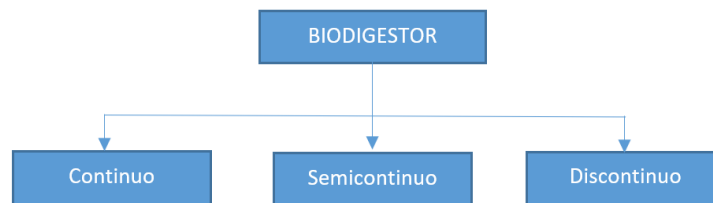


Fig. 4. Clasificación de los biodigestores según el modo de operación

Fuente: (Coronel Durazno, 2018)

### 2.2.3. Principales tipos de biodigestores.

#### 2.2.3.1. Tipo chino.

Los biodigestores tipo chino se caracterizan por tener forma cilíndrica y la parte de arriba y abajo son del tipo domo, estos tipos de digestores van enterrados, (figura 5). (Coronel Durazno, 2018).

El proceso empieza con el llenado del biodigestor de materia orgánica por la parte superior. Después de almacenar al digestor con residuos orgánicos se va alimentando diariamente para obtener biogás todos los días. (Coronel Durazno, 2018)

El gas se va almacenando dentro del sistema, que, al aumentar el gas, aumenta la presión y como resultado los fluidos se elevan de la entrada y salida. Cuando el gas se consume se disminuye y la presión baja. (Coronel Durazno, 2018).

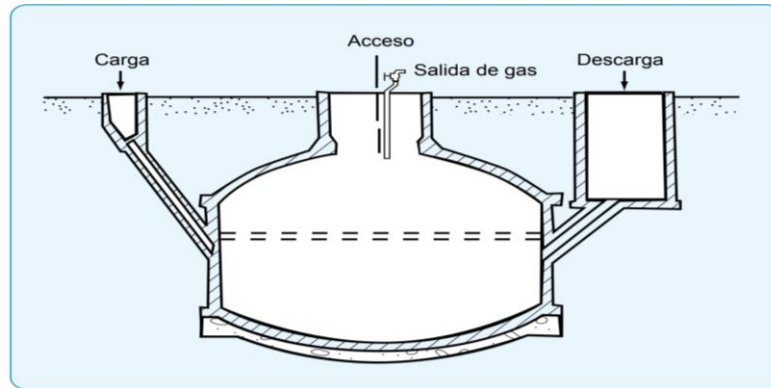


Fig. 5. Biodigestor tipo Chino

Fuente: (Varnero Moreno & Romero, 2011)

### 2.2.3.2. Tipo Taiwán o cilíndrico.

En la figura 6 se aprecia el biodigestor tubular o tipo Taiwán que es caracterizado por tener una relación longitud-ancho de 5:1, dicho digestor comúnmente es instalado en zonas rurales y va ubicado a nivel del suelo por lo cual es necesario realizar una especie de hoyo o fosa en el terreno. Está constituido por una entrada y una salida de líquido, y en la parte de encima de la geomembrana se encuentra un orificio para la salida del biogás. (Coronel Durazno, 2018).

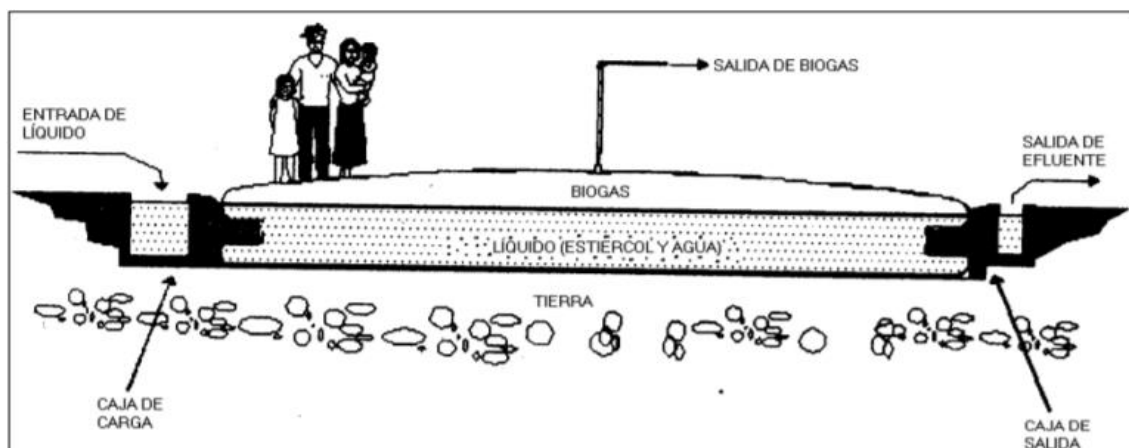


Fig. 6. Biodigestor Taiwán o tipo tubular

Fuente: (Cendales Ladino. & Jiménez Castellanos, 2015)

### **2.2.3.3. Laguna anaeróbica.**

El Biodigestor de laguna anaeróbica es utilizado para grandes volúmenes de residuos orgánicos con la ventaja de que minimiza los olores y disminuye la emisión de metano a la atmosfera en comparación con las lagunas anaeróbicas descubiertas. El material de las paredes y fondo de la laguna puede ser de hormigón armado, ladrillos o de bloques y la superficie de polietileno de alta densidad (PDA). (Coronel Durazno, 2018).



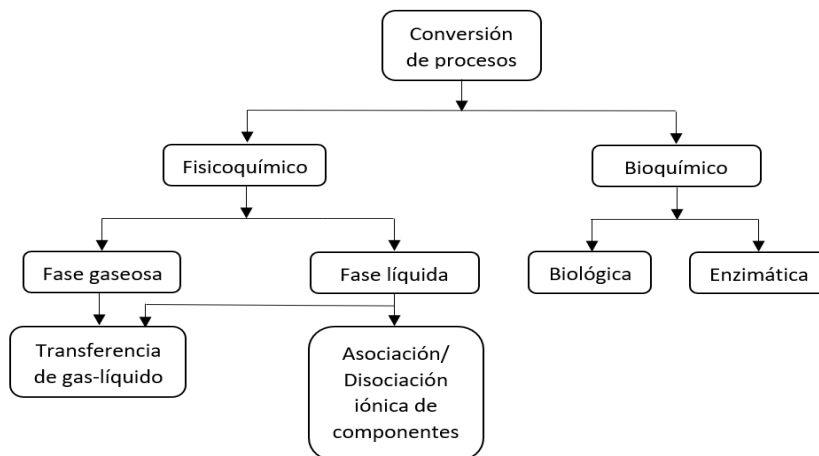


Fig. 8. Procesos de la digestión anaeróbica

Fuente: ( Chiva Vicent, Berlanga Clavijo, Martines Cuenca, & Climent, 2018 )

### 3.1.2. Modelado del biorreactor.

Un sistema de biogás normalmente consta de un biorreactor a presión atmosférica que se divide en dos partes, donde la parte de abajo se utiliza para concentrar los sustratos orgánicos y mantenerlos en un ambiente anaeróbico, y la parte de arriba se usa para almacenar el biogás producido. El reactor de la imagen 9 consta de una entrada y una salida, con volumen de líquido constante y la agitación completa.

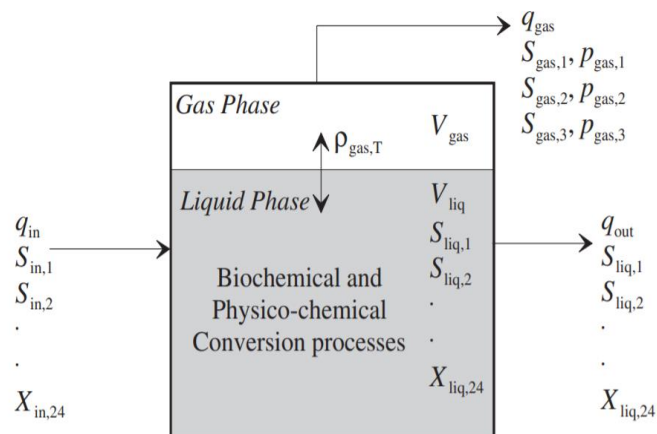


Fig. 9. Modelado del biodigestor

Fuente: (D.J. Batstone, 2002)

### 3.1.2.1. Ecuaciones de fase liquida y gaseosa.

Para las ecuaciones de fase liquida y gaseosa se supone que el reactor está completamente agitado y su temperatura es igual en todas sus partes.

### 3.1.2.2. Ecuaciones de fase liquida.

Deduciendo que el reactor no tiene ni entrada ni salida y por ende el volumen del líquido llegaría a ser constante. Entonces el estado de los componentes de la fase liquida en el balance de masa se puede expresar como la ecuación 3. (Manjusha Ca, 2015).

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \sum_{j=1-28} \rho_j v_{i,j} \quad (3)$$

$S_{liq,i}$  Concentración del compuesto i en la fase liquida presente en el interior del reactor.

$v_{i,j}$  Es una constante estequiométrica del compuesto i en el proceso j.

$\rho_j v_i$  Tasa del proceso j.

### 3.1.2.3. Ecuaciones de fase gaseosa.

El modelo tiene en cuenta tres gases: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. En el balance de masa, la concentración de los gases en la fase liquida se puede expresar ecuación 4.

$$\frac{dS_{gas,i}}{dt} = -\frac{S_{gas,i} * q_{gas,i}}{V_{gas}} + \rho_{T,i} \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad (4)$$

$S_{gas,i}$  Concentración del compuesto i en la fase gaseosa presente en el interior del reactor.

$q_{gas,i}$  Caudal de gas para el gas i (i = Metano, dióxido de carbono e hidrogeno).

$V_{gas}$  Volumen del gas.

$V_{liq}$  Volumen del liquido.

$\rho_{T,i}$  Tasa de transferencia del gas, donde i es la temperatura especifica denotado por el coeficiente de la ley de Henry  $K_{H,i}$ .

La tasa de transferencia para el (CH<sub>4</sub>), (CO<sub>2</sub>) y (H<sub>2</sub>) se expresa a través de la ecuación 5, 6 y 7:

$$\rho_{T, CH_4} = K_{La}(S_{liq, CH_4} - 16K_{H, CH_4} * p_{gas, CH_4}) \quad (5)$$

$$\rho_{T, CO_2} = K_{La}(S_{liq, CO_2} - 16K_{H, CO_2} * p_{gas, CO_2}) \quad (6)$$

$$\rho_{T, H_2} = K_{La}(S_{liq, H_2} - 16K_{H, H_2} * p_{gas, H_2}) \quad (7)$$

$p_{gas, i}$  Presión parcial del gas i, se obtiene de la ecuación de la ley de gases ideales.

$K_{H, i}$  Coeficiente de la ley de Henry para el gas i, para la temperatura T.

En caso de que el gas este restringido por un orificio, el flujo de gas  $q_{gas}$  se puede expresar por la ecuación 8.

$$q_{gas} = K_p(p_{gas} - p_{atm}) * \frac{p_{gas}}{p_{atm}} \quad (8)$$

### 3.2. Modelo energético

El modelo energético presenta la cantidad de energía eléctrica que se genera a partir del biogás producido, dicho modelo es expresado por la ecuación 9. (Cendales Ladino. & Jiménez Castellanos, 2015).

$$E_{elect}^{prod} = Q_G P_{CH_4} H_C \eta_{elect} [kWh/dia] \quad (9)$$

$Q_G$  Producción de biogás [ $Nm^3/dia$ ].

$P_{CH_4}$  Fracción molar de metano contenido en el biogás [%].

$H_C$  Poder calorífico del gas metano [ $kWh/Nm^3$ ].

$\eta_{elect}$  Eficiencia de generación eléctrica.

## CAPITULO 4

### EXPERIMENTACION Y SISTEMA DE MONITOREO

En el presente capítulo se detalla el proceso que se realizó para generar energía eléctrica a través del biogás, y la recolección de datos para el análisis del comportamiento del sistema de biogás.

#### 4.1. Experimentación

##### 4.1.1. Sistema de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup> de Puxin.

El sistema de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup> de la compañía china Puxin es portable y de fácil ensamblaje, ya que no hay necesidad de seguir cursos o tener experiencia, y con tan solo seguir las instrucciones que dicta el manual es posible armarlo, (figura 10). Se puede armar en tan solo tres horas en un terreno firme y sin necesidad de realizar algún tipo de construcción. El sistema conlleva un sinnúmero de componentes que se describen a continuación.

##### 4.1.1.1. Digestor de membrana de 3.4m<sup>3</sup>.



*Fig. 10. Biodigestor de 3.4m<sup>3</sup> de Puxin*

Fuente: Autor

El biodigestor de membrana 3.4m<sup>3</sup> es el encargado de aislar el contenido del biodigestor, mientras permite la comunicación con el medio ambiente. Puede almacenar hasta 1.3m<sup>3</sup> de biogás. Cuyo digestor tiene cuatro orificios con el fin de ingresar y sacar la materia orgánica, abertura para la salida de materia en exceso y salida del biogás. Las características del biodigestor se aprecian en la tabla 7.

Tabla 7. Medidas del biodigestor

Fuente: Autor

Medidas del digestor	
Item	Unidad
Espacio	3.4m <sup>3</sup>
Alto	195cm
Largo	156cm
Ancho	120
Volumen del digestor	1.7m <sup>3</sup>
Volumen de gas	1.3m <sup>3</sup>
Peso	150kg

#### 4.1.1.2. Bomba de recirculación.

La bomba de agua (figura 11), se encarga de mezclar las sustancias que se encuentran dentro del reactor y de mantener la misma temperatura. El bombeo también ayuda a que las burbujas que se encuentran retenidas en el biodigestor se dirijan hacia la bolsa de almacenamiento de gas ya que estas burbujas de gas ocupan espacio lo cual evitan el ingreso de suficiente materia orgánica para la máxima generación de biogás. El sistema de bombeo funciona con una alimentación de 120-100V en corriente alterna, a 50 o 60Hz, y su consumo es de 125W.



*Fig. 11. Bomba de recirculación*

Fuente: Autor

#### **4.1.1.3. Filtro deshidratador pequeño de 0.6L**

En la figura 12 se encuentra el sistema de filtración de vapor de agua que es utilizado para evitar que el agua no vaya a los diferentes equipos que generan electricidad, agua caliente o quemadores de biogás.



*Fig. 12. Filtro de vapor de agua (H<sub>2</sub>O)*

Fuente: Autor

#### **4.1.1.4. Filtro desulfurador de biogás.**

El desulfurador de biogás de Puxin, (tabla 13), es el encargado de eliminar el sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) que viene en el biogás, dicho gas es corrosivo y dañino para equipos de generación de energía eléctrica, de calentamiento de agua, cocinas a biogás, lámparas, etc. Para el caso del generador, el no filtrar el H<sub>2</sub>S, dañaría al cilindro del motor, bujía y otras partes más. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015).



Fig. 13. Filtro de sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S)

Fuente: Autor

#### 4.1.1.5. Medidor de biogás.

El biogás que fluya a través del medidor será censado, donde los números de con contorno rojo son los decímetros cúbicos y los números con contorno negro son los metros cúbicos que fluyeron a través del dispositivo. Dicho medidor no necesita de energía eléctrica para su funcionamiento, (figura 14).



Fig. 14. Medidor de biogás

Fuente: Autor

#### 4.1.1.6. Generador de presión.

El generador de presión de biogás, se encarga de enviar suficiente presión para el correcto funcionamiento del generador. A través del compresor se puede aumentar o disminuir la

presión del biogás con la ayuda de una perilla, y del mismo modo la generación de energía eléctrica, (figura 15).



*Fig. 15. Generador de presión de biogás*

Fuente: Autor

#### **4.1.1.7. Licuadora industrial.**

La licuadora industrial es el encargado de triturar la materia orgánica sólida, con la finalidad de evitar obstruir la entrada, salida y recirculación del sistema de biogás.

La trituradora industrial se alimenta de 220v de corriente alterna a una frecuencia nominal de 50Hz /60Hz y a una potencia nominal de 3000W. Se puede programar para que funcione 30 o 60s de licuado, (figura 16).



*Fig. 16. Licuadora industrial*

Fuente: Autor

#### 4.1.1.8. Bolsa de fermentación bacteriana.

La bolsa de fermentación bacteriana de la imagen 17, acelera la producción del biogás, también aumenta el nivel de pH, mejorando la calidad del gas, la sustancia viene a un nivel de pH 8.



Fig. 17. Sustrato acelerador de la digestión anaerobia

Fuente: Autor

#### 4.1.1.9. Válvula.

Este dispositivo permite o bloquea el paso del biogás, cuando la perilla se encuentra en sentido de la manguera, el paso del biogás está habilitado, y si la perilla se encuentra en sentido contrario a la manguera, entonces el paso del biogás se encuentra bloqueado ( figura 18).



Fig. 18. Válvula de biogás

Fuente: Autor

#### 4.1.1.10. Generador eléctrico a biogás.

El Generador PX1500EBG de Puxin, (figura 19), utiliza el biogás como combustible para generar energía eléctrica en corriente continua y corriente alterna. Es necesario que el biogás no contenga sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) ni vapor de agua (H<sub>2</sub>O), ya que esto provocaría daños al cilindro del motor, la bujía y en otras partes. En la tabla 8 se indican las especificaciones de máquina, eléctricas y medidas del generador.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del generador

Fuente: (Puxin, 2015)

		PX1500BG/EBG
Maquina	Modelo	PX168-1
	Tipo	Monocilíndrico, refrigerado por aire, 4 tiempos.
	Sistema de inyección	C.T.I
	Aire de entrada de referencia 2.8 ± 0.5 presión (Kpa)	2.8 ± 0.5
	Volumen de aceite (L)	0.6
	Nivel de ruido a siete metros (db)	67
Generador	Frecuencia (Hz)	60
	Voltaje (V)	110/220
	Potencial nominal (KW)	1.5
	Potencia máxima (KW)	1.8
Medidas	Largo (mm)	610
	Ancho (mm)	440
	Altura (mm)	450
	Peso (KG)	41/44



*Fig. 19. Generador eléctrico a biogás*

Fuente: Autor

#### **4.1.2. Procesos tras operación de la planta de biogás.**

Para la operación del sistema de biogás se siguió paso a paso el manual de Puxin que sugiere utilizar el estiércol de bobino como inóculo para el arranque de producción de biogás.

##### **4.1.2.1. Inóculos.**

Los 500kg de estiércol necesarios para la operación del sistema se obtuvo de la granja pecuaria la Dolorosa (figura 20), ubicado en la parroquia de Tarquí. La recolección se realizó en 10 tachos verdes con una capacidad de 50kg cada uno, en un lapso de tiempo de dos semanas.



*Fig. 20. Hacienda la dolorosa*

Fuente: Autor

##### **4.1.2.2. Ingreso de estiércol al sistema de biogás.**

Después de recolectar y llevar el estiércol al laboratorio del Centro de Energías Renovables (CER), se ingresó al biodigestor acompañado de agua para facilitar y aumentar la rapidez del proceso, (figura 21). Además, se añadió una bolsa de fermentación bacteriana para que ayude a acelerar el proceso y mejorar el nivel de pH de la sustancia del sistema.



*Fig. 21. Pesado e ingreso de la excreta*

Fuente: Autor

#### **4.1.2.3. Retiro de aire del biorreactor.**

Al finalizar el ingreso del estiércol se verifico que la bolsa del biodigestor se había hinchado de aire en una mínima cantidad, por lo que se procedió a retirarlo activando las válvulas y encendiendo el compresor de biogás para la expulsión del biorreactor y así mantener un ambiente anaeróbico.

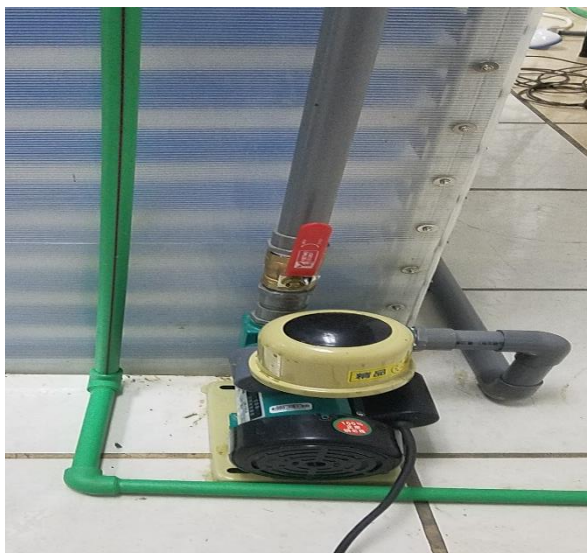


*Fig. 22. Retiro del aire de la planta de biogás*

Fuente: Autor

#### **4.1.2.4. Bombeo de la carga del biodigestor.**

Se bombeo la sustancia con la finalidad de que todo el biorreactor tenga las mismas propiedades y también para que los gases que se acumulan, se vayan hacia la bolsa que se almacena el biogás, (figura 23).

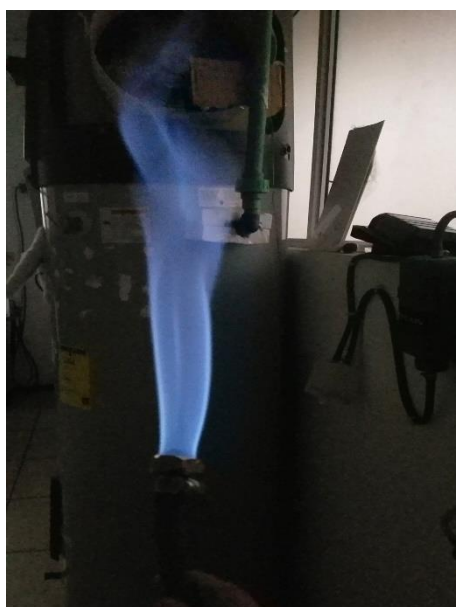


*Fig. 23. Bombeo del sustrato del biodigestor*

Fuente: Autor

#### **4.1.2.5. Pruebas de encendido de biogás.**

El día 10 el biodigestor se llenó de biogás y se verificó que no mantenía la llama a un nivel de pH de 4.13, por lo que se procedió a retirar todo el biogás. En el día 15 el biogás encendía y mantenía la llama de color azul a un nivel de pH de 5.5, (figura 24).



*Fig. 24. Llama del biogás*

Fuente: Autor

#### 4.1.2.6. Alimentación por lotes.

Después de obtener el pH a un nivel 6 y mantener encendida la llama del biogás se alimentó al biodigestor 25kg diarios de materia orgánica licuada para realizar las respectivas pruebas con el generador eléctrico (figura 25 literal a y b). El pH se mantuvo entre 5.97 a 6.3 Los desechos orgánicos que se ingresó al biodigestor fueron triturados, para evitar que se obstruya tanto en la entrada, salida o en las tuberías.



Fig. 25. (a) Residuos organicos, (b) Licuado de residuos organicos.

Fuente: Autor

#### 4.1.3. Generación de energía eléctrica por biogás.

##### 4.1.3.1. Biogás generado.

A simple vista se puede verificar la cantidad de biogás generado que almacena la membrana del digestor, (figura 26). El biodigestor es capaz de almacenar hasta 1.3m<sup>3</sup> de biogás. Cuando la membrana de digestor está llena de biogás y el biodigestor sigue produciendo, el biogás tiende a salir por la entrada de la planta de biogás.

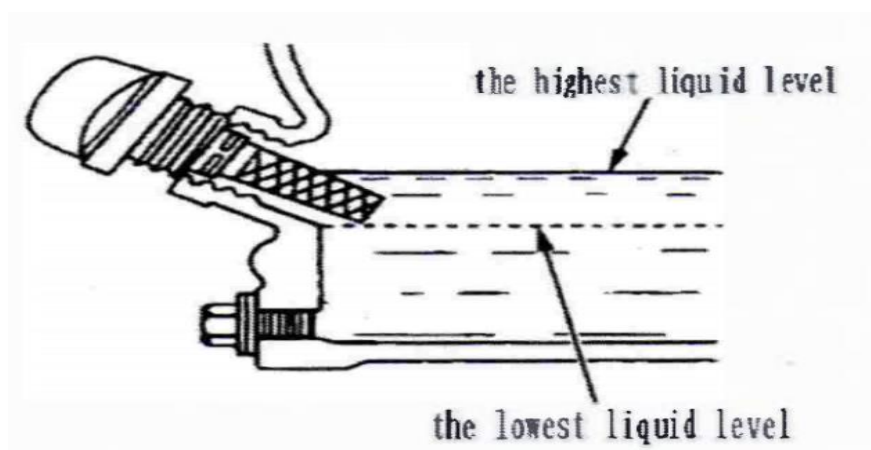


*Fig. 26. Bolsa llena de biogás*

Fuente: Autor

#### **4.1.3.2. Preparación antes la operación del generador.**

Antes de la operación del generador se le ubico en un suelo plano y se agregó 0.6L de aceite SAE 0W-30, con el fin de aumentar el rendimiento y la vida útil del electrógeno. A continuación, se verifico el nivel de aceite con la varilla que viene de fabrica en el generador, dicha varilla se manchó de aceite al nivel recomendado, en caso de que no se manche, hay que ingresar más aceite y probar hasta que marque lo recomendado. No es aconsejable ingresar aceite de 2 tiempos ni realizar mezclas con dicho aceite. En la figura 27 se aprecia el nivel de líquido alto y bajo no sugerido para el funcionamiento del generador. (PUXIN, Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant, 2015).



*Fig. 27. Niveles de líquidos alto y bajo*

Fuente: (Puxin, 2015)

Se verifico que la batería de 12v del generador no contenía energía por lo que se procedió a cargar. Y por último se jalo la manija de arranque 3 veces para comprobar la presión normal. (Puxin, 2015).

Nota: No hay que prender el motor cuando el nivel de aceite este bajo ya que este se dañaría. (Puxin, 2015).



*Fig. 28. Preparación del generador*

Fuente: Autor

#### *4.1.3.2.1 Encendido del generador*

Para el arranque del generador se realizó una serie de pasos los cuales se presentan a continuación.

1. Con la llave del generador se ubicó en el estado "start".
2. Se bloqueo el paso del aire del generador.
3. Válvulas del sistema de biogás en estado abierto.
4. Encendido del compresor de biogás.
5. Se tiro la cuerda varias veces hasta que encendió el generador y rápidamente se abrió el paso de aire.
6. Al cabo de 3-5 minutos se agregó la carga.



Fig. 29. Encendido del generador

Fuente: Autor

Para las pruebas se realizó un circuito de cuatro focos los cuales dos son de 110W incandescentes y dos son focos led de 40W, que sumados dan una potencia total de 300W, (figura 29). El generador emitió gases durante el funcionamiento por lo que se ubicó en un ambiente donde haya flujo de aire para evitar intoxicaciones.

## 4.2. Sistema de monitoreo

### 4.2.1. Ubicación de los sensores en el sistema de biogás.

En el sistema de biogás serán instalados sensores para monitorear su comportamiento en función de las diferentes variables como la temperatura ambiente y temperatura del digestor, el pH, la cantidad de agua que ingresará al biodigestor y la producción de energía dependiendo de los valores mencionados. La ubicación de los diferentes sensores en el sistema de biogás se puede apreciar en la figura 30.

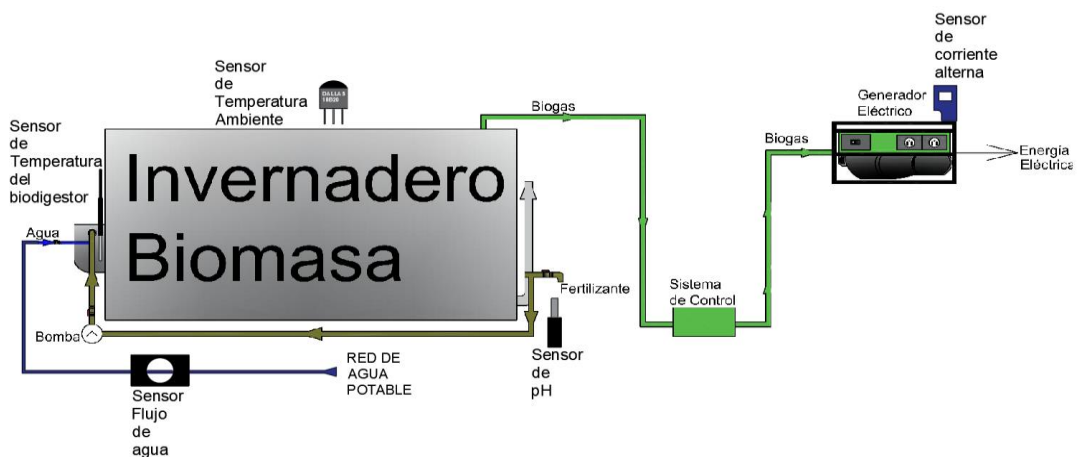


Fig. 30. Ubicación de los sensores en el sistema de biogás

Fuente: Autor

Se ubicaron cinco sensores en el sistema de biogás, el sensor de temperatura ambiente se le ubico en la parte de encima del biodigestor, el sensor de temperatura del biodigestor se le sumergió en la entrada del sistema, el sensor de potencial de hidrogeno (pH) está colocado en la salida del fertilizante, en donde ahí se sacarán las muestras para medir el pH de la sustancia que permanecerá en el sistema de biogás. El sensor de corriente alterna de la serie sct-013-030 se enganchará a una línea fase de la salida de energía que producirá el generador a biogás. Y finalmente se colocó un sensor de flujo de agua de modelo YF-S201 en la tubería de ½" donde ingresa el agua de la red de agua potable hacia el biodigestor.

#### 4.2.2. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo.

El diseño del diagrama de bloques del sistema de monitoreo remoto se puede apreciar en la figura 31.

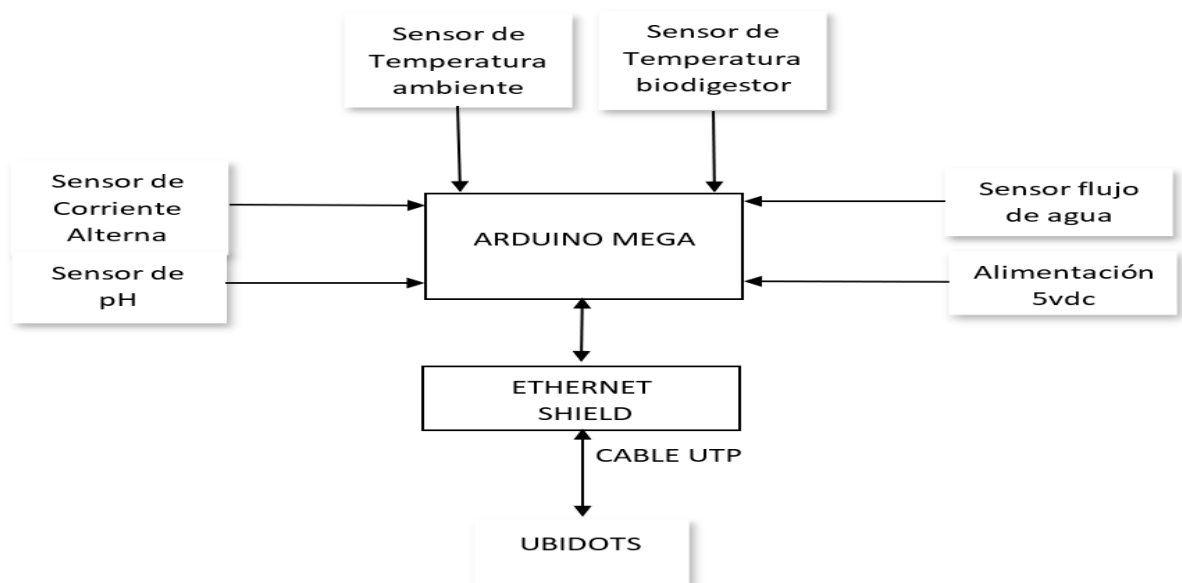


Fig. 31. Diagrama de bloques del equipo electrónico

Fuente: Autor

Cada uno de los bloques corresponde a los dispositivos utilizados en el sistema de monitoreo.

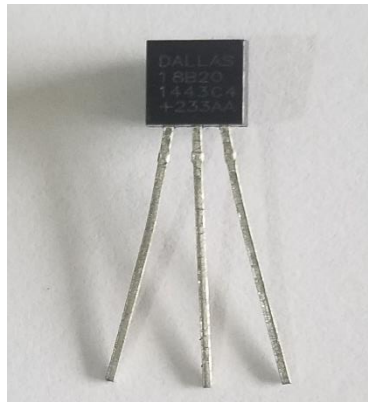
La tarjeta de desarrollo Arduino será alimentada de 5v dc y este se encargará de energizar y recibir la información de los sensores que a su vez esta información a través del módulo ethernet shield que proporcionará el acceso a internet y dicha información será enviada a la plataforma de Ubidots, lo cual Ubidots nos permitirá visualizar los datos de los sensores en cualquier parte del mundo, siempre y cuando se tenga acceso a internet, y también almacenara la información, lo cual se descargara asignándole un correo electrónico a Ubidots

que a su vez nos proporcionará un link de descarga de los datos de los sensores con fecha y hora en la que fue censado.

### **4.2.3. Sensores.**

#### **4.2.3.1. Sensor de temperatura ds18b20.**

El sensor a ocupar es el ds18b20, el cual es un termómetro digital que utiliza un solo pin para comunicarse, el dispositivo tiene la forma de un transistor que está conformado por tres pines, los cuales dos se utilizó para la alimentación del mismo (VCC y GND) y el tercero para la transferencia de datos (DQ). Es posible conectar varios DS18B20 en el mismo pin de datos y se los puede identificar cada sensor porque cada uno tiene un código de serie único de 64 bits. Para mayor información de las especificaciones técnicas del sensor se puede dirigir a [datasheets.maximintegrated.com](https://datasheets.maximintegrated.com). En la figura 32 se puede observar al sensor de temperatura ds18b20 que será el encargado de medir la temperatura ambiente. (Integrated, 2010).



*Fig. 32. Sensor de temperatura ds18b20*

Fuente: Autor

Se ocupo dos librerías para poder medir la temperatura, estas librerías se pueden descargar a través del programa de Arduino en la parte de Gestor de Librerías.

Con la librería “Dallas Temperature”, es posible realizar las lecturas o configuraciones del DS18B20. En esta librería esta implementado todo el protocolo para la comunicación a través de una sola vía (One wire). (Integrated, 2010).

##### *4.2.3.1.1. Conexión del sensor de temperatura ambiente a la tarjeta de Arduino.*

En la figura 33 se puede ver que el sensor de temperatura ambiente está conectado a una resistencia pull up con el pin DQ. El valor de la resistencia de es de  $4.7k\Omega$ , ya que la distancia del sensor a la tarjeta de Arduino es menor que 5m.

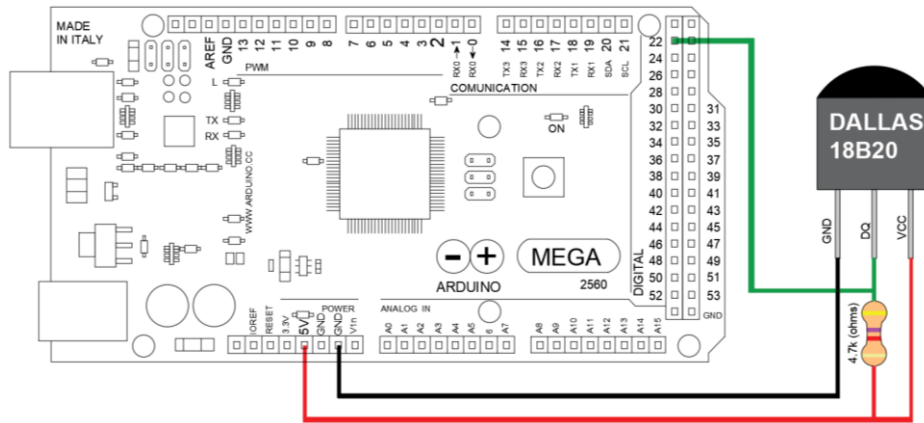


Fig. 33. Conexión del sensor de temperatura al Arduino

Fuente: Autor

#### 4.2.3.1.2. Conexión del sensor de temperatura de líquidos al Arduino.

En la figura 34 se aprecia la conexión del sensor de temperatura del biodigestor con la tarjeta Arduino, el sensor está dentro de la sonda lo cual sirve para medir la temperatura de líquidos.

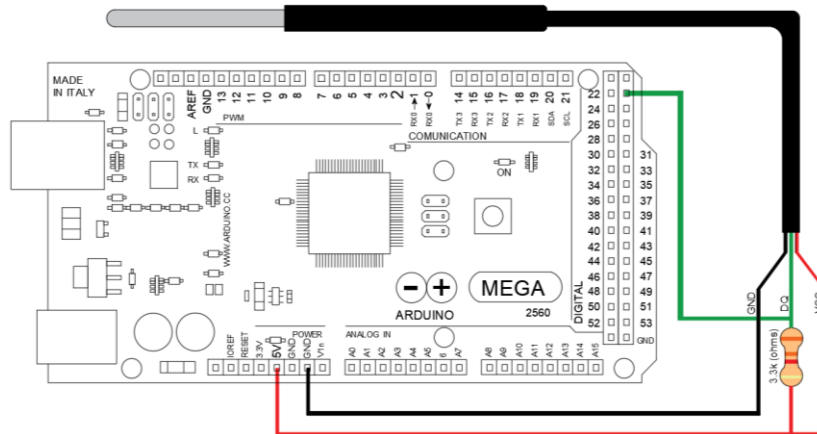


Fig. 34. Conexión del sensor de temperatura del biodigestor al Arduino.

Fuente: Autor

En la figura 35 se puede observar al sensor ds18b20 dentro de un encapsulado esto servirá para poder medir la temperatura de líquidos o sustancias del biodigestor.



Fig. 35. Sensor de temperatura ds18b20 para líquidos

Fuente: Autor

#### 4.2.3.1.3. Análisis de error.

A medida que aumente la temperatura de medición del sensor, va aumentando el porcentaje de error, en la figura 36 se observa 3 curvas de error, en +3s en -3s y el promedio. Como para la experimentación se trabajarán con temperaturas de 15 °C a 30° el error promedio sería de -0.2 °C. (Integrated, 2010).

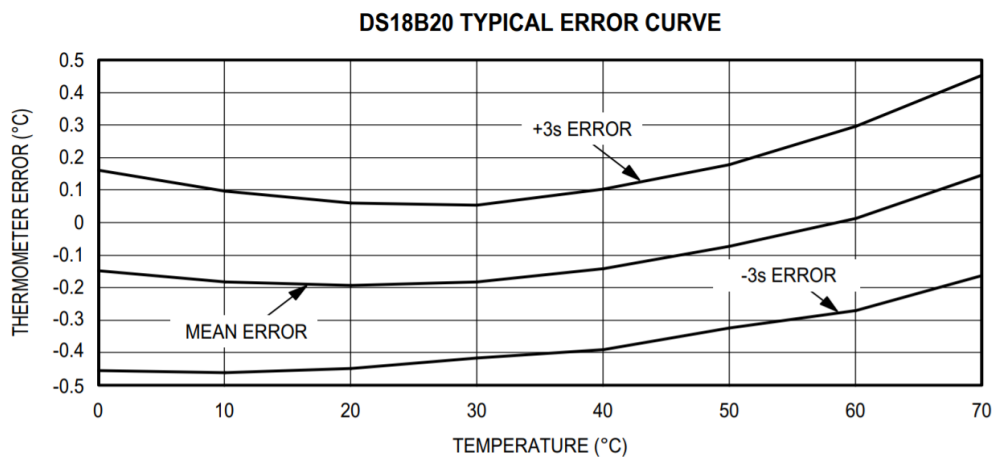


Fig. 36. Curva de rendimiento

Fuente: (Integrated, 2010)

#### 4.2.3.2. Sensor de potencial de hidrogeno (pH).

Se utilizará el sensor pH analógico de la serie 4502C para Arduino, con el propósito de medir los iones de hidrogeno  $[H]^+$  (pH) presentes en la disolución del biodigestor, cuyos valores pueden oscilar entre 0 a 14. Cuando el valor de pH se encuentra entre 0 y menor que 7 se denomina como sustancia ácida, cuando el valor es de 7 la sustancia es neutra y si el valor se encuentra entre mayor a 7 y 14 la sustancia se la define como alcalina o básica. Se lo puede alimentar con un voltaje de 3.3 a 5V que a su vez el consumo de corriente eléctrica

estaría entre 5 a 10mA. En la figura 37 se observa al sensor pH que está compuesto por la placa de circuito y la sonda. (Scidle, s.f.).

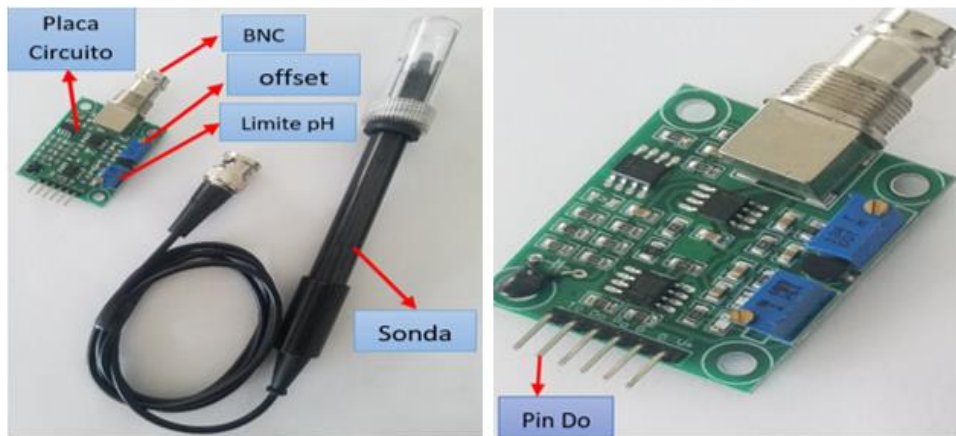


Fig. 37. (a) Elementos del sensor pH 4502C, (b) Placa del sensor pH 4502C.

Fuente: Autor

#### 4.2.3.2.1. Calibración para ocupar con Arduino.

Para garantizar la medición correcta del sensor pH, se debe realizar la calibración del mismo para su primer uso y después de un tiempo prolongado (un mes). La calibración se la realizó de dos puntos con soluciones de pH 7.0 y de pH 4.0. El procedimiento para calibrar el sensor se muestra a continuación. (Scidle, s.f.).

En la figura 37 literal a, en el circuito se puede observar dos potenciómetros, el que se encuentra alado del conector BNC es el offset y el otro es el que limita el nivel de pH.

Offset: Para utilizar el sensor con el Arduino se debe modificar los valores del potenciómetro ya que la sonda emite niveles de voltaje positivos y negativos. Para ello se forzará a un pH 7.0 desconectando la sonda del circuito y cortocircuitando la parte interna con la externa del conector BNC. Y finalmente se ajusta a nivel de tensión de 2.5v verificando con el multímetro en el pin Po. (Scidle, s.f.).

Límite de pH: El potenciómetro se encuentra alado del offset y sirve para configurar el valor límite del circuito del sensor pH, esto hace que se prenda el led rojo y el pin Do se active. (Scidle, s.f.).

Después de configurar el sensor para poder usar con el Arduino de 0 a 5V, hay que calcular el voltaje que nos entrega el sensor con dos niveles diferentes de pH (4.01 y 7.0) estos niveles de pH estables vienen en sobrecitos en polvo o también viene de forma líquida en envases. El motivo de medir el voltaje en dos niveles de pH es para tener una referencia y calcular las constantes "m" y "b" de la fórmula 10. (Scidle, s.f.).

$$y = mx + b \quad (10)$$

Donde “y” es el pH de la sustancia y “x” es el voltaje. Después de medir el voltaje de cada sustancia los valores quedaron así, para el pH 4.01 dio un voltaje de 3.04 y para el pH 7.0 se obtuvo el voltaje de 2.49. (Scidle, s.f.). Por lo tanto, la ecuación sería:

Con  $y = 7$

$$7 = m(2.49) + b$$

Con  $y = 4.01$

$$4.01 = m(3.04) + b$$

A continuación, resolvemos la ecuación por el método de reducción y se obtiene que:

$$m = -5.44$$

Sustituimos  $m$  en una de las ecuaciones para encontrar  $b$ :

$$b = 20.54$$

Sustituimos los valores  $m$  y  $b$  en la ecuación 10 y finalmente la ecuación es:

$$y = -5.44x + 20.54$$

La ecuación  $y = -5.44x + 20.54$ , se graficó a través del software de Matlab para determinar el pH en función del voltaje emitido por el sensor, (figura 38). El código del programa de la figura se muestra a continuación.

```
x= 1:0.01:4
```

```
y=-5.44*x + 20.54
```

```
plot (x,y)
```

```
grid on
```

```
xlabel 'Voltaje'
```

```
ylabel 'pH'
```

```
title 'pH en función del voltaje del sensor'
```

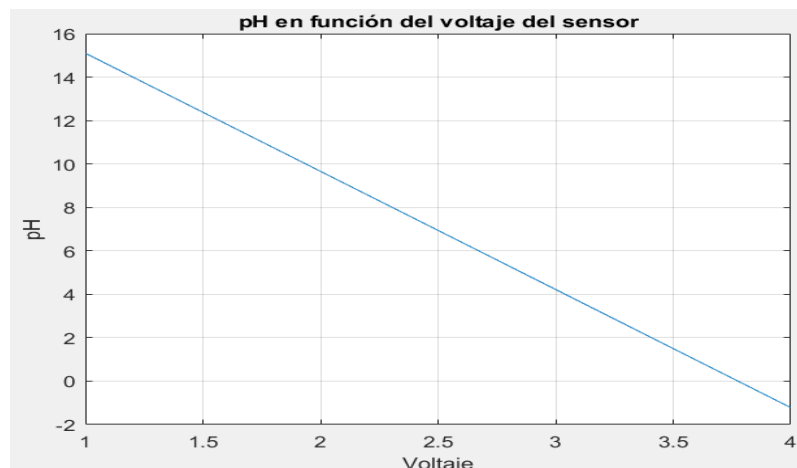


Fig. 38. Nivel de pH en función del voltaje del sensor

Fuente: Autor

#### 4.2.3.2.2. Porcentaje de error de calibración.

Después de haber calibrado el sensor pH, se obtuvo un porcentaje de error en la medición, por lo que al medir las soluciones de pH 7, el sensor daba valores altos y bajos de 6.86 a 7.15, por lo tanto, el porcentaje de error se determinó a través de la regla de 3, donde cuya ecuación es:

$$\%error = \left( \frac{pH_{experimental} - pH_{teórico}}{pH_{experimental}} \right) * 100 \quad (11)$$

Aplicamos la formula, por lo tanto, el error del valor 6.86 es:

$$\%error = -2.041\%$$

El error para el valor 7.15 es:

$$\%error = 2.098\%$$

A partir de los valores de error de  $-2.041\%$  a  $2.098\%$ , se determina que el sensor trabaja con un porcentaje de error promedio de  $\pm 2$ .

#### 4.2.3.2.3. Código para calcular el pH.

EL código se muestra en la figura 39 donde se leen 10 datos del sensor pH en el pin A0 del Arduino, los valores más altos y más bajos se los descarta y datos restantes se realizan una media que a su vez este valor es convertido a voltaje pHVol y finalmente con este valor se obtiene el pH con la ecuación 10.

```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jan27a $
const int analogInPin = A0;
int sensorValue = 0;
unsigned long int avgValue;
float b;
int buf[10],temp;
void setup() {
  Serial.begin(9600);}
void loop() {
  for(int i=0;i<10;i++) {
    buf[i]=analogRead(analogInPin);
    delay(10); }
  for(int i=0;i<9;i++)
  {
    for(int j=i+1;j<10;j++)
    {
      if(buf[i]>buf[j])
      {
        temp=buf[i];
        buf[i]=buf[j];
        buf[j]=temp;
      } }
    avgValue+=buf[i];
  }
  for(int i=2;i<8;i++)
  avgValue+=buf[i];
  float pHVol=(float)avgValue*5.0/1024/6;
  float pHValue = -5.44 * pHVol + 20.54;
  Serial.print("sensor = ");
  Serial.println(pHValue);
  delay(20);
}
```

Fig. 39. Código para calcular el nivel de pH

Fuente: (Scidle, s.f.)

#### 4.2.3.3. Sensor de corriente alterna sct-013-030.

Para medir la corriente que se va a generar se ocupara el sensor de corriente alterna sct-013-030 que es capaz de medir hasta 30A entregando en su salida 1V (30A/1V), este sensor funciona como una pinza amperimétrica, lo cual no es necesario interrumpir el circuito para medir la corriente ya que funciona como un transformador, donde el cable a medir la corriente es considerado como el devanado primario (1 espira), y el dispositivo internamente tiene el devanado secundario que es de 1800 espiras. Solamente se usará una línea de la red monofásica para medir la corriente, si se usaran las dos se obtuviera una lectura de 0, ya que los dos conductores tienen corrientes opuestas. En la imagen 40 se puede observar el sensor de corriente alterna lo cual se cortó el plug de señal de salida para realizar las conexiones con el circuito acondicionador. (Nayla, 2016).



Fig. 40. Sensor de corriente alterna sct-013-030

Fuente: Autor

#### 4.2.3.3.1. Circuito acondicionador de señal.

El sensor de corriente alterna, en su salida emite señal alterna, siendo un problema ya que el rango de las entradas analógicas del Arduino se encuentra dentro de 0 a +5v, cuya señal negativa dañaría al Arduino. El circuito integrado LM358 será el encargado proporcionarnos señal positiva rectificada y nos obviaría la señal negativa, cuyo circuito será alimentado con 5v. En la figura 41 se aprecian las conexiones que se hará en el circuito integrado con respecto a la alimentación y al sensor de corriente alterna. (Nayla, 2016).

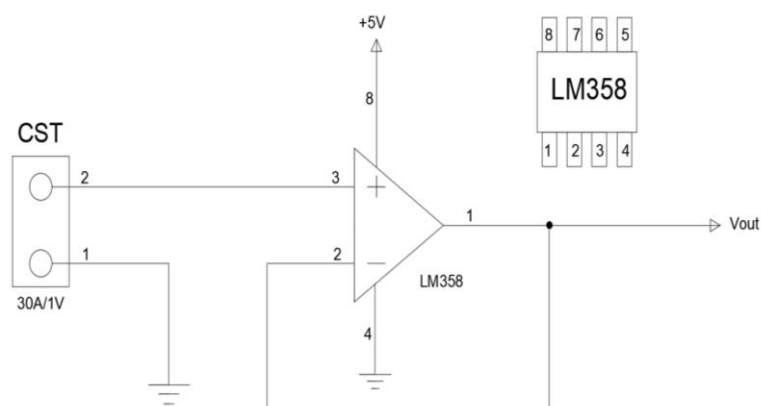


Fig. 41. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030

Fuente: Autor

#### 4.2.3.3.2. Lectura de corriente.

En la figura 42 está la programación para encontrar la corriente a través del sensor, el programa recoge la señal emitida por el sensor y mediante la analogía del sensor de 0 a 1V se medirá la corriente de 0 a 30A, por lo tanto, se calcula el voltaje y finalmente con el valor del voltaje se calcula la corriente a través de la misma analogía. (Nayla, 2016).

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jan27a $
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  analogReference(INTERNAL1V1); //solo Arduino Mega
}

void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0); //Lectura analógica
  float voltajeSensor = analogRead(A0) * (1.1 / 1023.0); //voltaje del sensor
  float corriente=voltajeSensor*30.0; //corriente=VoltajeSensor*(30A/1V)
  Serial.println(corriente,3);//enviamos por el puerto serie
}

```

Fig. 42. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030

Fuente: (Nayla, 2016)

La figura 43, a través del monitor serie y del serial plotter, indica los valores de medición de corriente de un foco de 40W. En la pantalla de serial ploter ubicado a la derecha de dicha imagen se observa los resultados de corriente en forma gráfica en media onda rectificada.

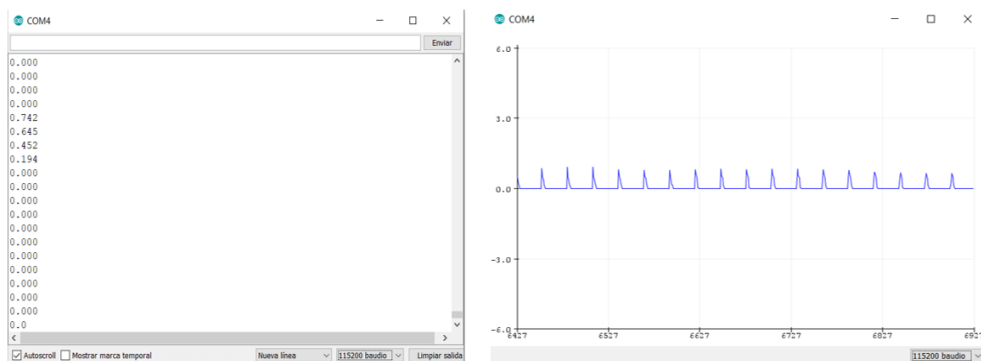


Fig. 43. Visualización de la corriente medida a través del monitor serial y serial plotter

Fuente: Autor

#### 4.2.3.3.3. Cálculo de corriente RMS y Potencia.

Como dato se tiene la corriente en cada instante, lo cual se utilizará para calcular la corriente Irms que finalmente contribuirá para el cálculo de la potencia. La Irms es definida como la corriente capaz de producir el mismo trabajo que en corriente continua o directa. Los aparatos de medición de corriente alterna, están diseñados para medir valores de Irms. (Nayla, 2016). Para el cálculo de la corriente eficaz o Irms se ocupó la siguiente formula:

$$i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

En tiempo discreto llegaría a ser:

$$i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N i_n^2} \quad (12)$$

$i \rightarrow$  es la corriente Irms

$N$  → la cantidad de muestras en un periodo

La ecuación 12 calcula la corriente Irms, y como se va a simular la experimentación del generador eléctrico que tiene voltaje constante de 110V también se puede calcular la potencia.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL);
  //analogReference(INTERNAL1V1); //solo Arduino Mega
}

void loop() {
  float Irms=get_corriente(); //Corriente eficaz (A)
  float P=Irms*110.0; // P=IV (Watts)

  Serial.print("Irms: ");
  Serial.print(Irms,3);
  Serial.print("A, Potencia: ");
  Serial.print(P,3);
  Serial.println("W");
  //delay(100);
}

float get_corriente()
{
  float voltajeSensor;
  float corriente=0;
  float Sumatoria=0;
  long tiempo=millis();
  int N=0;
  while(millis()-tiempo<500)//Duración 0.5 segundos(Aprox. 30 ciclos de 60Hz)
  {
    voltajeSensor = analogRead(A0) * (1.1 / 1023.0);////voltaje del sensor
    corriente=voltajeSensor*30.0; //corriente=VoltajeSensor*(30A/1V)
    Sumatoria=Sumatoria+sq(corriente);//Sumatoria de Cuadrados
    N=N+1;
    delay(1);
  }
  Sumatoria=Sumatoria*2;//Para compensar los cuadrados de los semiciclos negativos.
  corriente=sqrt((Sumatoria)/N); //ecuación del RMS
  return(corriente);
}
```

Fig. 44. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030

Fuente: Autor

En la programación de la figura 44 se puede ver que se multiplica por 2 para compensar el semiciclo negativo de la rectificación de media onda que fue anulado por el circuito integrado LM358. Y también el cálculo del RMS se demora 0.5 segundos por el motivo de que debe ser múltiplo del periodo, 30 ciclos de 60Hz. (Nayla, 2016).

El sensor midió la corriente que pasó por el circuito de experimentación que es de 300W de potencia. La potencia promedio medida fue de 300W, el valor varío, pero no paso de los 2W entonces el sensor se encuentra calibrado. Sin embargo, en caso de que los valores del sensor no coincidan, es necesario modificar el valor 30 de la relación 30V/1A hasta que de una lectura correcta y con ello el sensor estaría calibrado. (Nayla, 2016).

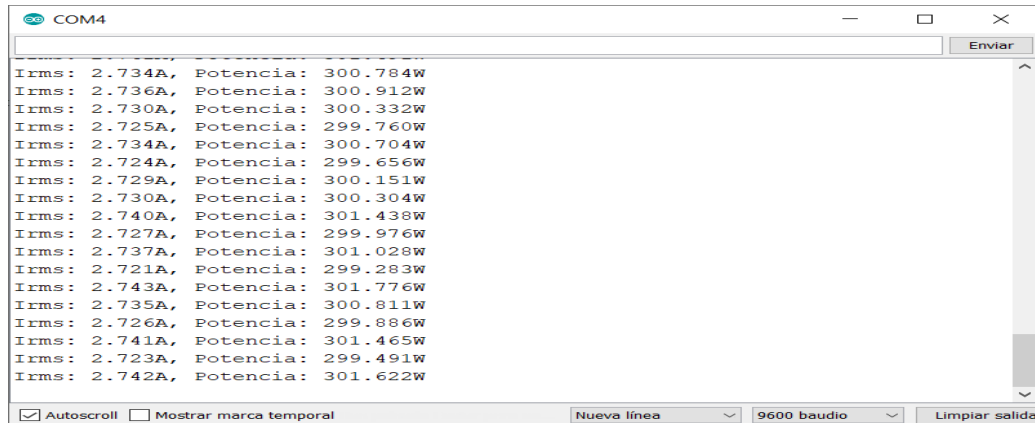


Fig. 45. Diagrama eléctrico del sensor de corriente alterna sct-013-030

Fuente: Autor

#### 4.2.3.3.4. Análisis de error de medición del sensor.

En la figura 45 se observa los valores de medición del sensor de corriente a una carga de 300W, donde el valor más bajo es de 299.283W y el valor más alto es de 301.776W. A través de la regla de 3 ecuación 13 se calcula el error de medición del sensor después de haber realizado a calibración.

$$\%error = \left( \frac{Potencia_{medida} - Potencia_{teórica}}{Potencia_{medida}} \right) * (100) \quad (13)$$

Porcentaje de error en 299.83 es:

$$error = -0.2396\%$$

Porcentaje de error en 301.776 es:

$$error = 0.6\%$$

#### 4.2.3.4. Sensor flujo de agua YF-S201.

El sensor de flujo de agua YF-201 o caudalímetro mide la cantidad de agua que pasa por una tubería de ½" de diámetro por unidad de tiempo (figura 46). El sensor tiene un rotor que está conectado un imán, cuando el agua pase por el sensor, el rotor girará y el imán producirá un campo magnético lo cual activará al sensor tipo hall y este sensor enviará pulsos eléctricos por medio de un conductor que podrán ser leídos por un microcontrolador como el Arduino. El sensor tiene tres conductores o cables los cuales son de color rojo, amarillo y negro. El conductor negro es para la conexión a tierra, el rojo es alimentación que se podrá energizar de 5V DC a 18V DC y el amarillo es la señal del pulso. Para calcular el flujo de agua o caudal, se tiene como dato el valor del volumen de agua para cada pulso que es de 2.25mililitros (tabla 9), ese valor será multiplicado con los valores de pulso en función del tiempo medidos por el sensor. El sensor no es preciso ya cualquier factor como la presión u orientación afectan la

medición, por lo tanto, se debe calibrar con volúmenes de agua conocidos para así llegar a tener una precisión del 10%. (Nayla, 2016).



Fig. 46 Sensor flujo de agua YF-S201

Fuente: Autor

#### 4.2.3.4.1. Especificaciones.

Tabla 9. Características del sensor flujo de agua YF-S201

Fuente: (Nayla, 2016)

Especificaciones	
Nombre	Unidad
Modelo	YF-S201
Voltaje de operación	5V - 18V DC
Consumo de corriente	15mA (5V)
Capacidad de carga	10mA (5 VDC)
Salida	Onda cuadrada pulsante
Rango de Flujo	1-30L/min
Volumen promedio por pulso	2.25mL
Pulsos por litro	450
Factor de conversión	7.5
Rosca externa	1/2" NPS
Presión de trabajo máx	1.75MPa (17 bar)

Temperatura de funcionamiento	-25°C a 80°C
Material	Plástico color negro

#### 4.2.3.4.2. Diagrama de calibración del sensor.

En la figura 47 se muestra la gráfica de calibración con una frecuencia baja de pulso de 16Hz se obtiene 120L/h y con una frecuencia mayor de 90.2 se el volumen de agua es de 720L.

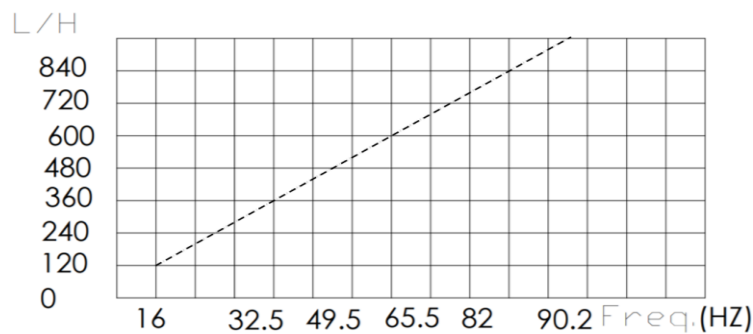


Fig. 47. Diagrama de calibración del sensor

Fuente: (Nayla, 2016)

#### 4.2.3.4.3. Análisis de error de medición.

A través de la figura 48 se observa que después de calibrar el sensor se puede obtener hasta un  $\pm 10\%$  de error en la medición en L/H, por lo tanto, como el flujo de agua en el experimento será 10L/min o 600L/H, entonces el 10% de error de 600L/H se obtendría de la regla de 3 de la siguiente ecuación.

$$error_{flujo\ de\ agua} = \pm \left( \frac{Flujo\ de\ agua * 10\%}{100\%} \right) \quad (14)$$

$$error_{flujo\ de\ agua} = \pm 60L/H$$

Tabla 10. Porcentaje de error.

Fuente: (Nayla, 2016)

Flow (L/H)	Freq.(HZ)	Error range
120L/H	16	$\pm 10$
240L/H	32.5	
360L/H	49.3	
480L/H	65.5	
600L/H	82	
720L/H	90.2	

#### 4.2.3.5. Tarjeta de desarrollo.

El Arduino mega 2560 es una placa de desarrollo de forma rectangular que está constituido principalmente por el microcontrolador ATmega2560, tiene 54 pines digitales que pueden ser usados como entradas y salidas, 16 pines analógicos de entrada, 4 puertos serie, una conexión usb, una entrada para alimentación de la placa, un botón reset y es recomendado para proyectos, (figura 48). (Caisatoa Chulca & Santana Andrade, 2018).

En el prototipo del sistema de monitoreo, el Arduino será el encargado de recopilar la información de los cinco sensores analógicos y digitales. Esta información será enviada hacia la plataforma de Ubidots por medio del módulo shiel ethernet el cual nos dará acceso a internet de forma alámbrica.



Fig. 48. Arduino mega 2560

Fuente: Autor

#### 4.2.3.6. Arduino ethernet shiel w5100.

La placa de Arduino ethernet shiel w5100 de la figura 49, permite conectar a internet a la tarjeta de desarrollo de Arduino mega 2560 de forma alámbrica por medio del cable de red compuesto por conectores rj45 y el cable UTP. La velocidad de datos es de 10/100 (MB) y la comunicación de Arduino mega al módulo ethernet se realiza por el puerto SPI (interfaz de periféricos serie), (figura 49). (Caisatoa Chulca & Santana Andrade, 2018).



Fig. 49. Modulo de Arduino shield Ethernet

Fuente: Autor

#### 4.2.4. Programación en Arduino mega 2560.

Para la obtención y procesamiento de datos se ocupó la tarjeta de Arduino mega 2560. A través del software libre de Arduino se realizó la programación donde el sensor flujo de agua se utilizó como entrada digital del pin D2, el sensor de corriente alterna como entrada analógica del pin A0, el sensor de pH como entrada analógica del pin A1, el sensor temperatura ambiente como entrada digital del pin D3 y el sensor de temperatura del biodigestor como entrada digital del pin D4, como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Pines ocupados en el sistema de monitoreo

Fuente: Autor

Pin	Descripción
A0	Entrada de la señal de Corriente generada
A1	Entrada de la señal de pH
D2	Entrada de señal de flujo de agua
D3	Entrada de señal de Temperatura ambiente
D4	Entrada de señal de Temperatura del biodigestor
Variables de Ubidots	
ID0	Potencia generada
ID1	Nivel de pH
ID2	Flujo de agua
ID3	Temperatura ambiente
ID4	Temperatura del biodigestor

#### 4.2.4.1. Diagrama de flujo, del caudal de agua.

En la figura 50 se observa el diagrama de flujo de recolección de datos del caudalímetro donde la tarjeta Arduino recibe la señal emitida por el sensor flujo de agua y la procesa para obtener el valor de la cantidad de agua que fluirá a través de la tubería de ½", que a su vez cuyo valor es enviado a la plataforma de Ubidots.

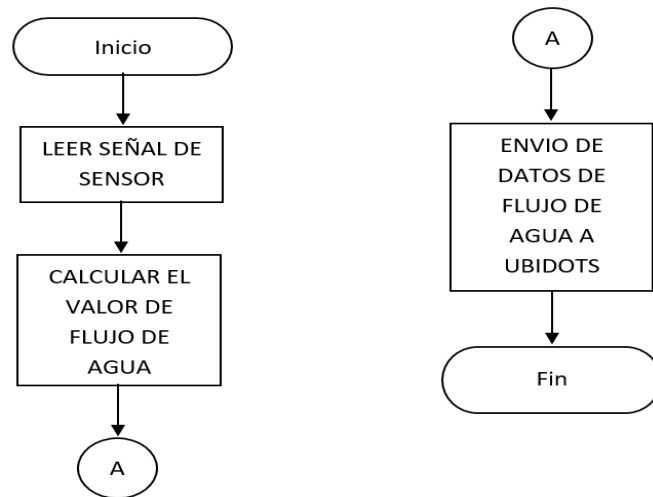
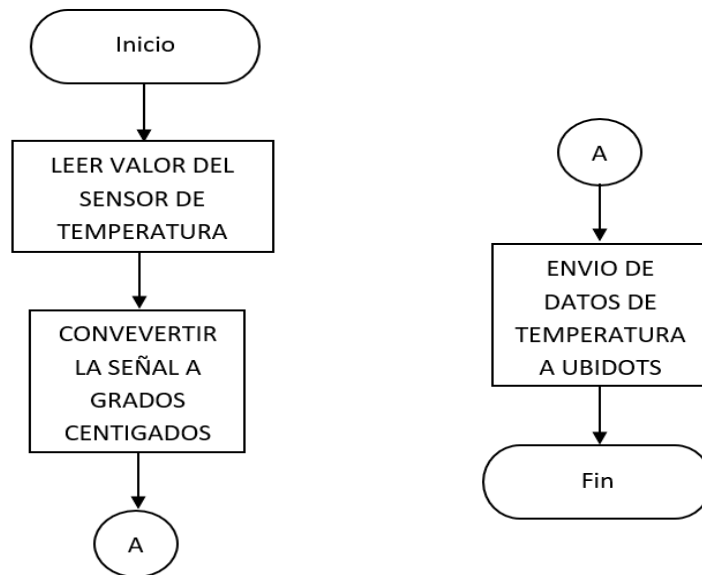


Fig. 50. Diagrama de flujo, caudal de agua

Fuente: Autor

#### 4.2.4.2. Diagrama de flujo de Temperatura.

El diagrama de flujo de la temperatura es el misma para la temperatura ambiente y temperatura del biodigestor, donde la tarjeta Arduino recibe datos del sensor de temperatura y a su vez convierte la señal a grados centígrados, cuyos valores son enviados a la plataforma de Ubidots (figura 51).

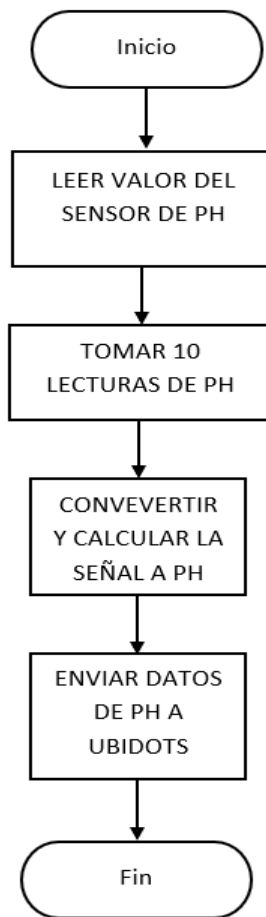


*Fig. 51. Diagrama de flujo, temperatura*

Fuente: Autor

#### **4.2.4.3. Diagrama de flujo del potencial de hidrogeno (pH).**

Para obtener los valores de pH, se ubica la sustancia en el sensor, después el Arduino mega recoge 10 datos del sensor que a su vez estos son promediados y convertidos a datos de pH que finalmente son enviados a la plataforma de Ubidots, (figura 52).



*Fig. 52. Diagrama de flujo, pH*

Fuente: Autor

#### **4.2.4.4. Diagrama de flujo del sistema de monitoreo.**

El programa del sistema de monitoreo establecerá una comunicación con Ubidots para enviar los datos obtenidos de cada uno de los sensores a la plataforma, (figura 53).

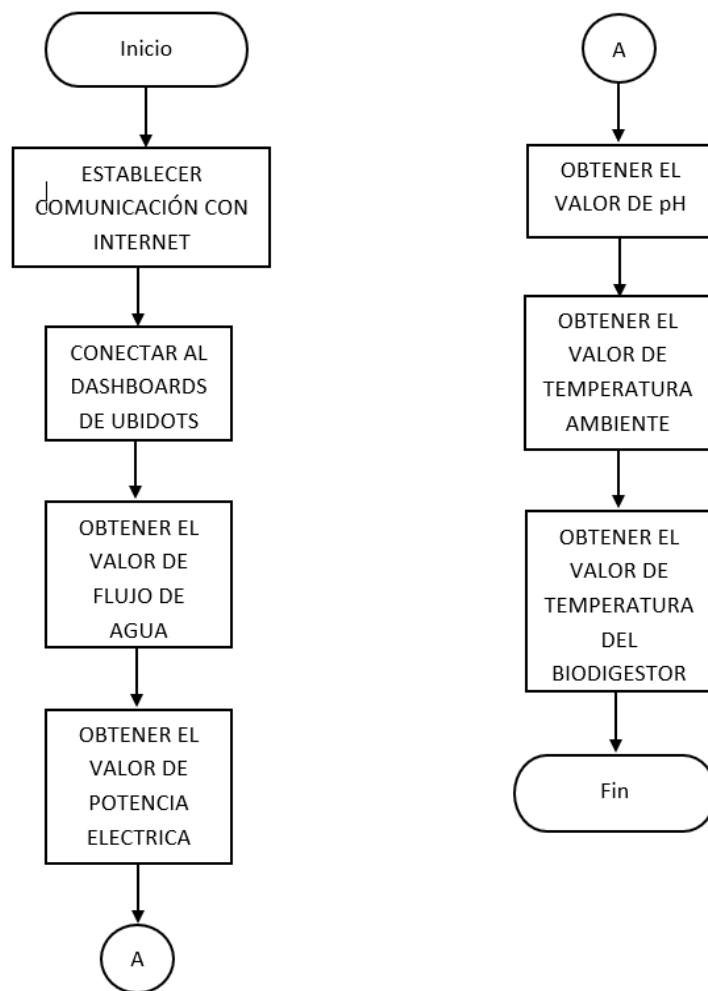


Fig. 53. Diagrama de flujo, sistema de monitoreo

Fuente: Autor

#### 4.2.5. Plataforma Ubidots.

Se utilizó la plataforma de Ubidots en el sistema de monitoreo para visualizar en tiempo real los datos de los sensores pH, flujo de agua, potencia generada, temperatura ambiente y del biodigestor. Además, con Ubidots podemos acceder a los datos con fecha y hora, enviar alertas al correo electrónico, por mensajes de texto, por telegrama, llamadas de voz, etc. Así mismo la plataforma permite realizar proyectos para la educación sin ningún costo, con un tiempo limitado de 30 días gratis, y para proyectos que no estén sujetos a temas de educación tiene un costo.

Para usar la plataforma de IOT de Ubidots es necesario registrarse creando una cuenta, donde nos piden llenar los siguientes ítems, el nombre de usuario, email, nombre del proyecto o aplicación y una contraseña como se observa en la figura 54.

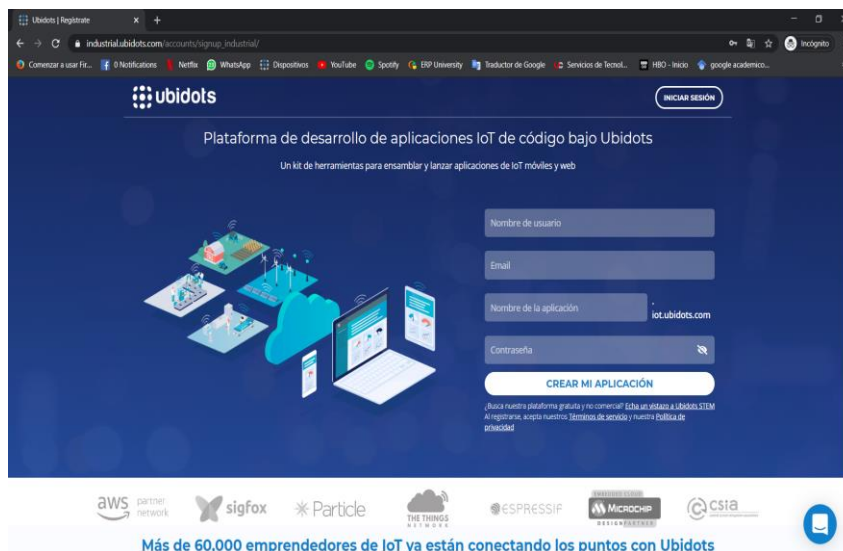


Fig. 54. Página web de Ubidots

Fuente: Autor

Después haber creado la cuenta se debe agregar un dispositivo, que a su vez dentro del dispositivo se crearan las cinco variables para el sistema de monitoreo. Ubidots nos proporciona un token para poder establecer la comunicación entre el Arduino y Ubidots, como se puede apreciar en la figura 55.

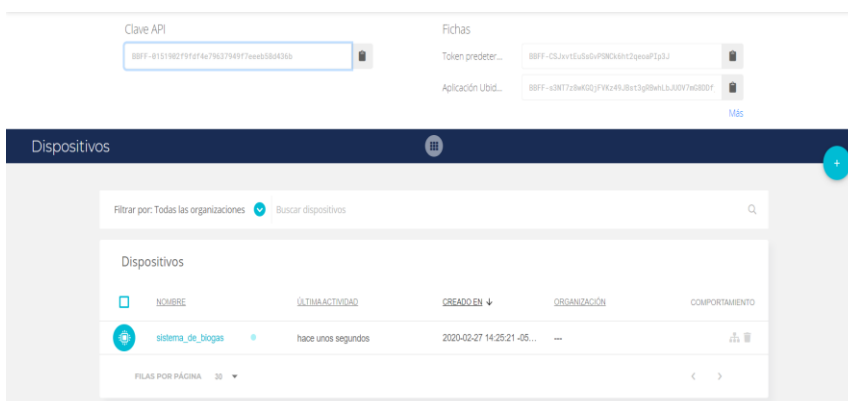


Fig. 55. Comunicación entre Arduino y Ubidots a través del token

Fuente: Autor

A continuación, se agregan las cinco variables en el dispositivo creado llamado "sistema\_de\_biogas". Cada una de las variables tiene su respectivo ID lo cual podrá ser identificado en la programación de Arduino y así enviar los datos de cada sensor a la respectiva variable creada en Ubidots. En la figura 56 se puede observar cada una de las variables del sistema de monitoreo.

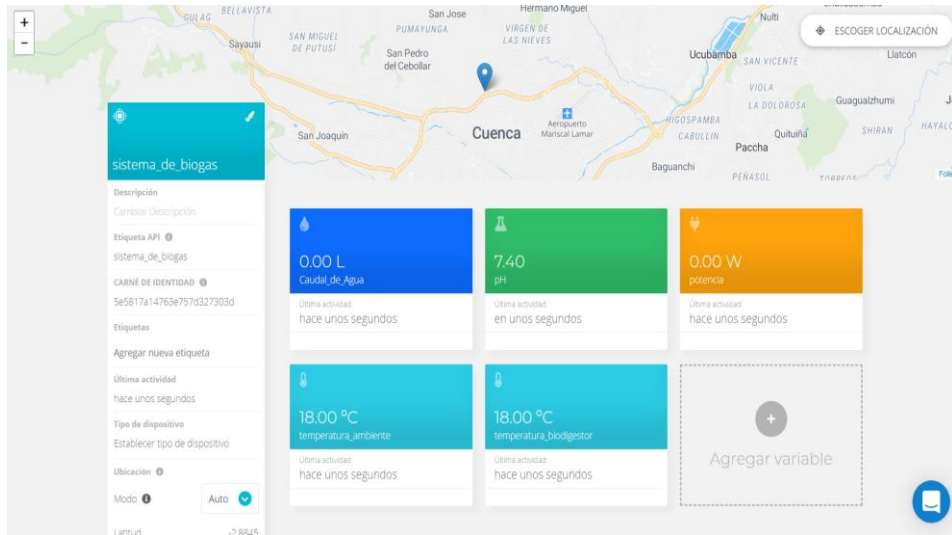


Fig. 56. Visualización de datos de sensores en Ubidots

Fuente: Autor

Y finalmente en la figura 57 se puede apreciar cómo se visualizarán los datos de los diferentes sensores tanto en el navegador de internet como en la aplicación de Ubidots.



Fig. 57. Ventana de sensores en Ubidots

Fuente: Autor

#### 4.2.5.1. Base de datos.

Ubidots tiene la ventaja de almacenar los datos de los sensores con fecha y hora, donde cuya información se podrá extraer asignándole un correo electrónico a Ubidots y este nos enviara un link de descarga de los datos en la fecha que se le asignó (figura 58).

Fig. 58. Descarga de datos de Ubidots

Fuente: Autor

#### 4.2.5.2. Eventos desde Ubidots.

Los eventos nos notifican si algún valor de los sensores se pasó del límite establecido a través del email, sms, llamada de voz, telegrama, etc. Se pueden realizar las alertas a los sensores que se desee, en este caso se realizó en el nivel de pH de la sustancia del biodigestor que nos avisa al email si el nivel de pH es menor a 5.5 o mayor que 7.5, (figura 59) .

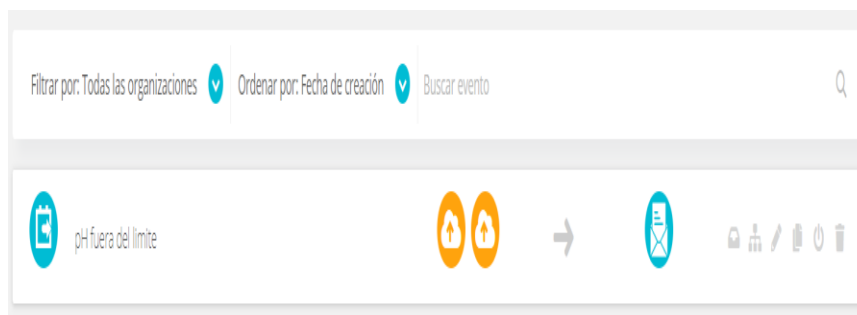


Fig. 59. Eventos de Ubidots

Fuente: Autor

## CAPITULO 5

### ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 5.1. Resultados experimentales

##### 5.1.1. Datos de pH

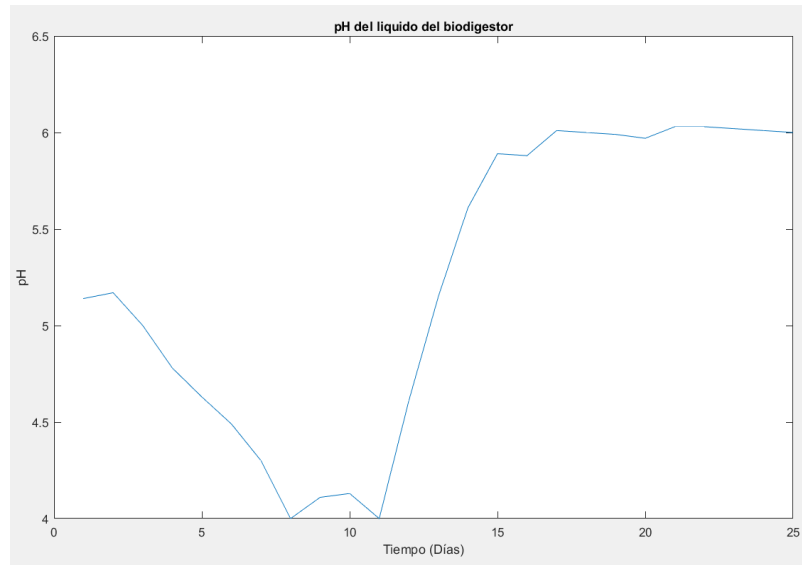
Para medir el pH de la sustancia del biodigestor, las muestras fueron recogidas en dónde sale el efluente del biodigestor. Las mediciones se realizó en toda la fase de experimentación, obteniendo un promedio de pH en la fase estable de 6, denotando la sustancia como ligeramente ácida, en la tabla 12 se muestra el pH, la fecha y el número de datos.

Tabla 12. Datos de pH en la fase estable

Fuente: Autor

No. de datos	Fecha	pH
1	01/02/2020	5.14
2	03/02/2020	5
3	06/02/2020	4.49
4	09/02/2020	4.11
5	12/02/2020	4.61
6	15/02/2020	5.89
7	18/02/2020	6
8	21/02/2020	6.03
9	24/02/2020	6.01
10	25/02/2020	6

El valor de pH en el sexto día de experimentación comenzó a disminuir, por lo que se procedió a realizar un tratamiento para el elevar el nivel de pH. El manual de Puxin sugiere utilizar cal o ceniza para mejorar el pH, no obstante, se utilizó cal, lo cual se obtuvo un resultado satisfactorio ya que mejoró el pH a un promedio de 6, (figura 60).



*Fig. 60. pH en la fase de experimentación*

Fuente: Autor

### **5.1.2. Datos de temperatura ambiente y del biodigestor.**

El sensor ds18b20 registro variación de temperatura en el transcurso del día, en ciertas madrugadas la temperatura llegaba hasta los 15 °C, mientras que en las tardes en algunas ocasiones y de muy pocas horas llegaba a ser de 22 °C, (tabla 13). Con estos márgenes se deduce que el experimento se realizó en el rango Psicrófilico entre óptimo y máximo a un tiempo de fermentación de 100 días, (tabla 5).

#### **5.1.2.1. Temperatura ambiente.**

Tabla 13. Datos de temperatura ambiente por cada 2 días

Fuente: Autor

No. de datos	Fecha	°C
1	01/02/2020	19
2	03/02/2020	20
3	06/02/2020	19
4	09/02/2020	19
5	12/02/2020	19
6	15/02/2020	19
7	18/02/2020	19
8	21/02/2020	20
9	24/02/2020	19
10	25/02/2020	19

#### **5.1.2.2. Temperatura del biodigestor.**

El reactor está protegido para que no haya cambios bruscos de temperatura, notándose que cuando la temperatura ambiente cambiaba, la temperatura del reactor se mantenía y después de alrededor de una hora la temperatura se igualaba (tabla 14).

Tabla 14. Datos de temperatura de biodigestor por cada 2 días

Fuente: Autor

No. de datos	Fecha	°C
1	01/02/2020	19
2	03/02/2020	20
3	06/02/2020	19
4	09/02/2020	19
5	12/02/2020	19
6	15/02/2020	19
7	18/02/2020	19
8	21/02/2020	19
9	24/02/2020	19
10	25/02/2020	19

### **5.1.3. Datos de corriente y voltaje.**

#### **5.1.3.1. Datos de voltaje.**

Los datos de voltaje proporciono el generador ya que este viene de fabrica con un voltímetro. En el experimento de generación de energía, el voltaje se mantuvo constante a 110v en corriente alterna, (tabla 61).



*Fig. 61. Voltaje del generador eléctrico a biogás*

Fuente: Autor

### **5.1.3.2. Datos de corriente.**

La corriente eléctrica se midió en dos dispositivos, con en el sensor de corriente alterna sct-013-030 y con el multímetro digital KT87N de pinza de corriente AC-DC. Los valores de los dos aparatos de medición variaron en miliamperios dando una lectura de corriente similar en los dos dispositivos. El valor de corriente medido fue de 2.73A, en la imagen 62 se puede observar el censado de corriente por el multímetro digital KT87N.



*Fig. 62. Corriente eléctrica del circuito*

Fuente: Autor

#### 5.1.4. Biogás producido.

En toda la fase de experimentación con la ayuda del medidor se realizó el registro de la cantidad de biogás producido diariamente, donde los valores medidos se encuentran en la tabla 15.

Tabla 15. Datos de producción de biogás.

Fuente: Autor

No. de datos	Fecha	m <sup>3</sup>
1	01/02/2020	0.001
2	03/02/2020	0.015
3	06/02/2020	0.071
4	09/02/2020	0.148
5	12/02/2020	0.641
6	15/02/2020	0.94
7	18/02/2020	1.002
8	21/02/2020	1
9	24/02/2020	1.001
10	25/02/2020	1

En la figura 64 se aprecia como la producción de biogás va aumentando diariamente por la estabilización de las bacterias anaeróbicas.

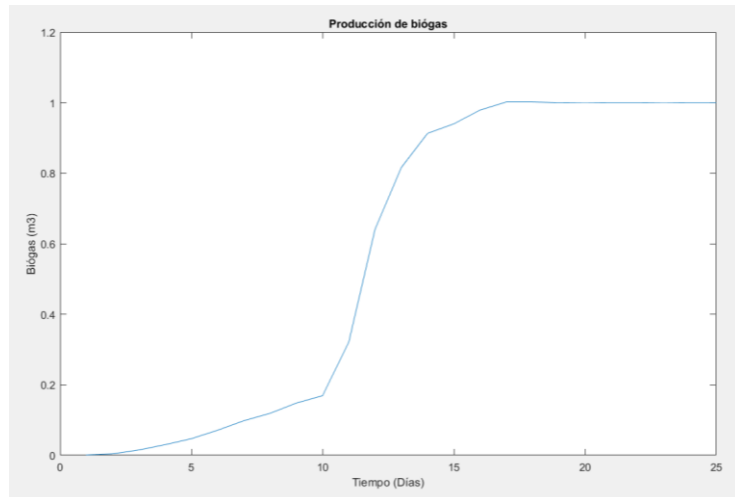


Fig. 64. Producción de biogás en la fase de experimentación

Fuente: Autor

El medidor de biogás viene de fabrica con una lectura de  $0\text{m}^3$ , a partir de este dato hasta los  $10.188\text{m}^3$  se ocupó para realizar pruebas en el laboratorio. Las pruebas se realizaron con una carga de  $25\text{kg}$  de residuos orgánicos de cocina, a la espera de un día y después del experimento de generación de eléctrica, el medidor registraba en los 6 días lecturas promedios de producción de biogás de  $1\text{m}^3$ , (figura 63).



Fig. 63. Medición de  $1\text{m}^3$  de biogás

Fuente: Autor

## 5.1.5. Generación de energía eléctrica.

### 5.1.5.1. Carga eléctrica.

En el circuito de la carga eléctrica, se utilizó cuatro focos conectados en paralelo, dos ellos de  $40\text{w}$  y los otros dos de  $110\text{w}$ , los cuatro llegaron a obtener una potencia total de  $300\text{w}$ , (figura 65).



*Fig. 65. Carga eléctrica de la experimentación*

Fuente: Autor

### **5.1.5.2. Generación eléctrica.**

En la fase de generación eléctrica a biogás, se dedujo que el generador proporcione energía eléctrica a la carga lumínica de 300w durante 57 minutos (0.95h).

#### *5.1.5.2.1. Cálculo de energía generada en un día.*

Como dato se tiene la corriente de 2.73A y el voltaje de 110V

$$P = V * I \quad (15)$$

$$P = (110)*(2.73)$$

$$P = 300W$$

Pasamos de minutos a horas por regla de tres

$$57 \text{ minutos} = 0.95 \text{ horas}$$

Por lo tanto, la energía eléctrica producida en un día se expresa de la siguiente manera:

$$E_{elec} = 285wh/día$$

Pasamos a Kw

$$E_{elec} = 0.285Kwh/día$$



Fig. 66. Experimentación de generación eléctrica

Fuente: Autor

#### 5.1.6. Eficiencia del sistema obviando el consumo eléctrico de la planta de biogás.

Para determinar la eficiencia del sistema de biogás-electricidad sin contar con el consumo eléctrico en la experimentación, se inicia tomando en cuenta que el biodigestor produjo un promedio de  $1\text{m}^3$  de biogás por día, a una temperatura de  $19^\circ\text{C}$  y pH de 6. A partir de dicha calidad de biogás el generador eléctrico pudo producir  $285\text{Wh/d}$  en 57 minutos. Con estos datos se calcula a continuación la eficiencia del sistema de biogás.

Donde,

$$1\text{m}^3/\text{día} = 1000\text{dm}^3/\text{día}$$

A continuación, se calcula la eficiencia que viene siendo:

$$\eta = \frac{E_{\text{salida}}}{E_{\text{entrada}}} * 100 \quad (16)$$

$$\eta = \frac{285}{1000} * 100$$

$$\eta = 28.5\%$$

Tabla 16. Datos de eficiencia

Fuente: Autor

Tiempo (días)	Potencia (W)	Eficiencia (%)
01 al 16	0	0
17	287	28.5
18	287	28.5
19	285	28.5
20	285	28.5
21	284	28.5
22	284	28.5
23	285	28.5
24	285	28.5
25	285	28.5

A continuación, se grafica la eficiencia del sistema de biogás, donde al inicio del experimento hasta el día 16 la eficiencia es cero ya que el generador no encendía por que el nivel de pH fue muy bajo (tabla 16). A partir del día 17 se observa la eficiencia del sistema a un 28.5% lo cual permaneció así hasta el último día de experimentación por lo que los valores de pH y temperatura no variaron significativamente, (figura 67).

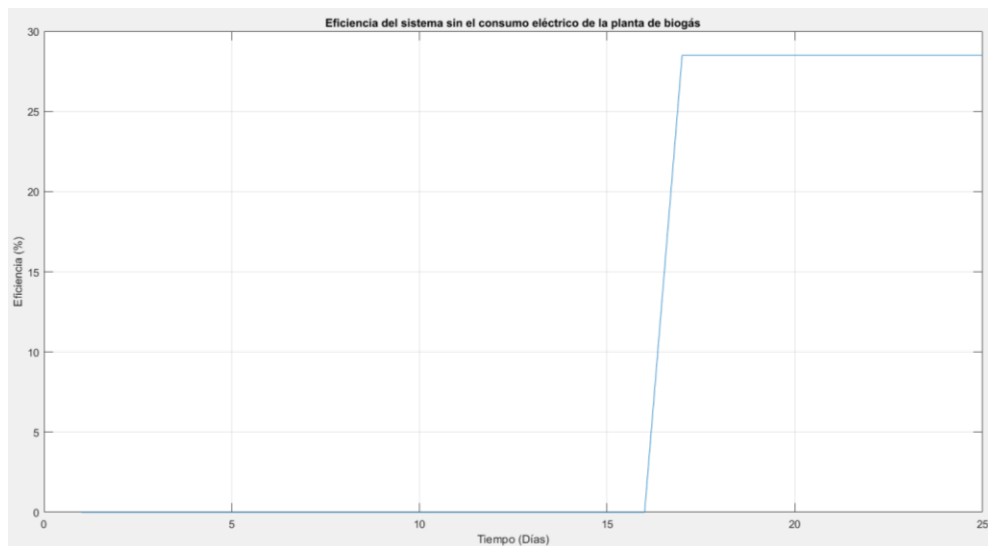


Fig. 67. Eficiencia del sistema de biogás en la fase de experimentación

Fuente: Autor

### 5.1.7. Eficiencia del sistema

Para la eficiencia del sistema, se considera el consumo de los aparatos eléctricos que aportan para que funcione el sistema de biogás-electricidad, los cuales son, la licuadora o trituradora industrial que consumió 150W/h/día, por lo que se ocupó la programación de

licuado de 30 segundos para 4 licuadas y se asignó 50W por el tiempo de encendido, la bomba que mezcló las sustancias orgánicas durante 15min/día logrando consumir 31.25Wh/día y el generador de presión de biogás que consume 14.25Wh/día tras 57min de encendido, (Tabla 17). El total de dicho consumo fue de 195.5Wh/día, lo cual se resta a la generación total de electricidad de 285Wh/día, por lo tanto, se obtuvo 89.5Wh/día. Con este resultado calculamos la eficiencia final del sistema.

Como,

$$E_{entrada} = 1\text{m}^3/\text{día} = 1000\text{dm}^3/\text{día}$$

$$E_{salida} = 89.5\text{Wh}/\text{día}$$

Posteriormente se calcula la eficiencia (Ecuación 16) que viene siendo:

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}} * 100$$

$$\eta = \frac{89.5\text{Wh}/\text{día}}{1000\text{dm}^3/\text{día}} * 100$$

$$\eta = 8.95\%$$

Tabla 17. Consumos diarios de los aparatos eléctricos de la planta de biogás

Fuente: Autor

Consumos diarios de los aparatos eléctricos del sistema biogás-electricidad				
Parámetros	Potencia	Tiempo de consumo	Consumo diario	Consumo diario en kWh/día
Licuadora industrial	3000W	3min	150Wh/día	0.150
Bomba de recirculación	125W	15min	31.25Wh/día	0.03125
Compresor	15W	57min	14.25Wh/día	0.01425
Total			195.5Wh/día	0.1955
Compresor	15W	4 horas	60Wh/día	0.06
Total			241.3Wh/día	0.2413

A continuación, se grafica la eficiencia del sistema en la fase de experimentación, donde al inicio del experimento hasta el día 16 la eficiencia es cero ya que se considera ese tiempo para la estabilización del sistema de biogás. A partir del día 17 se observa la eficiencia del sistema a un 8.95% en la figura 68, lo cual se estimó esa eficiencia por el consumo de los

equipos eléctricos ocupados en la experimentación y también los parámetros de temperatura y pH que no estuvieron en el rango sugerido.

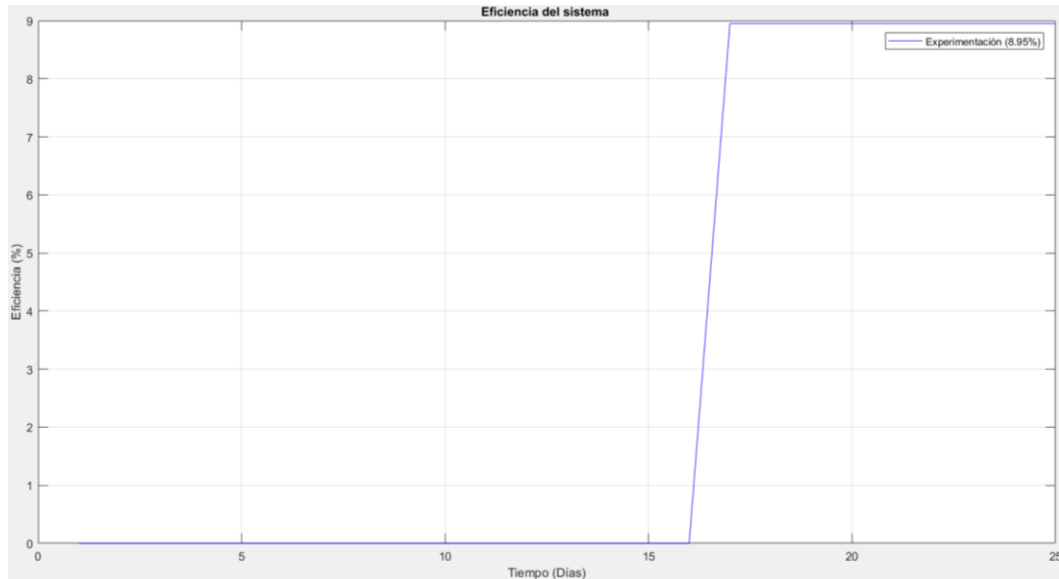


Fig. 68. Eficiencia del sistema en la fase experimentación

Fuente: Autor

## 5.2. Simulación de resultados experimentales

### 5.2.1. Producción de biogás.

Para la simulación de producción de biogás se utilizó el modelado ADM1, todas las constantes ocupadas de dicho modelado se modificaron con el objeto de acercarse a los resultados obtenidos en la fase de experimentación que, a su vez, dichas constantes serán ocupadas por la simulación en la amazonia. Por lo tanto, en la simulación se ocupó el rango mínimo de la fermentación mesofílico (15 - 20 °C) o (288.15- 293.15 K), ya que estuvieron dentro del rango de las temperaturas bajas, promedio y altas. Se ocupó el pH promedio de la experimentación que fue de 6. Los datos del sistema de biogás y constantes utilizadas para la simulación, se encuentran en el anexo 3. El resultado de la simulación determinó una producción promedio de biogás de 1.012m<sup>3</sup>, a un contenido de 0.437m<sup>3</sup> de metano (CH<sub>4</sub>) de porcentaje de 43.21%. Obviando el porcentaje de sulfuro de hidrógeno y vapor de agua ya que son filtrados antes de medir el biogás, el hidrogeno también no se tomó en cuenta por que los niveles fueron demasiados bajos. Por lo tanto, el dióxido de carbono llegó a tener un contenido de 0.563m<sup>3</sup> con un porcentaje de 56.79 %, (tabla 19).

Tabla 18. Valores de entrada para la simulación experimental

Fuente: Autor

<b>Valores de entrada para la simulación</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tbase	288.15
Top	293.15
Vliq	1.7m <sup>3</sup>
Vgas	1.3m <sup>3</sup>
pH	6

Tabla 19. Valores generados por la simulación experimental

Fuente: Autor

<b>Valores medios</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
qgas	1.012m <sup>3</sup>
CH4	43.21%
CO2	56.79%

### 5.2.1.1. Poder calorífico.

Como el resultado de metano en la simulación fue de 43.21%, se calcula el poder calorífico del gas. Como dato de Puxin se tiene que el poder calorífico del biogás que es de 5142kcal, de ahí se extrae el poder calorífico en función del porcentaje de metano, por lo tanto, el poder calorífico del metano es:

$$P_{ch4} = 2221kcal$$

Luego pasamos a kwh

$$P_{ch4} = 2.5kwh$$

En la tabla 20 se aprecian los valores que serán ocupados para la predicción de la generación eléctrica, donde se encuentra el consumo de los aparatos eléctricos del sistema de biogás, el valor del poder calorífico del metano calculado y la eficiencia del bio-generador.

Tabla 20. Datos técnicos del sistema de biogás de 3.4m<sup>3</sup> de Puxin y datos calculados

Fuente: Autor

Especificaciones técnicas	
Potencia del compresor de biogás	15 W
Potencia de la bomba de recirculación	125 W
Producción máxima de biogás	1.012m <sup>3</sup>
Poder calorífico del metano	2.5kwh
Eficiencia del sistema de generación	30%
Trituradora o licuadora industrial	3000W

## 5.2.2. Generación eléctrica.

### 5.2.2.1. Simulación en Matlab.

La ecuación 9 se describirá en el diagrama de bloques de simulink de la siguiente manera, Q<sub>g</sub> es la producción máxima de biogás, P<sub>ch4</sub> es el porcentaje de metano en el biogás, H<sub>c</sub> es el poder calorífico del metano, N<sub>elec</sub> es la eficiencia del generador eléctrico, Ebom es la energía de la bomba de recirculación que funcionara ¼ de hora al día, Ecomp es la energía del compresor de biogás de 57 minutos de uso y E<sub>lic</sub> es la energía de la licuadora o trituradora industrial que consumió 150W/h/día, por lo que se ocupó la programación de

licuado de 30 segundos para 4 licuadas y se asignó 50W por el tiempo de encendido, (ver tabla 17). Los datos de la ecuación se ingresan al workspace y mediante los bloques “constant” y “Goto” se envía al diagrama de bloques, (figura 69).

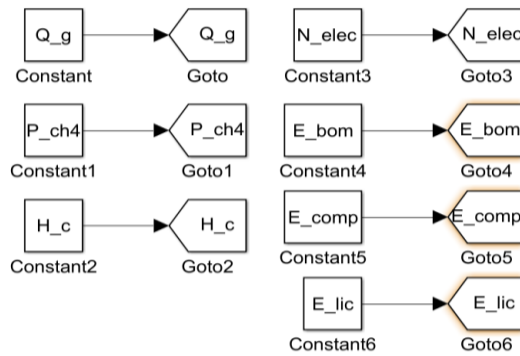


Fig. 69. Variables de modelado de generación eléctrica

Fuente: Autor

Los bloques que envían los datos al simulink se encuentran en el subsistema “Parámetros”. Después de resolver la ecuación, el diagrama de bloques envía el resultado con la etiqueta “E\_elec” al Workspace y también se podrá visualizar a través del bloque “Display ” y “Display 1”. La energía eléctrica generada del sistema de biogás fue de 328Wh/día o 0.328kWh/día, y la energía eléctrica considerando el consumo eléctrico fue de 133W o 0.133kWh/día (figura 70).

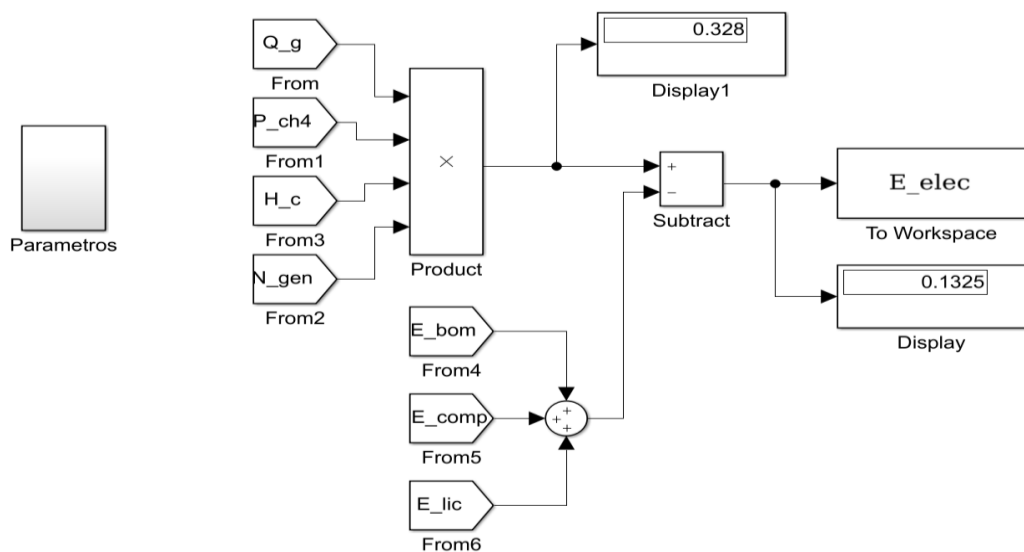


Fig. 70. Diagrama de bloques del modelado

Fuente: Autor

### 5.2.3. Eficiencia del sistema sin considerar el consumo eléctrico de la planta de biogás.

En la fase de simulación de la experimentación se produjo 1.012m<sup>3</sup> de biogás por día, a una temperatura promedio de 19 °C y a un pH de 6. A partir de dicha calidad de biogás el generador eléctrico pudo producir 328Wh/d. Con estos datos se calcula a continuación el flujo de biogás en relación con la potencia generada para posteriormente calcular la eficiencia del sistema de biogás.

Donde,

$$1.012\text{m}^3/\text{día} = 1012\text{dm}^3/\text{día}$$

A continuación, se calcula la eficiencia que viene siendo:

$$E_{\text{salida}} = 328\text{Wh}/\text{día}$$

$$E_{\text{entrada}} = 1012\text{dm}^3/\text{día}$$

$$\eta = \frac{E_{\text{salida}}}{E_{\text{entrada}}} * 100 \quad (16)$$

$$\eta = \frac{328}{1012} * 100$$

$$\eta = 32\%$$

A continuación, se grafica la eficiencia del sistema sin considerar el consumo de electricidad por parte de la planta de biogás, donde al inicio del experimento hasta el día 16 la eficiencia es cero ya que se considera ese tiempo para la estabilización del sistema de biogás. A partir del día 17 se observa la eficiencia del sistema a un 32% en la figura 71, lo cual se estimó esa eficiencia siempre y cuando el pH sea de 6 o cerca de ese valor y la temperatura promedio de 19 °C.

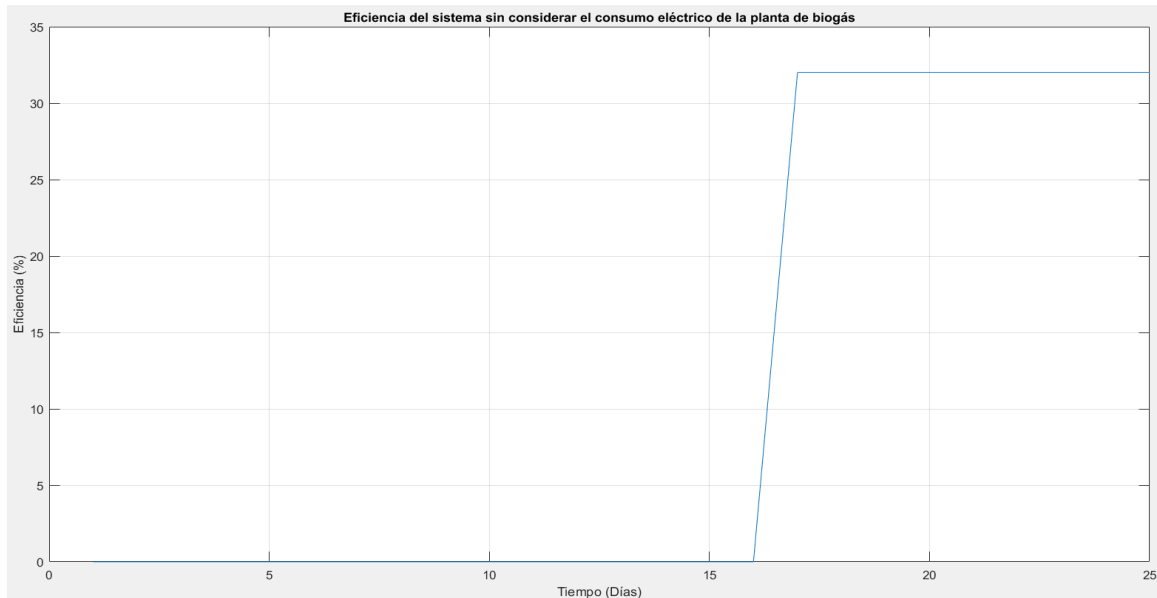


Fig. 71. Eficiencia del sistema de generación en la fase simulación

Fuente: Autor

#### 5.2.4. Eficiencia del sistema.

Se considera el consumo de los aparatos eléctricos que aportan con la producción de biogás y generación de electricidad los cuales son, la licuadora o trituradora industrial, la bomba que mezcla las sustancias orgánicas y el generador de presión de biogás, (tabla 17). Dicho consumo se resta a la generación total de electricidad lo cual se observa en la figura 72, donde el resultado de dicha diferencia es de 0.133kWh/día o 133Wh/día, (figura 70). Con este resultado calculamos la eficiencia final del sistema.

Donde,

$$E_{entrada} = 1.012\text{m}^3 = 1012\text{dcm}^3$$

$$E_{salida} = 133\text{Wh/día}$$

Posteriormente se calcula la eficiencia (Ecuación 16) que viene siendo:

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}} * 100$$

$$\eta = \frac{133}{1012} * 100$$

$$\eta = 13\%$$

A continuación, se grafica la eficiencia del sistema en la fase de simulación, donde al inicio del experimento hasta el día 16 la eficiencia es cero ya que se considera ese tiempo para la

estabilización del sistema de biogás. A partir del día 17 se observa la eficiencia del sistema a un 13 % en la figura 72, lo cual se estimó esa eficiencia siempre y cuando el pH sea de 6 o cerca de ese valor y la temperatura promedio de 19 °C.

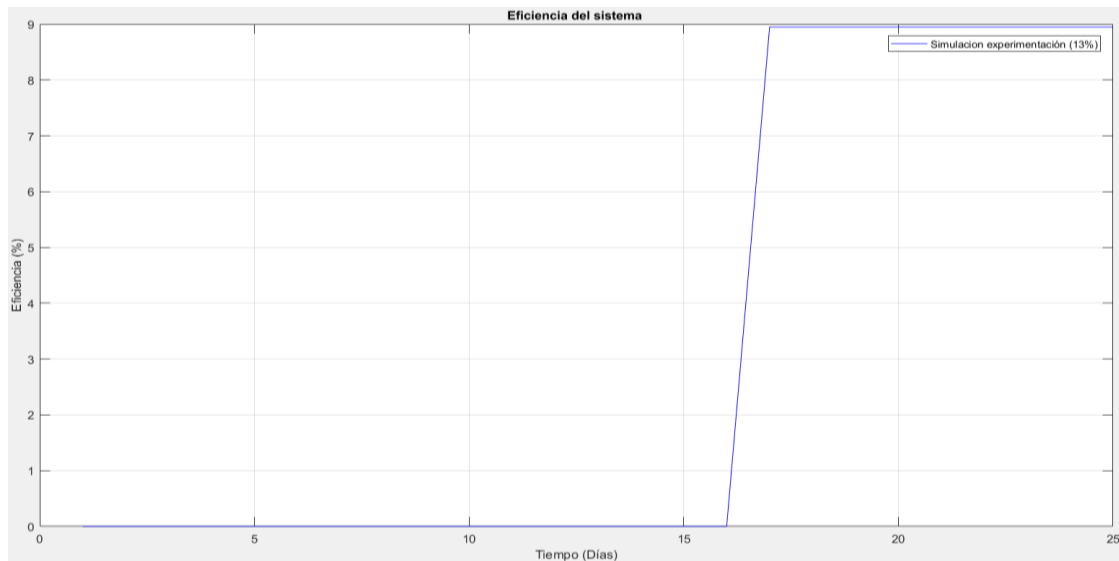


Fig. 72. Eficiencia del sistema en la fase simulación

Fuente: Autor

## 5.2.5. Diferencias entre la experimentación y la simulación de la experimentación.

### 5.2.5.1. Simulación de producción de biogás.

El valor de la experimentación de producción de biogás fue de  $1\text{m}^3$  y el de la simulación fue de  $1.012\text{m}^3$ , lo cual la diferencia no fue grande o considerable, por el simple hecho de que fue una desigualdad de  $12\text{dcm}^3$ .

### 5.2.5.2. Simulación de generación eléctrica.

El valor de la experimentación de generación eléctrica fue de  $285\text{W}$  y el de la simulación fue de  $328\text{W}$ , lo cual se obtuvo una diferencia de  $43\text{W}$ , que representó el 15% de la potencia generada en el experimento. En cuanto a la eficiencia sin considerar el consumo eléctrico hubo una diferencia de 3.5% y con considerando el consumo la diferencia fue de 4.05%.

## 5.3. Validación

En la tabla 21 se aprecia que en la fase de experimentación de producción de biogás con un promedio de temperatura de  $19\text{ }^\circ\text{C}$ , nivel de pH 6 y carga de residuos orgánicos diarios de  $25\text{kg}$ , se adquirió  $1\text{m}^3/\text{día}$  de biogás. En la fase de generación eléctrica con características del biogás de  $1\text{m}^3$  de la experimentación, se obtuvo  $285\text{Wh}/\text{día}$ . En la simulación experimental con los mismos datos obtenidos de la experiencia, en la fase de producción de biogás se obtuvo  $1.012\text{m}^3$ , lo cual su diferencia con lo obtenido en el experimento no fue muy

significativa, siendo  $12\text{dcm}^3$ . Mientras que en la fase de generación eléctrica los datos obtenidos de la simulación experimental, de producción de biogás de  $1.012\text{m}^3$ , porcentaje de metano de 43.21%, poder calorífico de  $2.5\text{kWh}$  y eficiencia del generador eléctrico de 30%, se obtuvo 328W, cuya diferencia con la potencia generada en el experimento es 43W, la diferencia representa el 15% con respecto a la energía eléctrica del experimento.

La eficiencia en la fase de experimentación que se encuentra dividida por la eficiencia sin considerar el consumo eléctrico que es de 28.5% y considerando el consumo que es de 8.95%, esta diferencia se debe a que el consumo de los aparatos eléctricos de la planta de biogás tuvo un gran impacto debido a que el proceso de trituración de residuos orgánicos ocupó  $150\text{W/día}$  por usar la programación de 30s para 4 licuadas (2min) y se consideró 50W por el tiempo de encendido de la máquina. La bomba de agitación consumió 31.5W por ocuparse durante 15min/día. Y finalmente el generador de presión de biogás que consumió  $14.25\text{W/día}$  por ocuparse 57min. Lo cual llega a tener un consumo total de  $195.5\text{W/día}$ , representando el 19.55% de la eficiencia del sistema de biogás electricidad.

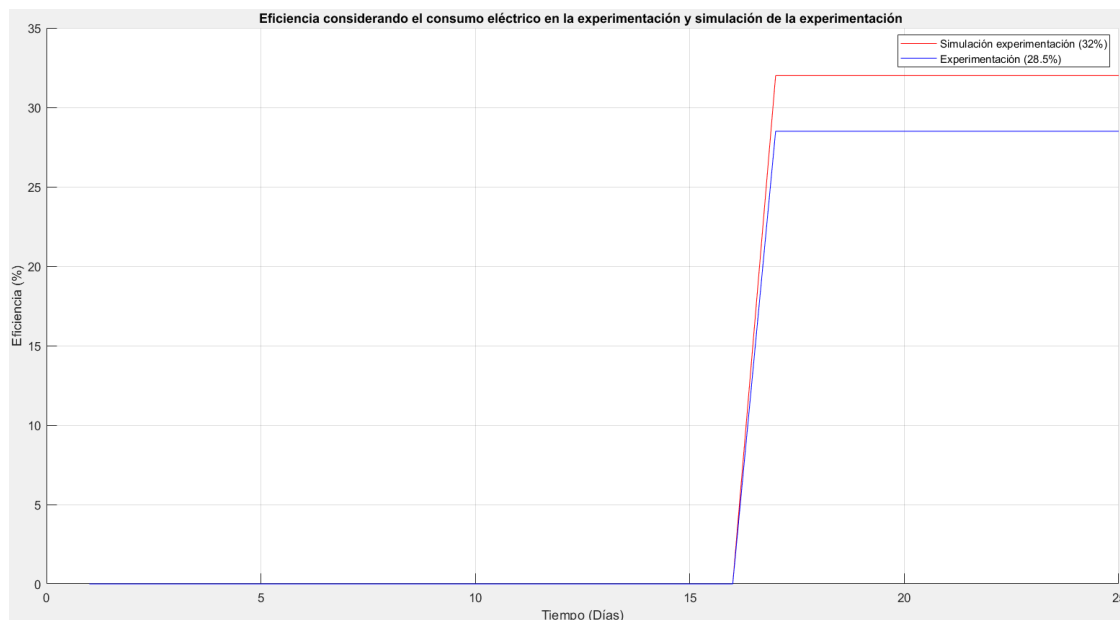
Tabla 21. Resultados promedios del experimento y simulación del experimento

Fuente: Autor

Resultados promedios del experimento, simulación del experimento y simulación en la amazonia		
Parámetros	Experimentación	Simulación de la experimentación
Temperatura	19 °C	19 °C
Carga orgánica	25kg	25kg
pH	6	6
Porcentaje de metano		43.21%
Poder calorífico		2.5kWh/día
Producción de biogás	1m <sup>3</sup>	1.012m <sup>3</sup>
Generación eléctrica	285wh/día	328wh//día
Consumo eléctrico en el sistema biogás - electricidad	195.5Wh/día	195.5Wh/día
Eficiencia sin considerar el consumo eléctrico	28.5%	32%
Eficiencia considerando el consumo eléctrico	8.95%	13%

En la figura 73, se aprecia la eficiencia del sistema biogás-electricidad sin considerar el consumo de los aparatos eléctricos que ayudan para que la planta de biogás funcione. Del día 1 hasta el 16, la eficiencia es 0, ya que en ese lapso de tiempo se consideró para la estabilización del sistema, tanto para el crecimiento bacteriano como para la mejora del nivel de pH. (D.J. Batstone, 2002). En el experimento, los primeros días del tiempo de estabilización, el pH se encontraba en los rangos de 4 a 4.78, (Tabla 12), lo cual se realizó las pruebas de encendido del biogás con dichos niveles de pH, teniendo como resultado la combustión del biogás, pero sin la posibilidad de mantener la llama, del mismo modo se realizó con el generador eléctrico lo cual no encendía, todo esto fue por el motivo de que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) fue de mayor porcentaje comparado con el metano (CH<sub>4</sub>). (Varnero Moreno & Romero, 2011). Pero el día 13 y 16 tras realizar las pruebas con el biogás, se evidencio que combustionaba y mantenía la llama encendida, del mismo modo el generador encendió, pero no generaba más que 550W, pero a medida que el pH mejoraba, aumentaba la generación eléctrica, ya que después del experimento se realizaron pruebas con el nivel de pH entre 6.5 a 7 y el generador producía valores cercanos a la potencia instalada de 1500W. Del día 17 al 26, en la fase de simulación de la experimentación se tiene 32% de eficiencia y en la experimentación se tiene 28.5%, la resta de la experimentación con la simulación es de 3.5%.

En la experiencia, el pequeño margen de error de los aparatos de medida o sensores, como de temperatura de  $\pm 0.2\%$ , sensor pH de  $\pm 2.098\%$ , sensor de flujo de agua de  $\pm 10\%$ , sensor de corriente alterna de  $\pm 0.6\%$ , y la simulación del experimento a través del modelado ADM1 en el diagrama de bloques de simulink, tuvieron como resultado un pequeño margen de desigualdades tanto para producción de biogás como para generación eléctrica. En la figura 73 se puede observar que de dichas diferencias antes mencionadas se obtuvo una mínima diferencia de la eficiencia del sistema tanto para la experimentación como la simulación sin considerar el consumo eléctrico.



*Fig. 73. Eficiencia sin considerar el consumo eléctrico en la experimentación y en la simulación de la experimentación*

Fuente: Autor

En la figura 74, se observa que la fase de simulación de la experimentación se tiene una eficiencia del 13% y en la experimentación se tiene una eficiencia de 8.95%, esta diferencia se debe a que se restó el consumo de los aparatos eléctricos que contribuyen para que funcione la planta de biogás. En la fase de experimentación se obtuvo una generación eléctrica de 285wh/día que fue restada por el consumo eléctrico de 195.5Wh/día, donde cuyo resultado fue de 89.5Wh/día, de ese resultado se concretó la eficiencia en la fase de experimentación de 8.95%. Mientras tanto en la fase de simulación de la experimentación la generación eléctrica fue de 328Wh/día que restando con el consumo de 195.5Wh/día se obtuvo un resultado de 133Wh/día y de cuyo resultado la eficiencia del sistema considerando el consumo eléctrico fue de 13%. La diferencia de la eficiencia de la experimentación con respecto a la simulación fue de 4.05%.

Las constantes del modelado ADM1 que se encuentran en el anexo 2 (2.1.3 Coeficientes y constantes de equilibrio) fueron modificadas en la simulación del experimento con el objeto de adaptarle al sistema de biogás de Puxin, lo cual se acercaron a los valores del biogás obtenidos en la experimentación que fue de 1.012m<sup>3</sup>/día. (D.J. Batstone, 2002).

En la figura 74 se observa una pequeña desigualdad del sistema de biogás considerando el consumo eléctrico tanto para la experimentación como la simulación, dicha diferencia es porque en el sistema de biogás sin considerar el consumo eléctrico ya viene con una pequeña desigualdad lo cual repercutió al considerar el consumo.

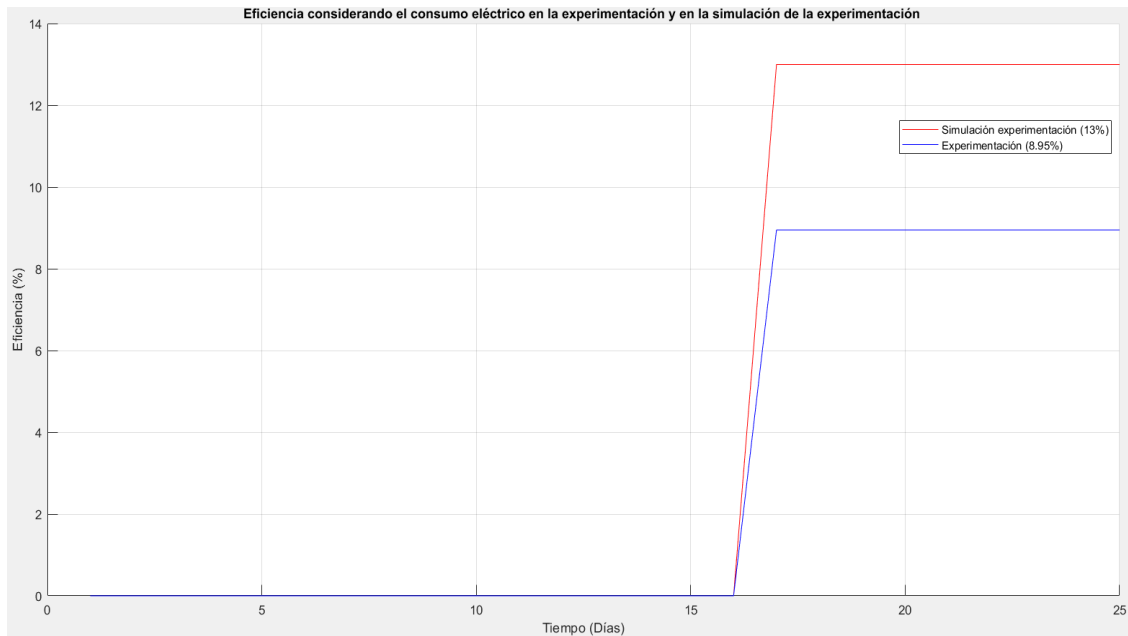


Fig. 74. Eficiencia considerando el consumo eléctrico en la experimentación y en la simulación de la experimentación

Fuente: Autor

## 5.4. Estimación de generación de energía eléctrica en la amazonia

### 5.4.1. Producción de biogás

Según Puxin que es la empresa que fabrica los sistemas de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup>, dice que la máxima producción de biogás del sistema puede llegar a ser de 2m<sup>3</sup> con una carga de 25kg de residuos orgánicos, una temperatura mayor a 20 °C y con un nivel de pH entre 6.5 a 7.5. La figura 75 indica a través de un estudio, la fracción molar del metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el biogás en “n” días, a partir de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, donde tomando en cuenta el día 1 hasta el 16 existe variación significativa de los gases y a partir del día 17 según la figura el porcentaje de metano es de 60% y el dióxido de carbono es de 40%.

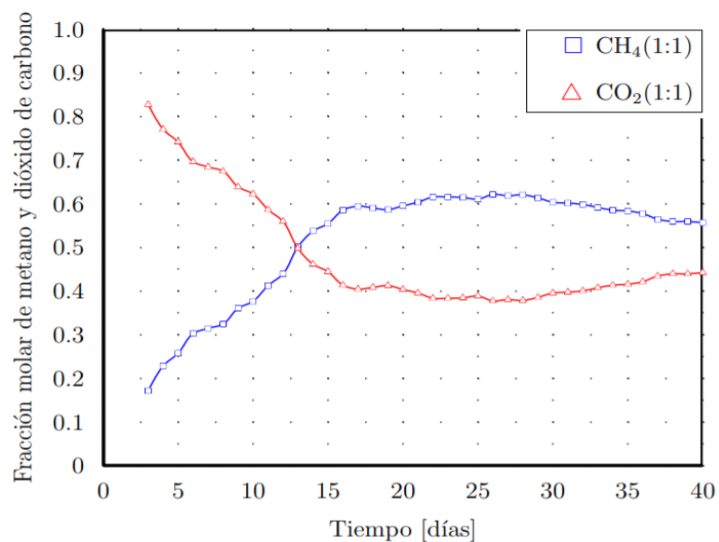


Fig. 75. Fracción molar de gases en el biogás

Fuente: (Cendales Ladino. & Jiménez Castellanos, 2015)

### 5.3.1.1 Poder calorífico

Como el porcentaje de metano se determinó que es de 60%, se calcula el poder calorífico del gas. Como dato de Puxin se tiene que el poder calorífico del biogás que es de 5142kcal, de ahí se extrae el poder calorífico en función del porcentaje de metano, por lo tanto, el poder calorífico del metano es:

$$P_{ch4} = 3.085kcal$$

Luego pasamos a kwh

$$P_{ch4} = 3.59kwh$$

### 5.4.2. Generación eléctrica.

A partir de los datos de producción de biogás de 2m<sup>3</sup>/día, porcentaje de metano de 60%, poder calorífico de 3.59kWh y porcentaje de eficiencia del generador de 30% se aplica la ecuación 9 lo cual se obtiene una generación eléctrica de 1292Wh/día, y considerando el consumo de la tabla 17 de 241.3Wh/día se obtuvo 1051Wh/día.

### 5.4.3. Eficiencia del sistema sin considerar el consumo eléctrico de la planta de biogás.

Como se supuso la producción máxima de biogás que fue de 2m<sup>3</sup> de biogás por día, a una temperatura promedio mayor de 20 °C y a un pH de 7. A partir de dicha calidad de biogás el generador eléctrico llegaría a producir 1292Wh/d. Con estos datos se calcula a continuación el flujo de biogás en relación con la potencia generada para posteriormente calcular la eficiencia del sistema de biogás.

Donde,

$$2\text{m}^3/\text{día} = 2000\text{dm}^3/\text{día}$$

A continuación, se calcula la eficiencia que viene siendo:

$$E_{\text{salida}} = 1292\text{Wh}/\text{día}$$

$$E_{\text{entrada}} = 2000\text{dm}^3/\text{día}$$

$$\eta = \frac{E_{\text{salida}}}{E_{\text{entrada}}} * 100 \quad (16)$$

$$\eta = \frac{1292}{2000} * 100$$

$$\eta = 65\%$$

A continuación, se grafica la eficiencia del sistema sin considerar el consumo de electricidad por parte de la planta de biogás, donde al inicio del experimento hasta el día 16 la eficiencia es cero ya que se considera ese tiempo para la estabilización del sistema de biogás. A partir del día 17 se observa la eficiencia del sistema a un 65% en la figura 76, lo cual se estimó esa eficiencia siempre y cuando el pH sea de 7 o cerca de ese valor y la temperatura promedio sea mayor a 20 °C.

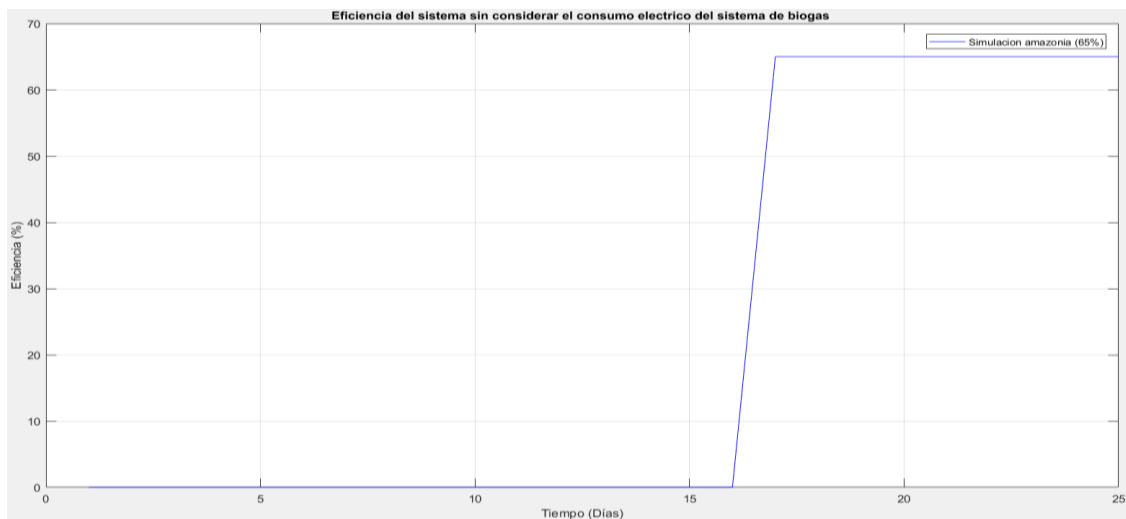


Fig. 76. Eficiencia del sistema de generación en la fase simulación

Fuente: Autor

#### 5.4.4. Eficiencia del sistema.

Se considera el consumo de los aparatos eléctricos que aportan con la producción de biogás y generación de electricidad los cuales son, la licuadora o trituradora industrial, la bomba que mezcla las sustancias orgánicas y el generador de presión de biogás, (tabla 17).

Dicho consumo se resta a la generación total de electricidad lo cual se observa en la figura 78, donde el resultado de dicha diferencia es de 1.051kWh/día o 1051Wh/día, (figura 75). Con este resultado calculamos la eficiencia final del sistema.

Donde,

$$E_{entrada} = 2m^3 = 2000dcm^3$$

$$E_{salida} = 1051Wh/día$$

Posteriormente se calcula la eficiencia (Ecuación 16) que viene siendo:

$$\eta = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}} * 100$$

$$\eta = \frac{1051}{2000} * 100$$

$$\eta = 52\%$$

A continuación, se grafica la eficiencia del sistema en la fase de simulación, donde al inicio del experimento hasta el día 16 la eficiencia es cero ya que se considera ese tiempo para la estabilización del sistema de biogás. A partir del día 17 se observa la eficiencia del sistema a un 52 % en la figura 77, lo cual se estimó esa eficiencia siempre y cuando el pH sea de 7 o cerca de ese valor y la temperatura promedio sea mayor a 20 °C.

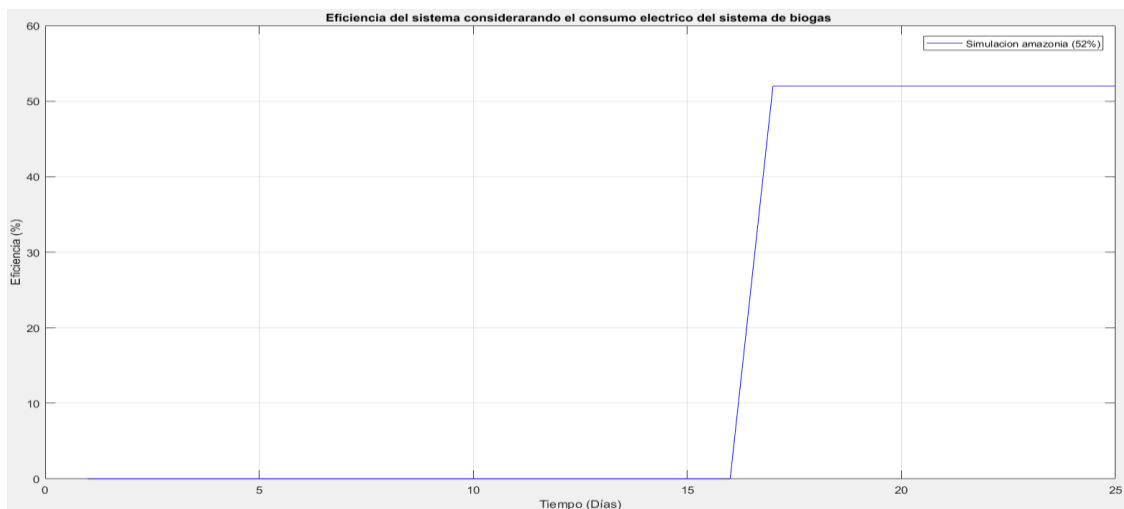


Fig. 77. Eficiencia del sistema en la fase simulación

Fuente: Autor

## 6 CONCLUSIONES

- Para tener éxito, en el inicio de una planta de biogás, se debe considerar el conocimiento previo, de no ser así, se llegaría a fracasar el proceso de producción de biogás.
- En los 10 días de iniciar la planta de biogás, se realizó pruebas de encendido, a un nivel de pH de 4-5, donde la llama de biogás combustionaba, pero no era capaz de permanecer encendida. La llama fue capaz de mantenerse encendida a partir del pH igual o mayor que 5.5.
- A la hora de encender la bomba de recirculación se evidencio que los gases retenidos por carga orgánica del biodigestor fluían ascendentemente hacia la bolsa que almacena el biogás, y consecuentemente el nivel de líquido del reactor disminuía dando lugar para insertar más materia orgánica.
- Cuando la bolsa que almacena el biogás está totalmente llena, y no se realiza ninguna actividad para desfogar, el biogás tiende a salir por la entrada del biodigestor, lo cual sería peligroso si el sistema se encuentra dentro de un lugar donde residen personas por el motivo de que el biogás está constituido de gases tóxicos.
- El requerimiento de energía eléctrica del sistema de biogás por parte del compresor, la licuadora industrial y la bomba de recirculación del sustrato para el funcionamiento de la planta de biogás, determina que el sistema no puede ser usado para zonas aisladas.
- La generación eléctrica dependió directamente de la calidad del biogás, en el rango de 4-5 de pH, el generador no encendió, pero si arranco en el rango de 5.5 - 6.0, y solamente generaba hasta 550W, sin embargo, a medida que el pH mejoraba y se acercaba a los rangos óptimos o ideales de 6.8 a 7.5, el generador ya producía energía a su capacidad instalada de 1500W.
- El consumo de los aparatos eléctricos para el funcionamiento del sistema de biogás-electricidad tuvo un gran impacto debido a que el proceso de trituración de residuos orgánicos ocupó 150W/día por usar la programación de 30s para 4 licuadas (2min) y se consideró 50W por el tiempo de encendido de la máquina. La bomba de agitación consumió 31.5W por ocuparse 15min/día y ayudo a que el líquido mantenga las mismas propiedades en todas partes, al igual que la temperatura sea la misma en toda la sustancia del biodigestor y para enviar las burbujas de gas estancadas por la sustancia liquida hacia la bolsa que almacena el biogás. Y finalmente el generador de presión de biogás que consumió 14.25W por ocuparse 57min en la fase de experimentación.

- Las constantes del modelado ADM1 que se encuentran en el anexo 2 (2.1.3 Coeficientes y constantes de equilibrio) fueron modificadas en la simulación del experimento con el objeto de adaptarle al sistema de biogás de Puxin, lo cual se acercaron a los valores del biogás obtenidos en la experimentación que fue de  $1.012\text{m}^3/\text{día}$ . (D.J. Batstone, 2002).
- En la fase de experimentación con un nivel de pH estable de 6 y una temperatura promedio de  $19\text{ }^\circ\text{C}$ , se produjo  $1\text{m}^3$  y se generó  $285\text{Wh}/\text{día}$ . Con datos de biogás y potencia se alcanzó una eficiencia sin considerar el consumo eléctrico de la planta de biogás de 28.5% y considerando el consumo de los aparatos eléctricos, la eficiencia disminuyó llegando a tener una eficiencia de 8.95%, lo que represento el 19.55% del consumo eléctrico. En la simulación experimental con los mismos datos obtenidos de la experiencia, en la fase de producción de biogás se obtuvo  $1.012\text{m}^3$ , lo cual su diferencia con lo obtenido en el experimento no fue muy significativa, siendo  $12\text{dcm}^3$ . Mientras que en la fase de generación eléctrica los datos obtenidos de la simulación experimental, de producción de biogás de  $1.012\text{m}^3$ , porcentaje de metano de 43.21%, poder calorífico de  $2.5\text{kWh}$  y eficiencia del generador eléctrico de 30%, se obtuvo  $328\text{Wh}/\text{día}$  con una eficiencia de 32%, que restando con el consumo de  $195.5\text{Wh}/\text{día}$  se obtuvo un resultado de  $133\text{Wh}/\text{día}$  y de cuyo resultado la eficiencia del sistema considerando el consumo eléctrico fue de 13%.
- En la experiencia, el pequeño margen de error de los aparatos de medida o sensores, como de temperatura de  $\pm 0.2\%$ , sensor pH de  $\pm 2.098\%$ , sensor de flujo de agua de  $\pm 10\%$ , sensor de corriente alterna de  $\pm 0.6\%$ , y la simulación del experimento a través del modelado ADM1 en el diagrama de bloques de simulink, tuvieron como resultado un pequeño margen de diferencias tanto para producción de biogás como para generación eléctrica.

## 7 RECOMENDACIONES

- Para tener un biogás eficiente, es recomendable controlar seis factores, ambiente anaeróbico, suficientes inóculos, temperatura, pH, porcentaje de sólidos totales (S.T.) y la relación de carbono/nitrógeno (C/N).
- Cuando se vaya a ocupar todo el biogás almacenado de la bolsa, es recomendable estar pendiente de la bolsa cuando este casi deshinchada, por que si se consume todo el biogás de la bolsa y el generador sigue encendido, en vez de fluir gas fluirá liquido del biorreactor ocasionando el apagado intempestivo y el posible daño del generador.
- Es recomendable no agregar muchos desperdicios ácidos ya que estos contribuyen a que el pH se salga del rango optimo y se vuelva ácido, lo cual disminuye la calidad del biogás.
- Para la fase de simulación el generador eléctrico no podrá proveer de energía las 4 horas seguidas ya que el sistema de biogás produce los 1.536m<sup>3</sup> en el transcurso del día y solamente almacena 1.3m<sup>3</sup>. En caso de que sea necesario ocupar los 1.536m<sup>3</sup> de manera seguida se recomienda adaptar una bolsa de biogás para aumentar la capacidad de almacenamiento.
- Para tener un biogás eficiente es recomendable mantener a las bacterias o microorganismos en un ambiente de su agrado, de no ser así el proceso fracasaría. Por ejemplo, hay que mantener a las bacterias en un ambiente anaeróbico ya que no pueden sobrevivir con oxígeno. Las bacterias prefirieren los ambientes de mayor temperatura ya que son más activas y si no se mantienen en el rango de 8 – 65 °C, los microorganismos no fermentaran la biomasa y el proceso se inhibe. La relación de carbono y nitrógeno C/N debe estar 30/1 o 20/1, ya que si se eleva la relación a 35/1 se disminuirá la población microbiana y como consecuencia se reducirá la actividad, en cambio sí se disminuye la relación a 8/1, se inhibe la actividad microbiana y el proceso ya que aumenta el contenido de amonio que es toxico a grandes cantidades.
- En caso de ocupar el estiércol de animales, se descartaría el uso de la licuadora industrial que representa el 52.6% con respecto a la generación eléctrica en la experimentación. Donde el porcentaje de eficiencia tomando en cuenta el uso del generador de presión de 4 horas y considerando el consumo eléctrico de la planta de biogás llegaría a ser de 19%, con ello en vez restar 150Wh/día se sumaría para abastecimiento de energía eléctrica.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### BIBLIOGRAFÍA

- Chiva Vicent, S. J., Berlanga Clavijo, G. R., Martines Cuenca, J., & Climent, A. (2018 ).  
Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia. *Catedra del agua*, 256.
- \*Sami, S. a. (2017). THERMAL ANALYSIS OF BIOMASS/GAS TURBINE AND WIND  
TURBINE HYBRID SYSTEM FOR ELECTRICITY GENERATION AND DISTRICT  
HEATING. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CURRENT RESEARCH*, 11.
- Aristizabal, M. T. (11 de Agosto de 2016). Letras Verdes. Revista Latinoamericana de  
Estudios Socioambientales . *Visiones de la electrificación rural en la Amazonía  
ecuatoriana: disputando lógicas hegemónicas*, pág. 18.
- Caisatoa Chulca, M. E., & Santana Andrade, A. N. (2018). Diseño y construcción de un  
prototipo de monitoreo remoto de señales biomédicas fundamentales para pacientes  
estacionarios. *Tesis*, 109.
- Cendales Ladino., E. D., & Jiménez Castellanos, S. A. (2015). Modelamiento computacional  
de la producción de energía renovable a partir del biogás mediante la codigestión  
anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino. *EAN*, 22.
- Coronel Durazno, A. D. (2018). Valoración del estiércol de bovino y porcino en la producción  
de biogás en un biodigestor de producción por etapas. *Tesis*, 86.
- D.J. Batstone, J. K. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water  
Science and Technology*, 11.
- Datos: población ecuatoriana. (16 de Junio de 2017). *Datos: población ecuatoriana*, pág. 1.
- eltelégrafo. (25 de Junio de 2016). La zona recibe la influencia de los vientos alisios. *La  
Amazonía, una región en la que la humedad es la reina*, pág. 1.
- eltelégrafo. (14 de Octubre de 2017). *Quito inaugura planta de electricidad a biogás*.
- EMAC. (18 de 10 de 2016). *Planta de biogas*.
- HERNÁNDEZ JARAMILLO, J. D. (2015). IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA ADM1 EN MATLAB/SIMULINK. *Tesis*, 101.
- Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento  
de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *P+L*, 18.
- Integrated, M. (2010). Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. *Maxim  
Integrated*, 2015.
- Ladino, E. D. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla  
de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía  
renovable. Colombia : Universidad Nacional de Colombia.
- Lotina, A. M. (2012). Obtención de hidrógeno a partir de biogás. *Universidad Autónoma de  
Madrid*, 270.

- Manjusha Ca, S. B. (2015). Mathematical Modeling and Simulation of Anaerobic Digestion of Solid Waste. *Procedia technology*, 7.
- Merino, L. (2007). Las energías renovables. *Iberdrola*, 20.
- Nayla. (2016). *Naylampmechatronics*. Obtenido de [https://www.naylampmechatronics.com/blog/51\\_tutorial-sensor-de-corriente-ac-no-invasivo-s.html](https://www.naylampmechatronics.com/blog/51_tutorial-sensor-de-corriente-ac-no-invasivo-s.html)
- Picón, M. (2020).
- Posso, F. (2002). ENERGÍA Y AMBIENTE: PASADO, PRESENTE Y FUTURO. PARTE DOS: SISTEMA ENERGÉTICO BASADO EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS. *Sistema de informacion científica*, 73.
- Puxin. (2015). Bio Gas Generators Operation Manual. *Puxin*, 10.
- PUXIN. (2015). Operation Manual of PUXIN Portable Biogas Plant. *Shenzhen Puxin Technology Co. Ltd*, 7.
- PUXIN. (2019). *PUXIN*. Obtenido de <http://en.puxintech.com/Home>
- Sami, S. &. (2017). SIMULATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC, BIOMASS GAS TURBINE AND DISTRICT HEATING HYBRID SYSTEM. *Research Center for Renewable Energy Catholic University of Cuenca, Cuenca, Ecuador.*, 18.
- Scidle. (s.f.). *Scidle Science and technology*. Obtenido de <https://scidle.com/es/como-usar-un-sensor-de-ph-con-arduino/>
- telegrafo, E. (29 de Julio de 2017). La energía eléctrica llega al 97% de la población. *La energía eléctrica llega al 97% de la población*, pág. 1.
- Tello, P. A. (2013). Estudio de efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. 101.
- Varnero Moreno, M. T., & Romero, H. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile, Chile: Proyecto CHI/00/G32.
- Vreugdenhil, P. M. (2012). *Parks and Tribes*. Obtenido de <https://www.parks-and-tribes.com/turismo-amazonas/clima-del-amazonas.htm#:~:text=El%20clima%20en%20la%20Amazon%C3%ADa,promedio%20de%2023%20%2D%2025%20C>.

## 9 ANEXOS

### Anexo 1: Componentes del sistema de biogás familiar de 3.4m<sup>3</sup> de la compañía de Puxin.

ITEM DESCRIPTION	IMAGE	QUANTITY
Portable Assembly Membrane Digester 3.4CBM <b>HS CODE: 3925100000</b>		1 set
Biogas pump 220V AC 15W		1 set
Small size dehydrator 0.6L		1 set
Biogas desulfurizer PX-1L		1 pcs
Biogas Fitting <b>HS CODE: 3917230000</b>		1 sets
Fermentation Bacteria		3 bags

<p>Circulating pump (125W, Single phase) (including pipelines and valves) (AC Single phase 220V, 50HZ)  <b>HS CODE: 8413709990</b></p>		<p>1 set</p>
<p>Flow meter(JBD2.5-SA)  Nominal flow rate Q:  2.5m<sup>3</sup>/h  Max. flow rate Q<sub>max</sub>: 4m<sup>3</sup>/h  Min. flow rate Q<sub>min</sub>:  0.025m<sup>3</sup>/h  <b>HS CODE: 9028109000</b></p>		<p>1 pc</p>
<p>20L Food Waste Disposer  PX-FWD-20L  Rated voltage: 220V  Rated frequency: 50Hz/ 60Hz  Rated power: 3000W  Maximum capacity: 20L  Size: 360*455*560mm  N.W.: 7KG G.W.: 9KG  RPM: 10000-30000</p>		<p>1 pc</p>
<p>1.5 KW Biogas Generator  AC, 220V single-phase  <b>HS CODE: 160603000</b></p>		<p>1 pc</p>

## Anexo 2: Nomenclatura del modelo matemático de digestión anaerobia ADM1.

### 2.1.1 Unidades del modelo.

Medida	Unidades
Concentración	kgDQO/m <sup>3</sup>
Concentración (no-DQO)	kmoleC/m <sup>3</sup>
Concentración (nitrógeno no-DQO)	kmoleN/m <sup>3</sup>
Presión	bar
Temperatura	K
Distancia	M
Volumen	m <sup>3</sup>
Energía	Kj
Tiempo	d (día)
DQO soluble	DQOs
DQO partícula	DQOx

### 2.1.2 Coeficientes estequiométricos.

Símbolo	Descripción	Unidades
C <sub>i</sub>	Contenido en carbono del compuesto i	kmolC/kgDQO
N <sub>i</sub>	Contenido en nitrógeno del compuesto i	kmolN/kgDQO
V <sub>ij</sub>	Coeficientes de velocidad para el compuesto i en el proceso j	kgDQO

fproducto, sustrato	Rendimiento(solo catabolismo) de producto sobre el sustrato	kgDQO/kgDQO
---------------------	---	-------------

### 2.1.3 Coeficientes y constantes de equilibrio.

Símbolo	Descripción	Unidades
Ka, ácido	Constante de equilibrio ácido-base	M(kmol/m <sup>3</sup> )
KH	Constante de Henry	Mliq bar <sup>-1</sup>
pKa	-log <sub>10</sub> [Ka, ácido]	
R	Constante de gases	bar m <sup>3</sup> /kmole K

### 2.1.4 Parámetros y velocidades cinéticas.

Símbolo	Descripción	Unidades
kA/Bi	Parámetro cinético ácido-base	M <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
Kdec	Constante de respiración endógena	d <sup>-1</sup>
k <sub>hyd,i</sub>	Constante de hidrólisis	d <sup>-1</sup>
li	Función de inhibición	
Kproceso	Parámetro de primer orden	d <sup>-1</sup>
kLa	Coeficiente de transferencia líquido-gas	d <sup>-1</sup>
Kinhibición, sustrato	Concentración inhibidora al 50%	kgDQO/m <sup>3</sup>

km, proceso	Tasa de consumo específico de Monod ( $\mu_{max}/Y$ )	kgDQOS/kgDQOX d
KS, proceso	Constante de saturación media del sustrato	kgDQOS/m <sup>3</sup>
Pj	Velocidad cinética del proceso j	kgDQOS /m <sup>3</sup> d
Ysustrato	Rendimiento de biomasa sobre el sustrato	kgDQOS/kgDQOX
Mmax	Tasa de crecimiento específico máxima de Monod	d -1

#### 2.1.5 Variables de estado y dinámicas variables algebraicas.

Símbolo	Descripción	Unidades
pH	$-\log_{10}[H^+]$	
p <sub>gas, i</sub>	Presión del gas i	bar
P <sub>gas</sub>	Presión total de gas	bar
S <sub>i</sub>	Componente soluble i	kgDQO/m <sup>3</sup>
X <sub>i</sub>	Componente insoluble i	kgDQO/m <sup>3</sup>
T	Temperatura	K
V	Volumen	m <sup>3</sup>

#### 2.1.6 Variables de estado dinámicas.

Solubles			Partículas		
Nº Estado	Variable	Descripción	Nº Estado	Variable	Descripción

1	Ssu	Monosacáridos	13	Xc	Sustratos compuestos
2	Saa	Aminoácidos	14	Xch	Carbohidratos
3	Sfa	Ácidos grasos de cadena larga	15	Xpr	Proteínas
4	Sva	Valerato total	16	Xli	Lípidos
5	Sbu	Butirato total	17	Xsu	Consumidores de azúcar
6	Spro	Propionato total	18	Xaa	Consumidores de aminoácidos
7	Sac	Acetato total	19	Xfa	Consumidores de LCFA
8	Sh2	Hidrógeno gas	20	Xc4	Consumidores de valerato y butirato
9	Sch4	Metano gas	21	Xpro	Consumidores de propionato
10	SIC	Carbono inorgánico	22	Xac	Consumidores de acetato
11	SIN	Nitrógeno inorgánico	23	Xh2	Consumidores de hidrógeno
12	SI	Solubles inertes	24	XI	Partículas inertes

## Anexo C

*Parámetros para la simulación del sistema de biogás.*

### Anexo 3 Parámetros para la simulación del sistema de biogás

#### 3.1 Valores de los parámetros estequiométricos.

Parámetro	Valor	Unidades	Proceso (os)
f sl,xc	0,08	-	1
f xl,xc	0,15	-	1
f ch,xc	0.14	-	1
f pr,xc	0.15	-	1
f li,xc	0.21	-	1
f fa,li	0.74	-	4
f h2,su	0.18	-	5
f bu,su	0.11	-	5
f pro,su	0.24	-	5
f ac,su	0.29	-	5
f h2,aa	0.05	-	6
f va,aa	0.18	-	6
f bu,aa	0.24	-	6
f pro,aa	0.03	-	6
f ac,aa	0.21	-	6
Nxc	0,0246/14	kmolN/ kgDQO	1, 13-19
NI	0,06/14	kmolN/ kgDQO	1
Naa	0,006	kmolN/ kgDQO	1;6
N bac	0,06/14	kmolN/ kgDQO	5 a 19

Cxc	0,01986	kmolN/ kgDQO	1, 13 a 19
Csl	0,027	kmolN/ kgDQO	1
Cch	0,0288	kmolN/ kgDQO	1;2
Cpr	0,027	kmolN/ kgDQO	1;3
Cli	0,019	kmolN/ kgDQO	1;4
Cxl	0,029	kmolN/ kgDQO	1
Csu	0,0313	kmolN/ kgDQO	2;5
Caa	0,03	kmolN/ kgDQO	3;6
Cfa	0,0217	kmolN/ kgDQO	4;7
Cbu	0,025	kmolN/ kgDQO	5;6;9
Cpro	0,0268	kmolN/ kgDQO	5;6;8;10
Cac	0,0313	kmolN/ kgDQO	5 a 11
Cbac	0,0313	kmolN/ kgDQO	5 a 19
Cva	0,024	kmolC/kgDQO	6;8
Cch4	0,0156	kmolC/kgDQO	11;12
Y su	0.1	kgDQOx /kgDQOs	5
Y aa	0,08	kgDQOx /kgDQOs	6
Y fa	0,06	kgDQOx /kgDQOs	7
Y c4	0,06	kgDQOx /kgDQOs	8;9
Y pro	0,04	kgDQOx /kgDQOs	10
Y ac	0,05	kgDQOx /kgDQOs	11
Y h2	0,06	kgDQOx /kgDQOs	12

### 3.2 Valores de los parámetros bioquímicos

Parámetro	Valor	Unidades	Proceso (os)
k dis	0,45	d -1	1
k hyd,ch	8	d -1	2
k hyd,pr	8	d -1	3
k hyd,li	8	d -1	4
k m,su	17	d -1	5
k m,aa	21	d -1	6
k m,fa	3	d -1	7
k m,c4	16	d -1	8;9
k m,pro	7	d -1	10
k m,ac	4	d -1	11
k m,h2	16	d -1	12
k dec,Xsu	0.02	d -1	13
k dec,Xaa	0,018	d -1	14
k dec,Xfa	0.018	d -1	15
k dec,Xc4	0,018	d -1	16
k dec,Xpro	0.018	d -1	17
k dec,Xac	0.018	d -1	18
k dec,Xh2	0.018	d -1	19
KS,IN	1,00E-004	kmol/m 3	5 a 12
KS,su	0.2	kgDQO/m 3	5
KS,aa	0.1	kgDQO/m 3	6
KS,fa	0.2	kgDQO/m 3	7

KS,c4	0.1	kgDQO/m <sup>3</sup>	8;9
KS,pro	0.05	kgDQO/m <sup>3</sup>	10
KS,ac	0.7	kgDQO/m <sup>3</sup>	11
KS,h2	7,00E-006	kgDQO/m <sup>3</sup>	12
Klh2,fa	5,00E-006	kgDQO/m <sup>3</sup>	7
Klh2,c4	1,00E-005	kgDQO/m <sup>3</sup>	8;9
Klh2,pro	3,50E-006	kgDQO/m <sup>3</sup>	10
Kl,nh3	0,0018	kmol/m <sup>3</sup>	11
pH UL,aa	5.5	-	5 a 10
pH LL,aa	4	-	5 a 10
pH UL,ac (Experimentación)	6	-	
pH UL,ac (Simulación amazonia)	6.5		
pH LL,ac	6	-	11
pH UL,h2	6	-	12
pH LL,h2	5	-	12

### 3.3 Valores de los parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Valor	Unidades
K w	$\exp\left(\frac{55900}{R100}\left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M10 <sup>-14</sup>
Ka,va	10 <sup>-4.86</sup>	M
Ka,bu	10 <sup>-4.82</sup>	M

Ka,pro	$10^{-4.88}$	M
Ka,ac	$10^{-4.76}$	M
Ka,co2	$10^{-6.35} \exp\left(\frac{7646}{R100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M
Ka,IN	$10^{-9.35} \exp\left(\frac{51965}{R100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M
K A,Bva	1 e10	$M^{-1}d^{-1}$
K A,Bbu	1 e10	$M^{-1}d^{-1}$
K A,Bpro	1 e10	$M^{-1}d^{-1}$
K A,Bac	1 e10	$M^{-1}d^{-1}$
K A,Bco2	1 e10	$M^{-1}d^{-1}$
K A,BIN	1 e10	$M^{-1}d^{-1}$
K H,co2	$0.035 \exp\left(\frac{-19410}{R100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	$M_{liq}bar^{-1}$
K H,ch4	$0.0014 \exp\left(\frac{-14240}{R100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	$M_{liq}bar^{-1}$
K H,h2	$7.8e - 4 \exp\left(\frac{-4180}{R100} \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	$M_{liq}bar^{-1}$
k p	3 e 4	m 3 d -1 bar-1
KL a	200	$d^{-1}$
R	0,083145	bar M-1 K-1
T base	293.15	K
Top	298.15	K
Patm	1,013	bar

P agas,h2o	$0.0313 \exp\left(5290\left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	bar
Vliq	1.7	m <sup>3</sup>
Vgas	1.3	m <sup>3</sup>

### 3.4 Composición del fango de entrada

Variable	Valor	Unidades
Ssu,in	0.01	kg DQO/m <sup>3</sup>
Saa,in	0,001	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sfa,in	0,001	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sva,in	0,001	kg DQO/m <sup>3</sup>
S bu,in	0,001	kg DQO/m <sup>3</sup>
Spro,in	0,001	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sac,in	0,001	kg DQO/m <sup>3</sup>
S h2,in	1,00E-008	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sch4,in	1,00E-005	kg DQO/m <sup>3</sup>
S IC,in	0,02	kmol C/m <sup>3</sup>
SIN,in	0,01	kmol N /m <sup>3</sup>
S I,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xc,in	1	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xch,in	2	kg DQO/m <sup>3</sup>
X pr,in	10	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xli,in	2	kg DQO/m <sup>3</sup>

Xsu,in	0	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xaa,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xfa,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xc4,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
X pro,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xac,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
X h2,in	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
X I,in	25	kg DQO/m <sup>3</sup>
S cat + ,in	0.04	kmol /m <sup>3</sup>
Scat + ,in	0,02	kmol /m <sup>3</sup>

### 3.5 Condiciones iniciales.

Variable	Valor	Unidades
S su	0.012	kg DQO/m <sup>3</sup>
Saa	0,005	kg DQO/m <sup>3</sup>
S fa	0,09	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sva	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sbu	0,01	kg DQO/m <sup>3</sup>
S pro	0,011	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sac	0.1	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sh2	2,30E-007	kg DQO/m <sup>3</sup>
Sch4	0,055	kg DQO/m <sup>3</sup>
S IC	0,15	kmol C/m <sup>3</sup>

SIN	0,13	kmol N /m <sup>3</sup>
S I	0,33	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xc	0,31	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xch	0,028	kg DQO/m <sup>3</sup>
X pr	0,1	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xli	0,029	kg DQO/m <sup>3</sup>
X su	0,21	kg DQO/m <sup>3</sup>
X aa	1,12	kg DQO/m <sup>3</sup>
X fa	0,2	kg DQO/m <sup>3</sup>
Xc4	0,4	kg DQO/m <sup>3</sup>
X pro	0,1	kg DQO/m <sup>3</sup>
X ac	0,7	kg DQO/m <sup>3</sup>
X h2	0,3	kg DQO/m <sup>3</sup>
X I	25,6	kg DQO/m <sup>3</sup>
S cat +	0,04	kmol /m <sup>3</sup>
S an -	0,02	kmol /m <sup>3</sup>
S va -	0,011	kg DQO/m <sup>3</sup>
S bu-	0,013	kg DQO/m <sup>3</sup>
S pro -	0,016	kg DQO/m <sup>3</sup>
S ac -	0,2	kg DQO/m <sup>3</sup>
S hco3-	0,14	kmol C/m <sup>3</sup>
Snh3	0,0041	kmol N /m <sup>3</sup>
Sgas,h2	1,02E-005	kg DQO/m <sup>3</sup>

Sgas,ch4	1,63	kg DQO/m 3
Sgas,co2	0,014	kmol C/m 3

#### Anexo 4 Datos de sensores

##### 3.1 Datos generales de temperatura ambiente

FECHA	Temperatura ambiente (°C)
02/01/2020	19
02/02/2020	19
02/03/2020	19
02/04/2020	20
02/05/2020	19
02/06/2020	20
02/07/2020	19
02/08/2020	19
02/09/2020	19
02/10/2020	19
02/11/2020	19
02/12/2020	20
02/13/2020	19
02/14/2020	19
02/15/2020	19
02/16/2020	19

02/17/2020	19
02/18/2020	20
02/19/2020	19
02/20/2020	19
02/21/2020	19
02/22/2020	19
02/23/2020	19
02/24/2020	20
02/25/2020	19

### 3.2 Datos generales de temperatura del biodigestor.

FECHA	Temperatura del biodigestor (°C)
02/01/2020	19
02/02/2020	19
02/03/2020	19
02/04/2020	20
02/05/2020	19
02/06/2020	20
02/07/2020	19
02/08/2020	19
02/09/2020	19
02/10/2020	19

02/11/2020	19
02/12/2020	20
02/13/2020	19
02/14/2020	19
02/15/2020	19
02/16/2020	19
02/17/2020	19
02/18/2020	20
02/19/2020	19
02/20/2020	19
02/21/2020	19
02/22/2020	19
02/23/2020	19
02/24/2020	20
02/25/2020	19

### 3.3 Datos generales de pH del sistema.

FECHA	Potencial de hidrogeno (pH)
02/01/2020	5.14
02/02/2020	5.17
02/03/2020	5
02/04/2020	4.78

02/05/2020	4.63
02/06/2020	4.49
02/07/2020	4.3
02/08/2020	4
02/09/2020	4.11
02/10/2020	4.13
02/11/2020	4
02/12/2020	4.61
02/13/2020	5.15
02/14/2020	5.51
02/15/2020	5.89
02/16/2020	5.88
02/17/2020	6.01
02/18/2020	6
02/19/2020	5.99
02/20/2020	5.97
02/21/2020	6.03
02/22/2020	6.03
02/23/2020	6.02
02/24/2020	6.01
02/25/2020	6

### 3.4 Datos de caudal de agua.

FECHA Y HORA	CAUDAL DE AGUA (L/min)
02/01/2020 10:30	10
02/01/2020 11:30	10
02/01/2020 11:50	10
02/02/2020 10:30	0
02/03/2020 10:30	0
02/04/2020 10:30	0
02/05/2020 10:30	0
02/06/2020 10:30	0
02/07/2020 10:30	0
02/08/2020 10:30	0
02/09/2020 10:30	0
02/10/2020 10:30	0
02/11/2020 10:30	10
02/11/2020 10:38	10
02/11/2020 10:39	0
02/12/2020 15:40	10
02/12/2020 15:48	10
02/12/2020 15:49	0
02/13/2020 18:30	10
02/13/2020 18:38	10
02/13/2020 18:39	0

02/14/2020 18:45	10
02/14/2020 18:53	10
02/14/2020 18:54	0
02/15/2020 15:15	10
02/15/2020 15:23	10
02/15/2020 15:24	0
02/16/2020 18:15	10
02/16/2020 18:23	10
02/16/2020 18:24	0
02/17/2020 16:25	10
02/17/2020 16:33	10
02/17/2020 16:34	0
02/18/2020 10:38	10
02/18/2020 10:46	10
02/18/2020 10:47	0
02/19/2020 15:17	10
02/19/2020 15:25	10
02/19/2020 15:26	0
02/20/2020 15:50	10
02/20/2020 15:58	10
02/20/2020 15:59	0
02/21/2020 17:23	10
02/21/2020 17:31	10

02/21/2020 17:32	0
02/22/2020 10:30	10
02/22/2020 10:38	10
02/22/2020 10:39	0
02/23/2020 11: 15	10
02/23/2020 11:23	10
02/23/2020 11:24	0
02/24/2020 10:49	10
02/24/2020 10:57	10
02/24/2020 10:58	0
02/25/2020 10:30	0
02/25/2020 12:30	0
02/25/2020 17:30	0

### 3.5 Datos producción de biogás.

FECHA Y HORA	Biogás (m <sup>3</sup> )
02/01/2020 10:30	0.001
02/01/2020 11:30	0.004
02/01/2020 11:50	0.015
02/02/2020 10:30	0.03
02/03/2020 10:30	0.047
02/04/2020 10:30	0.071
02/05/2020 10:30	0.098

02/06/2020 10:30	0.119
02/07/2020 10:30	0.148
02/08/2020 10:30	0.169
02/09/2020 10:30	0.321
02/010/2020 10:30	0.641
02/11/2020 10:30	0.816
02/11/2020 10:38	0.913
02/11/2020 10:39	0.94
02/12/2020 15:40	0.979
02/12/2020 15:48	1.002
02/12/2020 15:49	1.002
02/13/2020 18:30	1
02/13/2020 18:38	1.001
02/13/2020 18:39	1
02/14/2020 18:45	1
02/14/2020 18:53	1.001
02/14/2020 18:54	1
02/15/2020 15:15	1
02/15/2020 15:23	0.001
02/15/2020 15:24	0.004
02/16/2020 18:15	0.015
02/16/2020 18:23	0.03

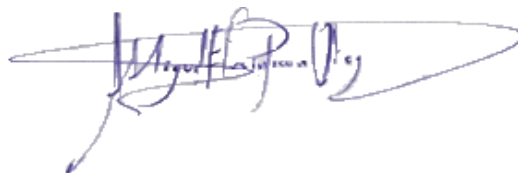
02/16/2020 18:24	0.047
02/17/2020 16:25	0.071
02/17/2020 16:33	0.098
02/17/2020 16:34	0.119
02/18/2020 10:38	0.148
02/18/2020 10:46	0.169
02/18/2020 10:47	0.321
02/19/2020 15:17	0.641
02/19/2020 15:25	0.816
02/19/2020 15:26	0.913
02/20/2020 15:50	0.94
02/20/2020 15:58	0.979
02/20/2020 15:59	1.002
02/21/2020 17:23	1.002
02/21/2020 17:31	1
02/21/2020 17:32	1.001
02/22/2020 10:30	1
02/22/2020 10:38	1
02/22/2020 10:39	1.001
02/23/2020 11: 15	1
02/23/2020 11:23	1
02/23/2020 11:24	0.001

02/24/2020 10:49	0.004
02/24/2020 10:57	0.015
02/24/2020 10:58	0.03
02/25/2020 10:30	0.047
02/25/2020 12:30	0.071
02/25/2020 17:30	0.098

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Miguel Efraín Picón Ortega** portador de la cédula de ciudadanía N° 1400622153. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Simulación de un Sistema de Biomasa, Biogás para Generar Electricidad para una casa típica de la Amazonía Ecuatoriana”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de abril de 2021



F: .....

Miguel Efraín Picón Ortega

1400622153