



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA GENERACIÓN DE 800 W A TRAVÉS DEL USO DE BIOGÁS, PARA UNA PEQUEÑA GRANJA Y ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

Ing. JUAN ESTEBAN CUSI SACANSELA  
juan.cusi@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. ÁNGEL PORTILLA, M.Sc.  
angel.portilla@epn.edu.ec

Quito, septiembre, 2018

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Ing. Juan Esteban Cusi Sacansela**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Ángel Portilla, M.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Juan Esteban Cusi Sacansela**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Juan Esteban Cusi Sacansela

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres José, Presentación, hermanos Patricio, Mario por encontrarse siempre a mi lado, ser una guía, un ejemplo de constancia, superación y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mis sobrinos por ser parte de mi felicidad y acompañamiento constante en todas las actividades.

A mi novia Emilia y su familia por su apoyo, acompañamiento en todas las actividades y los momentos difíciles que se me han presentado.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por darme la salud, la fortaleza, constancia de afrontar dificultades y por permitirme superar una etapa más de mi vida.

A la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional por haberme acogido en sus aulas y por medio de sus docentes entregar sus conocimientos de alto nivel y permitirme formar como profesional.

A mi director de tesis Ing. Ángel Portilla por la guía y colaboración brindada en la elaboración de este trabajo.

A mis familiares, amigos que se encontraron presentes en esta etapa académica, que permitió enriquecer experiencias y amistad.

# ÍNDICE

Certificación.....	i
Declaración.....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice de figuras .....	ix
Índice de tablas.....	xi
Resumen .....	xiii
Abstract .....	xiv
Introducción .....	1
Pregunta de investigación.....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Alcance.....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1.1. Energías renovables, potencial energético de fuentes renovables América Latina y el Caribe.....	4
1.1.2. Sector energético ecuatoriano.....	4
1.2. Biomasa, características principales.....	5
1.2.1. Biomasa seca.....	6
1.2.2. Biomasa húmeda .....	6
1.3. Digestión anaeróbica.....	6
1.4. Etapas de la digestión anaeróbica.....	7
1.4.1. Hidrólisis.....	8
1.4.2. Acidogénesis.....	8
1.4.3. Acetogénesis.....	8
1.4.4. Metanogénesis .....	8
1.5. Bacterias formadoras de metano.....	9
1.6. Condiciones determinantes en el proceso de digestión anaeróbica.....	10
1.6.1. Tiempo de retención hidráulico.....	10
1.6.2. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas .....	11
1.6.3. Concentración de sólidos .....	13
1.6.4. Agitación .....	13
1.6.5. Temperatura.....	14

1.6.6.	Alcalinidad y pH.....	15
1.6.7.	Sustancias inhibidoras.....	17
1.7.	Biodigestor .....	18
1.7.1.	Componentes de un biodigestor .....	18
1.8.	Tipos de biodigestores anaeróbicos para desechos sólidos orgánicos.....	19
1.8.1.	Por la temperatura.....	19
1.8.2.	Modo de alimentación .....	19
1.8.3.	Por el número de etapas .....	21
1.9.	Biogás .....	22
1.9.1.	Características del biogás .....	22
1.9.2.	Composición de biogás de diversas fuentes.....	23
1.9.3.	Características de sus principales contaminantes .....	24
1.10.	Purificación del biogás.....	24
1.10.1.	Métodos de eliminación de CO <sub>2</sub> .....	25
1.10.2.	Métodos de eliminación de H <sub>2</sub> S.....	26
1.11.	Utilización del biogás.....	27
1.11.1.	Combustión directa y utilización del calor .....	27
1.11.2.	Generación de electricidad .....	28
2.	METODOLOGÍA.....	30
2.1.	Ubicación geográfica del proyecto.....	31
2.1.1.	Datos de temperatura de diversas fuentes .....	31
2.2.	Caracterización y selección de la materia prima.....	32
2.2.1.	Toma de muestras.....	33
2.2.2.	Reporte de análisis de estiércol de ganado vacuno.....	33
2.3.	Potencia total de equipos .....	34
2.4.	Consumo de energía de la granja.....	34
2.5.	Determinación del consumo de biogás .....	35
2.5.1.	Determinación cantidad de la masa del sustrato .....	36
2.6.	Sistema de producción de energía eléctrica .....	37
2.6.2.	Cálculo y selección de tanque de biodigestor.....	40
2.7.	Cálculo, dimensionamiento y selección de partes del sistema de generación energía eléctrica.....	42
2.7.1.	Selección de válvula de seguridad .....	42
2.7.2.	Cálculo y selección del filtro de H <sub>2</sub> S .....	44
2.7.3.	Cálculo y selección de la columna de absorción de CO <sub>2</sub> .....	47

2.7.4.	Selección de tubería de transporte de biogás y cálculo de pérdida de presión .....	57
2.7.5.	Determinación del espesor del tanque de biodigestor .....	61
2.7.6.	Cálculo del dispositivo de agitación .....	62
2.8.	Ensamble e instalación del sistema de generación de energía eléctrica.....	67
2.9.	Protocolo de pruebas .....	70
2.9.1.	Prueba de hermeticidad sin carga. ....	70
2.9.2.	Prueba de hermeticidad con carga. ....	71
2.9.3.	Prueba de temperatura y ph .....	73
2.9.4.	Prueba de generación de biogás purificado.....	74
2.9.5.	Prueba de generación de energía eléctrica .....	75
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	77
3.1.	Resultados .....	77
3.1.1.	Prueba de hermeticidad con carga y sin carga .....	77
3.1.2.	Resultados de mediciones de presión y temperatura en condiciones de operación para generación de biogás con carga.....	78
3.1.3.	Resultados de generación de biogás purificado .....	82
3.1.4.	Resultados de generación de energía eléctrica .....	83
3.2.	Costos del proyecto.....	85
3.2.1.	Inversión inicial del proyecto.....	85
3.2.2.	Costo de operación .....	85
3.2.3.	Costo por mantenimiento.....	87
3.2.4.	Costo total .....	87
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	88
4.1.	Conclusiones.....	88
4.2.	Recomendaciones.....	89
	Referencias Bibliográficas .....	90
	Anexos .....	93
	Anexo 1. Formato para muestreo de estiércol de ganado vacuno.....	93
	Anexo 2. Reporte de análisis de estiércol de ganado vacuno .....	94
	Anexo 3. Generador eléctrico .....	95
	Anexo 4. Tanque de polietileno.....	96
	Anexo 5. Válvulas de seguridad.....	97
	Anexo 6. Filtro desulfurizador .....	99
	Anexo 7. Ficha técnica de NaOH.....	100



Anexo 8. Hoja de manejo de seguridad de NaOH.....	101
Anexo 9. Características de rellenos para torres.....	105
Anexo 10. Altura de la unidad de transferencia HL. ....	106
Anexo 11. Bomba sumergible .....	107
Anexo 12. Perdidas en accesorios.....	107
Anexo 13. Ensamble del sistema de generación de energía eléctrica.....	108
Anexo 14. Carga de estiércol de ganado vacuno en biodigestor.....	109
Anexo 15. Informe de ensayo de composición de biogás .....	110
Anexo 16. Detalle de costos de materiales, equipos y ensayos .....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Potencial técnico regional total para las tecnologías renovables a largo plazo	4
Figura 1.2. Generación de electricidad, GWh	5
Figura 1.3. Generación de biomasa	5
Figura 1.4. Biomasa seca	6
Figura 1.5. Biomasa húmeda	6
Figura 1.6. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos	7
Figura 1.7. Rendimientos relativos de biogás, temperatura y tiempo de retención	14
Figura 1.8. Tasa de crecimiento metanogénico	15
Figura 1.9. Biodigestor prefabricado a base de geomembrana de PVC	18
Figura 1.10. Biodigestor, componentes	18
Figura 1.11. Biodigestor modelo Kompogas	20
Figura 1.12. Biodigestor tipo chino	20
Figura 1.13. Biodigestor batch	21
Figura 1.14. Biodigestor de una sola etapa	21
Figura 1.15. Biodigestor modelo Schwarting	22
Figura 1.16. Uso de biogás	27
Figura 1.17. Iluminación y calefacción de granjas	28
Figura 1.18. Generador eléctrico con combustible biogás	28
Figura 1.19. Aplicación de biogás en sector rural	29
Figura 2.1. Diagrama de flujo con el proceso propuesto para el diseño sistema de generación de energía	30
Figura 2.2. Ubicación de la granja en la Comuna Lumbisí	31
Figura 2.3. Diagrama de temperatura de Lumbisí año 2017	32
Figura 2.4. Sistema de generación de Energía eléctrica	39
Figura 2.5. Válvula de seguridad	44
Figura 2.6. Elementos de columna de absorción	47
Figura 2.7. Cuerpos de rellenos	48
Figura 2.8. Correlación generalizada para inundación y caída de presión en columnas de relleno	51
Figura 2.9. Trayecto de biogás	57
Figura 2.10. Movimiento de mezcla	62
Figura 2.11. Sistema de agitación	65

Figura 2.12. Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds .....	65
Figura 2.13. Delimitación de proyecto .....	67
Figura 2.14. Cubierta de sistema de generación de energía eléctrica .....	67
Figura 2.15. Elementos del sistema de generación de energía eléctrica .....	68
Figura 2.16. Tanque de polietileno instalado .....	68
Figura 2.17. Ensamble de tubería, accesorios y equipos .....	68
Figura 2.18. Ensamble de depósito de almacenamiento de biogás .....	69
Figura 2.19. Generador eléctrico .....	69
Figura 3.1. Prueba de hermeticidad .....	77
Figura 3.2. Medición de temperatura en la mañana .....	78
Figura 3.3. Medición de temperatura al medio día .....	78
Figura 3.4. Medición temperatura en la noche .....	78
Figura 3.5. Monitoreo de temperatura en el interior de biodigestor .....	80
Figura 3.6. Medición presión .....	81
Figura 3.7. Monitoreo de presión .....	81
Figura 3.8. Monitoreo de ph .....	82
Figura 3.9. Prueba de combustión de biogás .....	82
Figura 3.10. Medición de Corriente .....	84
Figura 3.11. Prueba de medición del consumo de biogás .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Principales reacciones químicas que se producen en la digestión anaeróbica de la materia orgánica .....	9
Tabla 1.2. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural .....	12
Tabla 1.3 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.....	14
Tabla 1.4. Concentración inhibidora de sustancias en un sistema anaeróbico .....	17
Tabla 1.5. Energía equivalente Biogás vs. otras fuentes.....	23
Tabla 1.6. Composición del biogás derivado de diversas fuentes .....	23
Tabla 1.7. Componentes típicos e impurezas en biogás .....	24
Tabla 2.1. Datos temperatura Lumbisí año 2017 .....	32
Tabla 2.2. Caracterización del estiércol de ganado vacuno .....	33
Tabla 2.3. Equipos eléctricos para la granja .....	34
Tabla 2.4. Potencia de arranque de la bomba de agua.....	34
Tabla 2.5. Demanda de energía .....	35
Tabla 2.6. Relación estiércol - agua para varios tipos de sustrato.....	40
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas de la válvula de seguridad .....	44
Tabla 2.8. Parámetros de diseño .....	45
Tabla 2.9. Parámetros de diseño .....	49
Tabla 2.10. Pérdidas según el accesorio .....	59
Tabla 2.11. Cálculo de presión .....	59
Tabla 2.12. Cálculo de presión 2 .....	60
Tabla 2.13. Cálculo de presión 3 .....	61
Tabla 2.14. Calculo de resistencia de polietileno de acuerdo al espesor.....	62
Tabla 2.15. Parámetros de diseño .....	64
Tabla 2.16. Equipos para prueba de hermeticidad con carga .....	71
Tabla 2.17. Equipos para prueba de hermeticidad con carga .....	72
Tabla 2.18. Equipos para prueba de temperatura y ph .....	73
Tabla 2.19. Equipos para prueba de generación de biogás purificado .....	75
Tabla 2.20. Equipos para prueba de generación de energía eléctrica.....	76
Tabla 3.1. Prueba de hermeticidad sin carga .....	77
Tabla 3.2. Medición de temperatura y presión con el biodigestor cargado .....	79
Tabla 3.3. Composición de muestra de biogás .....	83

Tabla 3.4. Cálculo de eficiencia del sistema de energía eléctrica .....	84
Tabla 3.5. Inversión inicial de proyecto .....	85
Tabla 3.6. Costos directos materiales .....	86
Tabla 3.7. Costo directo de mano de obra .....	86
Tabla 3.8. Resumen de costo total de operación .....	86
Tabla 3.9. Costo total.....	87

## RESUMEN

El presente estudio expone el diseño y selección de los elementos para la construcción de un sistema de generación eléctrica usando como recurso el biogás que se produce a través del estiércol de ganado vacuno. El proceso inició con la caracterización del estiércol de ganado vacuno en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP, los resultados presentan una relación carbono nitrógeno de 22,80 que generó una mayor velocidad de biodegradación de la materia prima y producción de biogás. Posterior a la mezcla de estiércol y agua en un biodigestor tipo batch herméticamente cerrado se obtuvo biogás durante un tiempo de retención de 35 días, al cual se realizó el análisis de cromatografía en el laboratorio de Análisis Instrumental del Departamento de Ingeniería Química EPN para comprobar el estado de pureza del metano que es el elemento principal como fuente de combustible. En las pruebas realizadas de generación de biogás se comprobó la obtención de un volumen de 0,72 m<sup>3</sup> de biogás en el tiempo anterior mencionado. Todo el proceso de selección de los elementos necesarios para la construcción y ensamblaje del sistema de generación de energía eléctrica se realizó a través de métodos analíticos y sistemáticos. El consumo de biogás para una carga de 120 W fue de 1,05 m<sup>3</sup>/h en un tiempo de prueba de 10 minutos y una eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica del 20%. Además se detalla la inversión realizada en el proyecto.

**Palabras clave:** eficiencia, absorción, inhibidores, caracterización, purificación biogás, generación energía.

## ABSTRACT

The present study exposes the design and selection of the elements for the construction of an electric generation system that uses the resource the biogas that is produced through the manure of cattle. The process began with the characterization of the study of cattle in the laboratory of the National Institute of Agricultural Research INIAP, the results presented a carbon nitrogen ratio of 22.80 that generated a greater speed of biodegradation of the raw material and production of biogas. After the mixture of manure and water in a hermetically sealed batch-type biodigester biogas was obtained during a retention time of 35 days, which was carried out the chromatography analysis in the Instrumental Analysis laboratory of the EPN Chemical Engineering Department to check the state of purity of the methane that is the main element as a source of fuel. In the tests carried out on the generation of biogas, it was proved that a volume of 0.72 m<sup>3</sup> of biogas was obtained in the aforementioned time. The entire process of selecting the necessary elements for the construction and the whole system of electric power generation was carried out through analytical and systematic methods. The biogas consumption for a load of 120 W was 1.05 m<sup>3</sup>/h in a test time of 10 minutes and an efficiency of the electric power generation system of 20%. The investment made in the project that has been executed is detailed.

**Keywords:** efficiency, absorption, inhibitors, characterization, biogas purification, energy generation.

# **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA GENERACIÓN DE 800 W A TRAVÉS DEL USO DE BIOGAS, PARA UNA PEQUEÑA GRANJA Y ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA**

## **INTRODUCCIÓN**

Ecuador es un país agrícola, la generación de desechos agrarios son una fuente de generación de energía, el Instituto de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), como una línea de investigación desarrolla varios proyectos para aprovechar la biomasa residual en el uso de energía en el Ecuador. [1]

El uso de la energía, suministra un indicador que relaciona las emisiones de dióxido de carbono con el consumo energético, se incrementó en un 2,5% en el periodo 2006 y 2015, por lo tanto el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector energético es de 35%, la energía renovable como son la hidráulica, eólica, fotovoltaica, geotérmica, biomasa, entre otras fuentes, son un aporte al suministro energético del país que incremento en un 12,2% en el periodo 2006 y 2015, además la oferta de energía renovable aumento en 49% en este periodo. [2]

La Comuna de Lumbisí se encuentra reconocida y amparada por la Ley de Organización y Régimen de Comunas, expedido mediante decreto supremo Nro. 142 del 30 de julio 1937, publicado en el Registro Oficial Nro. 558 de 6 de agosto de 1937 y registrada en el Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG, es considerada como una zona agrícola donde se cultivan tomate riñón, lechuga, acelga, babaco, limón, aguacate, maíz, cebada, trigo, garbanzo, cereales, otros granos, etc., productos que son orgánicos, además de la actividad de ganadería bovina, ovina, porcina, cunicultura, avicultura todas estas prácticas se lo realiza con conocimientos ancestrales y la experiencia de los pobladores. [3]

Los habitantes de la comunidad se han concentrado en la agricultura y ganadería desde la fundación de la comunidad, con estas consideraciones se ha estimado que los propietarios de los ganados vacunos, porcinos, no tienen un proceso controlado del estiércol que producen, utilizando como abono natural en los terrenos de siembra y en otros casos se desperdicia, desechan en quebradas generando contaminación ambiental, acumulación de insectos en las granjas y producción de gases de efecto invernadero. Con estas características se desea mejorar el proceso de utilización de estiércol del



ganado vacuno y utilizar en la generación de biogás amigable al medioambiente para producir electricidad como fuente de energía renovable para el aprovechamiento en la iluminación, uso en bombas de agua de pequeña capacidad para riego de cultivos para granjas de la comunidad de Lumbisí, así como la obtención de un fertilizante orgánico de buena calidad para utilizar en los cultivos.

El proceso más adecuado para la reducción de los gases de efecto invernadero es la digestión anaeróbica, se puede aprovechar energéticamente los residuos ganaderos, los beneficios de la digestión anaeróbica es la reducción significativa de malos olores, producción de biogás, reducciones incontroladas de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  donde se sustituye el consumo de energía fósil. [4] La digestión anaeróbica es la degradación biológica natural de la materia orgánica en ausencia de oxígeno que produce biogás. El biogás está compuesto de 60% - 70% de metano y 30% - 40% de dióxido de carbono y otras trazas de gases. Los tiempos de permanencia en el digestor anaeróbico varían ampliamente con el tiempo, lo que generalmente conduce a una producción de biogás más estable, la tasa de carga orgánica se refiere a la velocidad a la que se añaden sólidos volátiles a un digestor que se estima mediante la división del peso de sólidos volátiles agregados al digestor diariamente por el volumen del digestor. [5]

Con la información desarrollada se desea producir metano de gran contenido calorífico que sirva para utilizar en un generador y producir energía eléctrica, con la metodología a utilizar se estima purificar el biogás de manera que los compuestos que se presentan como es el sulfuro de hidrogeno  $\text{H}_2\text{S}$ , dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  disminuyan en su porcentaje en la composición debido a que afectan el óptimo funcionamiento del generador debido a que desgasta los componentes internos, el poder calorífico es menor, la eficiencia del equipo disminuye y al obtener en mayor porcentaje el metano por el proceso de purificación se tendrá un adecuado funcionamiento que mejorará en la eficiencia del generador.

## **Pregunta de investigación**

¿Las condiciones ambientales de la Comuna de Lumbisí garantizan el funcionamiento del sistema para la generación de energía eléctrica?

## **Objetivo general**

Realizar el diseño, construcción de un sistema de producción de energía eléctrica para la generación de 800 W a través del uso de biogás, para una pequeña granja y análisis energético del sistema.

## **Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización de los parámetros generales del estiércol de ganado vacuno para uso en la producción de biogás.
- Realizar el diseño y construcción de un sistema de generación de energía eléctrica con el uso de biogás.
- Determinar la eficiencia del sistema y la cantidad de energía eléctrica que generaría.
- Cuantificar la inversión en la que se llevaría a cabo del sistema de generación de energía eléctrica.

## **Alcance**

El sistema de producción de energía eléctrica se basará con un análisis sistemático para el diseño, selección y construcción de los elementos de sistema con el uso como combustible del biogás, que permitirá realizar las pruebas del proceso con carga y analizar el comportamiento sistema de generación de energía eléctrica. Además se verificará la inversión económica que se debe realizar en la implantación del proyecto de generación de energía eléctrica, con el uso de biogás como combustible.

## 1. MARCO TEÓRICO

La energía y los temas ambientales tienen mucha relación, como es el caso del efecto invernadero y la lluvia ácida, se asocian principalmente con el uso de la energía fósil. El ciclo de carbono en la naturaleza es básicamente equilibrado, pero la emisión artificial de CO<sub>2</sub> por la combustión o la desintegración de los recursos fósiles y otras materias orgánicas es la causa del aumento de CO<sub>2</sub> en el ambiente. La energía renovable es lo que actualmente necesita el mundo, la energía natural como la solar, eólica, hidráulica y geotérmica puede estar libres de problemas ambientales, se considera que la biomasa es neutral en CO<sub>2</sub> en la medida en que su producción y consumos estén equilibrados. [6]

### 1.1.1. Energías renovables, potencial energético de fuentes renovables América Latina y el Caribe

Es importante saber que los recursos distintos a la energía hidroeléctrica, son abundantes en la región y que podrían satisfacer la demanda regional hasta el 2030 y más, de acuerdo a la figura 1.1. El análisis de OLADE, presenta para la región la capacidad nominal de producción de energía es 34 TW, distribuida en 500 GW energía geotérmica, 3.400 GW oceánica, 450GW eólica en alta mar, 4.200 GW eólica en tierra firme, 17.000 GW fotovoltaica, 7.500 GW energía solar y 850 GW biomasa. [7]

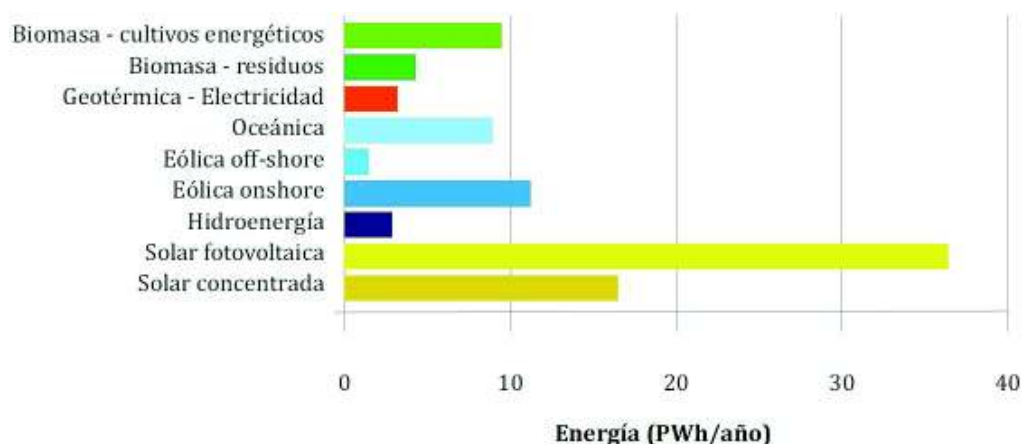


Figura 1.1. Potencial técnico regional total para las tecnologías renovables a largo plazo  
(Fuente: Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe 1, OLADE, 2017, p. 115)

### 1.1.2. Sector energético ecuatoriano

Con respecto a la oferta de electricidad figura 1.2., la generación de hidroenergía se incrementó 49% (13.096 GWh) y la energía térmica se redujo 2% respecto al 2014, además se destaca la instalación de muchos proyectos renovables que generan 512 GWh, cerca de 100 GWh más que el 2014. [8]

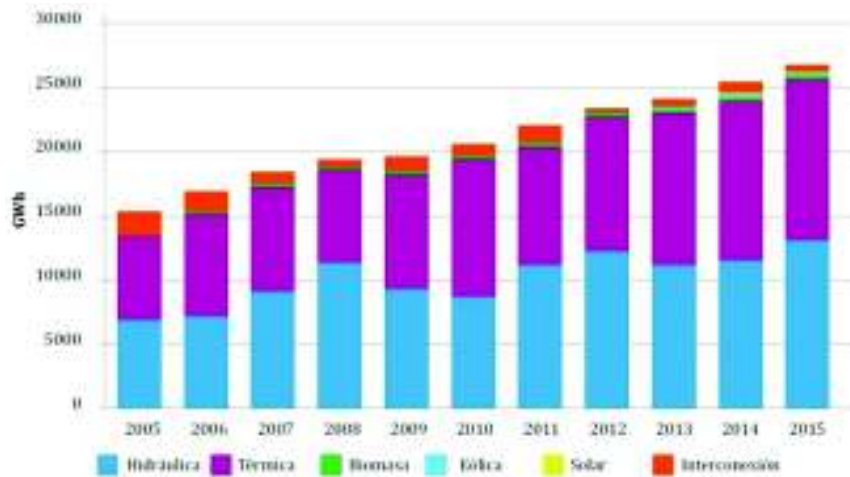


Figura 1.2. Generación de electricidad, GWh  
(Fuente: Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe 2, OLADE, 2017, p. 127)

## 1.2. Biomasa, características principales

La biomasa se considera como una fuente de energía solar, almacenada por las plantas por el proceso de fotosíntesis. El término biomasa cubre a una amplia gama de materiales orgánicos producidos a partir de plantas y animales, como fuentes de biomasa más representativas son los residuos de cultivos agrícolas, procesos forestales, de procesamiento de madera, desechos de animales, residuos sólidos urbanos, residuos de procesamiento alimenticio como se observa en la figura 1.3. Los combustibles de la biomasa pueden tomar diversas formas, tales como líquido, gas y sólido, se utilizan para la generación de energía eléctrica o mecánica. [6] [9]

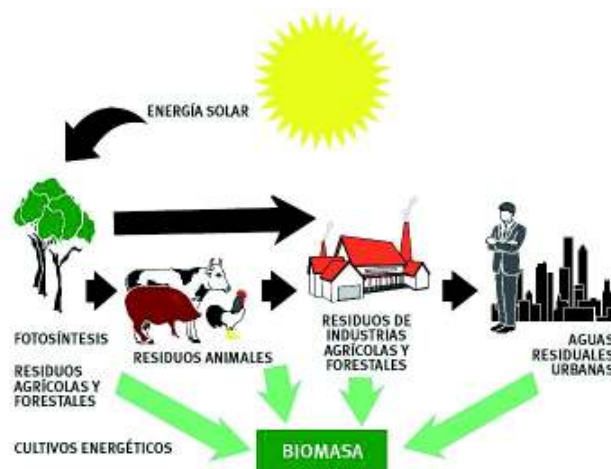


Figura 1.3. Generación de biomasa  
(Fuente: Energía de la biomasa, IDAE, 2007, p. 6)

La biomasa puede presentarse en forma:

- Seca
- Húmeda

### 1.2.1. Biomasa seca

La biomasa seca es la materia que tienen bajo contenido de agua y alto en lignocelulosa especialmente materiales que son convenientes para su conversión, como son la madera, pajas, cascara, etc., en la figura 1.4. se presenta los procesos de conversión de la biomasa seca en energía [10]

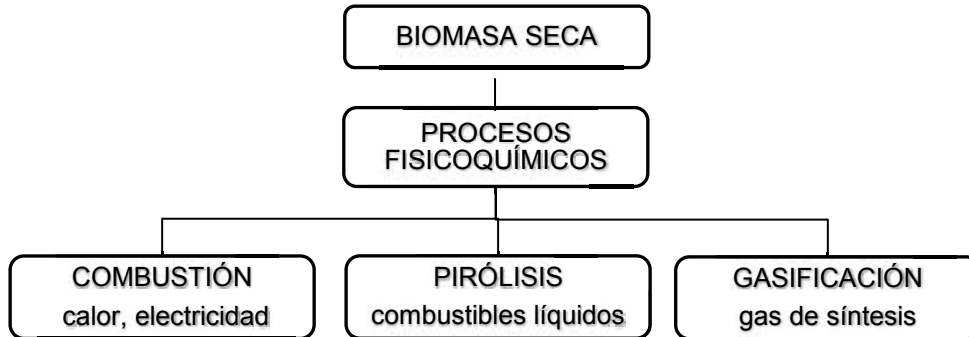


Figura 1.4. Biomasa seca  
(Fuente: Energía biomasa, Secretaria de energía, 2008, p. 16)

### 1.2.2. Biomasa húmeda

La biomasa húmeda tiene una variedad de materiales orgánicos como residuos vegetales, desechos agrícolas, estiércol de ganados, efluentes de las industrias de alimentos, se puede utilizar por procesos de bioconversión de los materiales orgánicos para producir diversos combustibles gaseoso y líquido, presentados en la figura 1.5. [10]

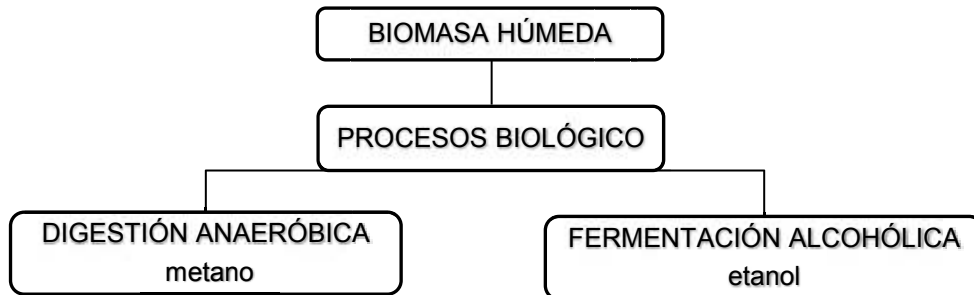


Figura 1.5. Biomasa húmeda  
(Fuente: Energía biomasa, Secretaria de energía, 2008, p. 17)

## 1.3. Digestión anaeróbica

Es la biodegradación de la biomasa, se fundamenta en el resultado de los procesos de digestión, asimilación y metabolización de un compuesto orgánico llevado a cabo por bacterias anaeróbicas o anaerobias, todo ese proceso es realizado en condiciones de no presencia del oxígeno. Un producto final de digestión anaeróbica es el biogás, una mezcla principalmente de metano, dióxido de carbono y una pequeña cantidad de otros gases, como sulfuro de hidrógeno y amoníaco. [10]

## 1.4. Etapas de la digestión anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica se divide en cuatro etapas, como se muestra en la figura 1.6. y sus etapas son:

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

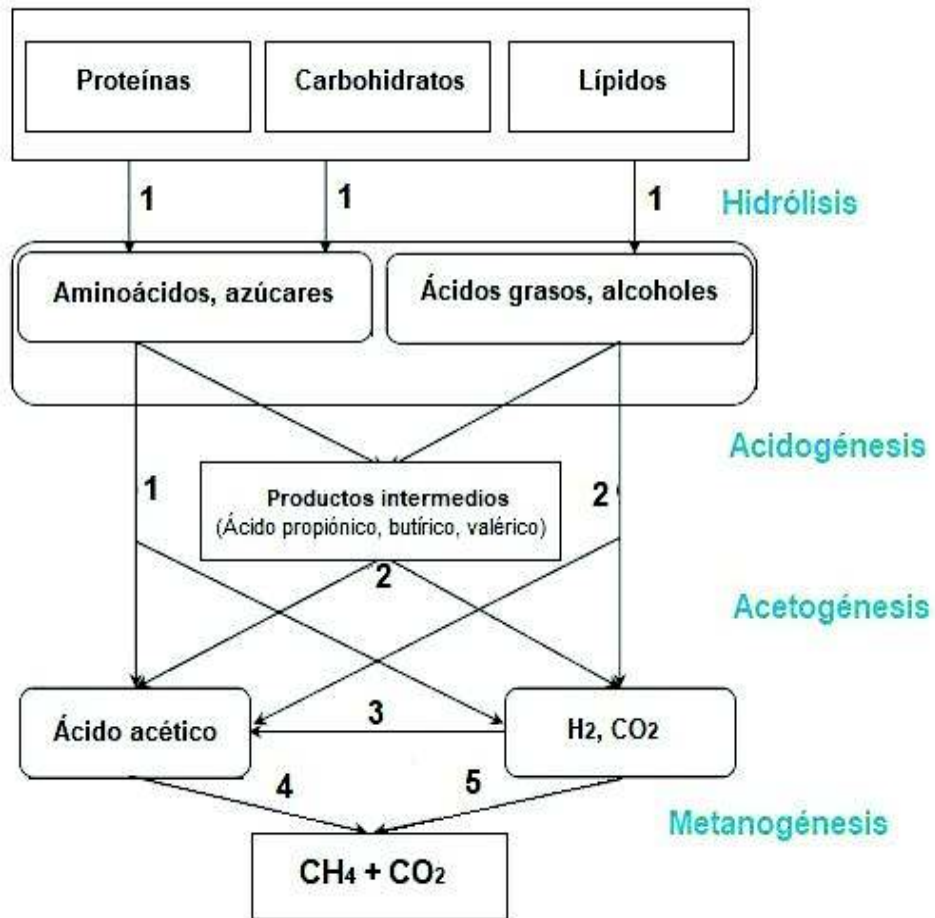


Figura 1.6. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos

- 1) Bacterias fermentativas
- 2) Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno
- 3) Bacterias acetogénicas que consumen hidrógeno
- 4) Bacterias metanogénicas acetoclásticas
- 5) Bacterias metanogénicas reductoras de dióxido de carbono.

(Fuente: Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production, 2009, p. 17)

#### **1.4.1. Hidrólisis**

Es la primera etapa donde los compuestos orgánicos complejos como lípidos, proteínas e hidratos de carbono son transformados por enzimas extracelulares, en productos solubles y fácilmente degradables, como azúcares, aminoácidos, alcoholes, etc.

El grupo de bacterias que actúa en esta primera etapa son las bacterias hidrolíticas acidogénicas. La actividad hidrolítica tiene una importancia significativa en residuos de alto contenido orgánico y puede convertirse en la fase limitante del proceso. Algunos métodos industriales mejoran la hidrólisis con el uso de agentes químicos. [11] [12]

#### **1.4.2. Acidogénesis**

Es la etapa de formación de ácido, los compuestos solubles producidos por hidrólisis o descargados al digestor se degradan por una gran diversidad de anaerobios y anaerobios facultativos a través de muchos procesos fermentativos. La degradación de estos compuestos da lugar a la producción de dióxido de carbono, gas hidrógeno, alcoholes, ácidos orgánicos, algunos compuestos de nitrógeno orgánico y compuestos orgánicos de azufre. El acetato es el principal ácido orgánico o ácido volátil utilizado como sustrato por bacterias formadoras de metano. [11]

#### **1.4.3. Acetogénesis**

En esta etapa el acetato se puede producir no solo a través de la fermentación de compuestos orgánicos solubles sino también a través de la acetogénesis. En este paso, los ácidos grasos volátiles de bajo peso molecular se convierten en acetato, gas hidrógeno y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas. Este proceso de conversión solo puede favorecerse termodinámicamente si la presión de hidrógeno parcial se mantiene baja. [12]

#### **1.4.4. Metanogénesis**

En la cuarta etapa, el gas metano es producido por bacterias productoras de metano. El metano se forma en torno al 66% del acetato por medio de la descarboxilación de acetato procedente de bacterias metanogénicas acetoclásticas y el 34% de la reducción del dióxido de carbono por hidrógeno, catalizada por hidrógeno que utiliza bacterias metanogénicas. En particular, el hidrógeno que utiliza las bacterias metanogénicas puede ser responsable de la baja presión parcial de gas hidrógeno en los reactores anaeróbicos, por lo que crean condiciones óptimas para que las bacterias acetogénicas descompongan los compuestos orgánicos hidrolizados distintos de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y acetato en sustratos para bacterias metanogénicas. [12]

En la tabla 1.1. se establece las principales reacciones bioquímicas que se producen en el proceso de digestión anaeróbica con los correspondientes cambios de energía libre. [13]

Tabla 1.1. Principales reacciones químicas que se producen en la digestión anaeróbica de la materia orgánica

Tipo de reacción	Ecuación	$\Delta G^{\circ -1}$	$\Delta G^{\circ -2}$
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$	-207	-319
Fermentación de la glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$	-135	-284
Fermentación del butirato a acetato e H <sub>2</sub>	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	+48,2	-17,6
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	+76,2	-5,5
Acetogénesis a partir del H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$	-105	-7,1
Metanogénesis a partir del CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub>	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-136	-3,2
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	-31	-24,7

(Fuente: Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología, 2002, p. 45)

## 1.5. Bacterias formadoras de metano

Las bacterias formadoras de metano son conocidas por varios nombres y son un grupo morfológicamente diverso de organismos que tienen muchas formas, patrones de crecimiento y tamaños como son:

- Bacterias metanogénicas
- Metanógenos
- Bacterias formadoras de metano
- Bacterias productoras de metano

Las bacterias formadoras de metano son anaerobios sensibles al oxígeno, esto no es una desventaja. Las bacterias formadoras de metano se encuentran en lugares que son ricos en compuestos orgánicos degradables, en estos lugares el oxígeno se elimina rápidamente a través de la actividad microbiana. Los tiempos reproductivos de bacterias formadoras de metano oscilan entre 3 días a 35°C y 50 días a 10°C. Debido al largo tiempo de generación de bacterias que forman CH<sub>4</sub>, requieren altos tiempos de retención



en un digestor anaeróbico para asegurar el crecimiento de una población de bacterias formadoras de CH<sub>4</sub> para la degradación de compuestos orgánicos. Se requieren al menos 12 días para obtener una gran población de bacterias que forman CH<sub>4</sub>. [11]

## **1.6. Condiciones determinantes en el proceso de digestión anaeróbica**

Algunos factores pueden afectar la velocidad y eficiencia de la digestión anaeróbica, ya sea por la mejora del proceso o la inhibición, que influyen en parámetros tales como la tasa de crecimiento específico, las tasas de degradación, la producción de biogás o la utilización del sustrato. A continuación se presenta algunos factores que influyen el rendimiento de la digestión anaeróbica: [14]

- Tiempo de retención hidráulico
- Relación carbono/nitrógeno de las materias primas
- Concentración de sólidos
- Agitación
- Temperatura
- Alcalinidad y pH
- Sustancias inhibidoras [12]

### **1.6.1. Tiempo de retención hidráulico**

El tiempo de retención hidráulica es el volumen de sustancia orgánica aplicada diariamente al digestor, por unidad de volumen como se observa en la ecuación 1.1. El tiempo de retención hidráulica es importante debido a que establece la cantidad de tiempo disponible para el crecimiento bacteriano y la posterior conversión del material orgánico en gas. [15]

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (1.1.)$$

Dónde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico (días)

V= Volumen total de digestor (m<sup>3</sup>)

Q= Carga de flujo (m<sup>3</sup>/día)

Para el estiércol líquido sometido a fermentación en el rango de temperatura mesófila, se aplican los siguientes valores aproximados:

- Estiércol líquido de vaca: 20-30 días.
- Estiércol de cerdo líquido: 15-25 días.
- Estiércol de pollo líquido: 20-40 días.
- Abono animal mezclado con material vegetal: 50-80 días. [15]

Existe otro parámetro para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el digestor, se denomina tiempo de retención de sólidos, se define como la masa de organismos en el reactor dividida por la masa de organismos eliminados del sistema cada día de acuerdo como se presenta en la ecuación 1.2. [16]

$$TRS = \frac{M_t}{M_e} \quad (1.2.)$$

Dónde:

TRS= Tiempo de retención sólida (días)

Mt = peso total de sólidos en suspensión en el sistema de tratamiento (kg)

Me = peso total de los sólidos en suspensión que salen del sistema por día, incluidos tanto el desperdicio deliberado como el desagüe de la planta (kg/día).

En un digestor convencional totalmente mezclado o de flujo que varié, el TRH es igual a la TRS. Sin embargo, en una variedad de reactores de biomasa retenidos, el TRS excede el TRH. Como resultado, los digestores de biomasa retenidos pueden ser mucho más pequeños mientras se logra la misma conversión de sólidos a gas. El parámetro de TRS es importante para los digestores avanzados de alto nivel, tienen un control independiente del TRS y del TRH a través de la retención de la biomasa. [16] [17]

### **1.6.2. Relación carbono/nitrógeno de las materias primas**

Es esencial mantener un equilibrio de los niveles de nutrientes para que realicen un trabajo adecuado las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes que son necesarios para producir biogás. El carbono y el nitrógeno son primordiales para la alimentación de las bacterias metanogénicas.

El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de estructura celular. Se reconoce como aceptable una relación C/N de 20-30:1. Las excretas de humanos y animales son ricos en sus niveles en nitrógeno, con una relación C/N menor a 25:1, la ventaja es que tienen mayor velocidad de biodegradación,

generación de biogás y los residuos agrícolas son ricos en carbono con una relación C/N mayor a 30:1, con la desventaja que es lenta el proceso de producción de biogás. La relación C/N de la mezcla puede calcularse aplicando la siguiente ecuación 1.3. [17] [18]

$$K = \frac{C1 * X1 + C2 * X2 + \dots}{N1 * X1 + N2 * X2 + \dots} = \frac{\sum Ci * Xi}{\sum Ni * Xi} \quad (1.3)$$

Dónde:

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

X = Peso fresco de cada materia (kg)

A continuación se presenta la tabla 1.2. que establece valores aproximados de la relación de C/N de varios residuos.

Tabla 1.2. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural

Materias Primas	Contenido de las materias primas por peso % C	Contenido de las materias primas por peso % N	C/N
<b>Residuos de estiércol fresco de animales</b>			
Bovinos	30	1,30	25:1
Equinos	40	0,80	50:1
Ovinos	35	1,00	35:1
Porcinos	25	1,50	16:1
Caprinos	40	1,00	40:1
Conejos	35	1,50	23:1
Gallinas	35	1,50	23:1
Patos	38	0,80	47:1
Excretas humanas	2,5	0,85	3:1
<b>Residuos vegetales</b>			
Paja seca de trigo	46	0,53	87:1
Paja seca de cebada	58	0,64	90:1
Paja seca de arroz	42	0,63	67:1
Paja seca de avena	29	0,53	55:1
Rastrojos maíz	40	0,75	53:1
Leguminosas	38	1,50	28:1
Hortalizas	30	1,80	17:1
Tubérculos	30	1,50	20:1
Hojas secas	41	1,00	41:1
Aserrín	44	0,06	730:1

(Fuente: Manual de biogás, 2011, p. 36)

Además es necesario conocer sobre las materias primas ricas en carbono, que producen mayor cantidad de biogás que las materias primas ricas en nitrógeno. En los 10 primeros días de fermentación las materias primas nitrogenadas generan 34,4% - 46% del total de biogás producido y las ricas en carbono solo aportan el 8,8%.

Para controlar adecuadamente este parámetro que afecta, el buen rendimiento de generación de biogás en forma constante, es importante agregar materias primas ricas en nitrógeno a las materias primas que tengan alta relación de C/N con la finalidad de bajar dicha relación. Se puede agregar paja y tallos de maíz a los residuos de animales y determinar qué cantidad de tallos de maíz con la ecuación 1.3. [18]

### **1.6.3. Concentración de sólidos**

En la producción de biogás está en función de los materiales sólidos y de la biodegradación en el biodigestor. Para el tratamiento de los efluentes y operación del biodigestor no es recomendable que la carga a degradar se presente muy espesa y también no es recomendable que sea muy diluida. Se establece que para digestores continuos el porcentaje es de 7% – 13 %, donde se presentará un funcionamiento aceptable y el porcentaje óptimo es 10%. Para los digestores discontinuos la concentración es más alta, el funcionamiento óptimo es de 25% de concentración de sólidos totales. [14]

### **1.6.4. Agitación**

La materia orgánica y las distintas formas de fermentación requieren la mezcla del sustrato con la finalidad de mantener estabilidad en el interior del biodigestor. Los objetivos más importantes de la agitación son:

- Mezcla de sustrato fresco y población de microorganismos.
- Preclusión de formación de espuma y sedimentación.
- Evitar gradientes de temperatura pronunciados dentro del digestor y provisión de una densidad de población de microorganismos uniforme.
- Prevención de la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del digestor.

Al seleccionar o diseñar un medio de agitación adecuado, se deben considerar los siguientes puntos:

- Cada vez que se interrumpe la comunidad bacteriana, el proceso de fermentación seguirá siendo más o menos improductivo hasta que se forme una nueva comunidad

equivalente. En consecuencia, la mezcla excesiva o demasiado frecuente suele ser perjudicial para el proceso. La agitación lenta es mejor que la agitación rápida.

- Una capa delgada de espuma no necesariamente tiene un efecto adverso en el proceso. Para los sistemas donde el digestor está completamente lleno de sustrato, existe poco o ningún peligro de que la escoria obstaculice la extracción de gas.
- Algunos tipos de sistemas de biogás pueden funcionar bien, sin ninguna agitación mecánica. Dichos sistemas se operan generalmente sobre sustratos con un contenido sólido tan alto, que no se produce estratificación. [15]

### 1.6.5. Temperatura

Un problema común asociado con los digestores anaeróbicos es la pérdida de capacidad de calentamiento y el mantenimiento de la temperatura estable del digestor. La Figura 1.7. muestra las tasas de rendimiento relativo de biogás dependiendo de la temperatura y el tiempo de retención, es así si tenemos una temperatura baja la tasa de crecimiento del biogás es baja a pesar de que se considere un tiempo de retención mayor es decir el sistema no es eficiente. [11] [19]

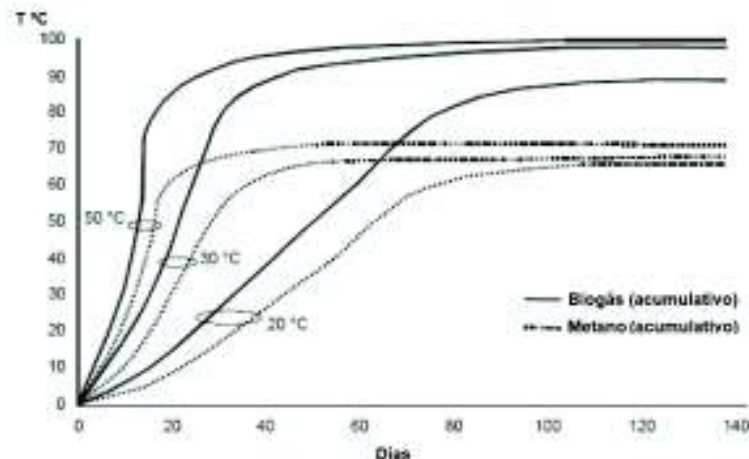


Figura 1.7. Rendimientos relativos de biogás, temperatura y tiempo de retención (Fuente: Biogás handbook, 2008, p. 24)

A continuación en la tabla 1.3. se presenta rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.

Tabla 1.3 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

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

(Fuente: Manual del biogás, 2011)

Los rangos que se presentan en la tabla 1.3 son las condiciones adecuadas para el desarrollo y crecimiento de las bacterias para la producción de biogás, en la figura 1.8 se observa el crecimiento metanogénico de acuerdo a la temperatura, donde la mayoría de las bacterias formadoras de metano son activas en dos rangos de temperatura, el intervalo mesofílica de 25 °C a 35 °C y el intervalo termofílica de 50 °C a 60 °C.

A temperaturas entre 40 °C y 50 °C, las bacterias formadoras de metano son inhibidas como se observa en la figura 1.8. El rendimiento del digestor oscila en algún lugar cerca de los 42 °C, ya que representa la transición de los organismos mesófilos a los termofílicos, en la práctica la temperatura de operación se elige teniendo en cuenta la materia prima utilizada y la temperatura de proceso necesaria suele proporcionarse mediante sistemas de calefacción de suelo o pared, dentro del digestor. [11]

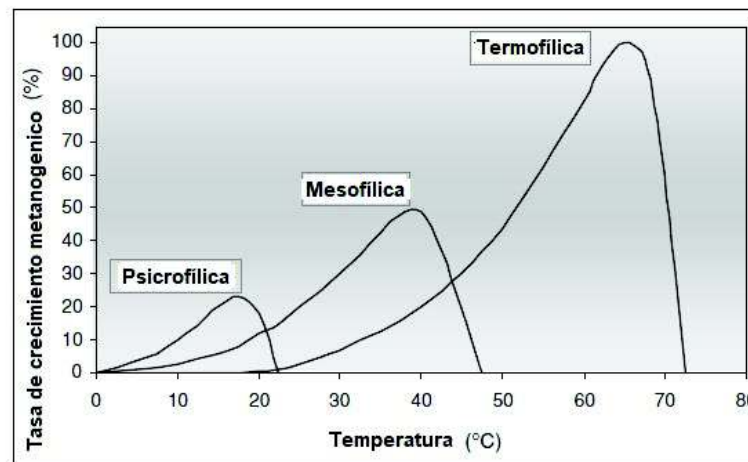


Figura 1.8. Tasa de crecimiento metanogénico  
(Fuente: Anaerobic Reactors, 2007, p. 28)

Una forma de aumentar la eficiencia del sistema en el interior del biodigestor es calentar el efluente, un método puede ser el hacer circular agua caliente por un serpentín en el interior de la cámara de fermentación, de esa manera se garantiza una temperatura homogénea en el digestor. También se puede conservar una temperatura adecuada al realizar una aislación térmica, debido a que la fermentación en el interior del biodigestor produce calor, además de disponer de distintos materiales aislantes facilita el proceso de conservar una temperatura conveniente que demandan las bacterias metanogénicas. [18]

### 1.6.6. Alcalinidad y pH

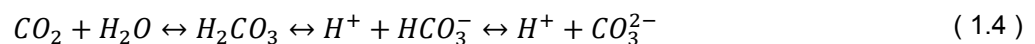
El pH describe a la cantidad de ácido que está presente en el sustrato. Los valores de pH óptimos para la acidogénesis y la metanogénesis son diferentes. Durante la acidogénesis se forman ácidos acético, láctico y propiónico, lo que resulta en una caída del nivel de pH.

Para proteger las bacterias metanogénicas necesitan de un pH alto, pero su alimento viene de la etapa acida. Cuando las bacterias metanogénicas se inhiben por un cambio brusco de temperatura disminuye el pH, esto termina de destruir las delicadas bacterias metanogénicas. [12] [15]

Suficiente alcalinidad es esencial para un control adecuado del pH. Si existe una disminución en alcalinidad suele proceder a un cambio rápido en el pH. La mayoría de las bacterias anaerobias, incluidas las bacterias formadoras de metano, tienen un buen rendimiento dentro de un rango de pH de 6,8 a 7,2. Una disminución de la alcalinidad puede ser causada por:

- Una acumulación de ácidos orgánicos debido al fallo de las bacterias formadoras de metano para convertir los ácidos orgánicos en metano.
- Una descarga de ácidos orgánicos en el digester anaeróbico.
- La presencia de residuos que inhiben la actividad de las bacterias formadoras de metano.

Al degradarse los aminoácidos y las proteínas, se liberan dióxido de carbono y amoníaco. La liberación de dióxido de carbono da como resultado la producción de ácido carbónico, alcalinidad de bicarbonato y alcalinidad de carbonato, la reacción química se presenta en la ecuación 1.4. La liberación de amoníaco produce la producción de iones de amonio de acuerdo a la ecuación 1.5. [11]



Es mejor cuando el pH está dentro del intervalo de 7,0 a 7,2. Los valores de pH por debajo de 6 o por encima de 8 son restrictivos y algo tóxicos para bacterias formadoras de metano. Para mantener un pH estable, se requiere un alto nivel de alcalinidad. [11]

Al tener una caída del pH y un aumento del CO<sub>2</sub> en el biogás, es una indicación de una alteración del proceso de fermentación. Las medidas para prevenir la acidificación son:

- Parada del suministro de sustrato, para que las bacterias metanogénicas puedan degradar el ácido.
- Reducción de la carga orgánica (aumento del tiempo de retención)
- Aumento del potencial de amortiguación del sustrato mediante la adición de co-sustratos, en particular si el potencial de amortiguación del sustrato es pequeño. Debe

tenerse en cuenta que el potencial de almacenamiento intermedio cambia debido a la eliminación del CO<sub>2</sub>.

- Adición de sustancias neutralizantes: Cal u oxido de calcio (CaO), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), hidróxido de sodio (NaOH).
- Adición de agua diluida.
- Vaciar y reiniciar el proceso de fermentación. [20]

### 1.6.7. Sustancias inhibidoras

La inhibición en el proceso de digestión anaeróbica por la presencia de sustancias tóxicas puede ocurrir en diversos grados, causando un trastorno de la producción de biogás y la eliminación orgánica o incluso la falla del digester. Este tipo de sustancias se pueden encontrar como componentes del sustrato de alimentación. La razón principal de estas variaciones es la influencia significativa de mecanismos microbiológicos como la aclimatación, el antagonismo y la sinergia. La aclimatación es la capacidad del microorganismo para reordenar sus recursos metabólicos para superar el bloqueo metabólico producido por las sustancias inhibidoras o tóxicas cuando las concentraciones de estas sustancias. El antagonismo se define como una reducción del efecto tóxico de una sustancia por la presencia de otra, mientras que la sinergia es un aumento en el efecto tóxico de una sustancia por la presencia de otra. En la tabla 1.4. se muestran valores de concentraciones de algunos inhibidores. [11] [17]

Tabla 1.4. Concentración inhibidora de sustancias en un sistema anaeróbico

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO <sub>4</sub>	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO <sub>3</sub>	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200 – 500 mg/l
CN	25 mg/l
Na	3500 – 5500 mg/l
K	2500 – 4500 mg/l
Ca	2500 – 4500 mg/l
Mg	1000 – 1500 mg/l

(Fuente: Manual de biogás, 2011, p. 49)

Las estrategias para minimizar el efecto de las sustancias inhibitorias pueden ser:

- Eliminación de posibles sustancias inhibidoras, tóxicas del sustrato de alimentación.
- Adición de sustancias químicas para insolubilizar las sustancias inhibitorias.



- Adición de material que sea antagónico a las sustancias inhibidoras para contrarrestar el efecto inhibidor. [12]

## 1.7. Biodigestor

El biodigestor en una forma básica de un tanque cerrado, hermético, aislado, donde se deposita la materia orgánica, disolviendo con una determinada cantidad de agua y se lleva a cabo la fermentación anaeróbica por la acción de microorganismos, la materia orgánica puede ser: desechos agrícolas, forestales, aguas residuales urbanas e industriales, residuos sólidos urbanos y el estiércol de animales; posteriormente se produce el biogás y un subproducto liquido conocido como biol. En la figura 1.9. se presenta un biodigestor horizontal. [21] [22]

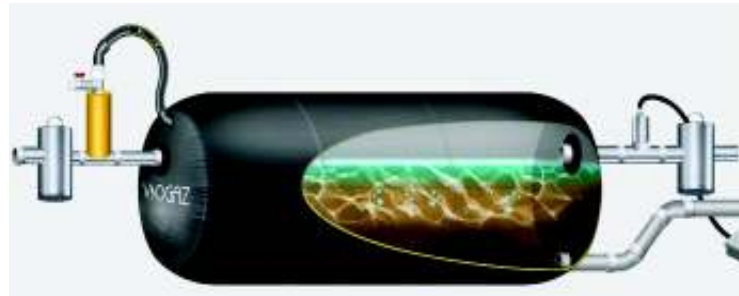


Figura 1.9. Biodigestor prefabricado a base de geomembrana de PVC  
(Fuente: <http://www.viogaz.com/biodigestores-viogaz.html>)

### 1.7.1. Componentes de un biodigestor

Existe una variedad de formas de diseño de biodigestores que pueden ser de forma vertical, horizontal, rectangular, cilíndrica o dependiendo del flujo del proceso, a continuación se presenta un esquema general en la figura 1.10., con sus componentes principales. [21]

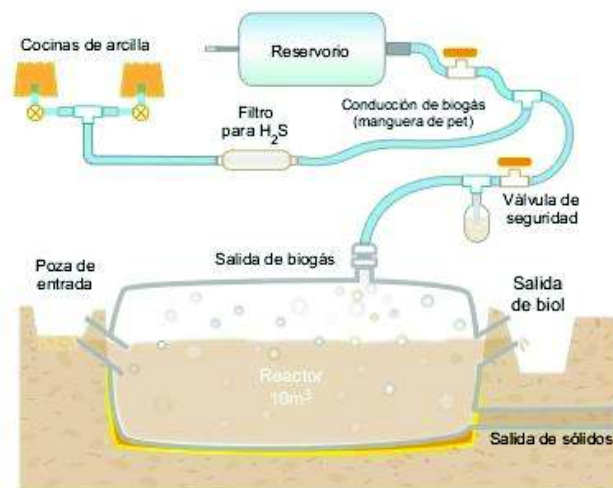


Figura 1.10. Biodigestor, componentes  
(Fuente: Biodigestores tubulares unifamiliares, 2013, p. 5)

## 1.8. Tipos de biodigestores anaeróbicos para desechos sólidos orgánicos

Los biodigestores anaeróbicos se pueden clasificar atendiendo a varios criterios para tratar los residuos orgánicos:

### 1. Por la temperatura

- Fermentación termofílica
- Fermentación mesofílica

### 2. Modo de alimentación

- Continua
- Semicontinua
- Modo batch

### 3. Por el número de etapas

- Una sola etapa
- Dos o más etapas

#### 1.8.1. Por la temperatura

- **Fermentación termofílica.** En este proceso trabaja en una temperatura de 50 °C a 60 °C, la digestión en el interior de la cámara de fermentación es rápida, dispone un una generación alta de gas y un corto tiempo de retención. La digestión termofílica anaeróbica se usa con mayor frecuencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, donde el calor del proceso o el vapor están disponibles para calentar los digestores al rango termofílico. [11]
- **Fermentación mesofílica.** El proceso se mantiene a una temperatura de 25 °C a 35 °C, la descomposición de la materia orgánica es lenta, por lo tanto el tiempo de retención aumenta y la generación del biogás es menor a comparación de la fermentación termofílica. La digestión mesófila anaeróbica de los lodos se usa comúnmente en el proceso de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. [11]

#### 1.8.2. Modo de alimentación

- **Continuo.** En los biodigestores de sistema continuo la materia prima fresca ingresa continuamente al biodigestor, el efluente que se descarga es igual al que ingresa. La producción de biogás es uniforme, una característica importante es la alta dilución de la materia prima. Utilizados generalmente para el tratamiento de aguas negras. [18]

El modelo Kompogas de digestión anaeróbica continua, es un proceso de fermentación a temperatura termofílica (50°C a 60°C). El digestor está equipado con impulsores de rotación lenta y acción intermitente que garantiza la mezcla y ayuda a la recirculación de materiales pesados como se detalla en la figura 1.11. [12]

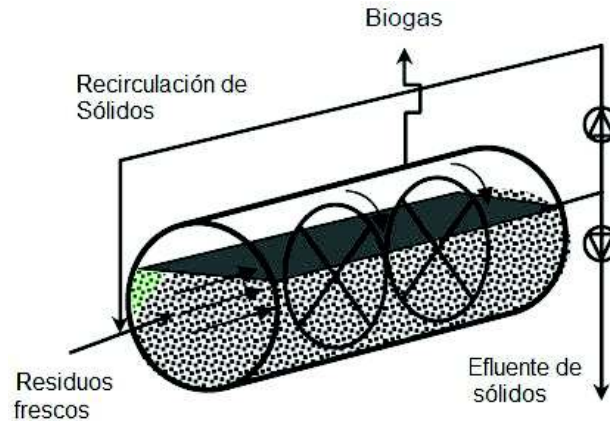


Figura 1.11. Biodigestor modelo Kompogas  
(Fuente: Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production, 2009, p.25)

- **Semicontinuo.** En este sistema la primera carga que ingresa consta de varios desechos orgánicos, al disminuir el rendimiento del biogás se agrega nuevas materias primas y se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad, el sustrato a degradar ocupa el 80% del volumen del digestor y 20% del volumen se reserva para cargas continuas o intermedias a medida que disminuye la generación de biogás. Los modelos más conocidos son el digestor Chino figura 1.12. e Hindú. [17] [18]

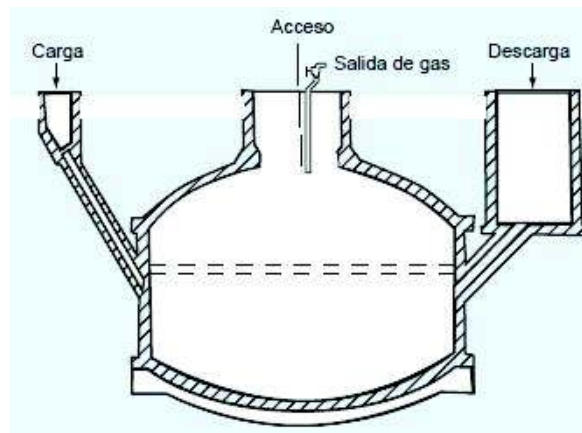


Figura 1.12. Biodigestor tipo chino  
(Fuente: Manual de biogás, 2011, p. 98)

- **Batch.** Los digestores se llenan con materia prima fresca, se sellan herméticamente durante todo el tiempo de retención, para la formación del biogás como se observa en la figura 1.13., después se abre y se elimina el efluente, este proceso se puede

realizar varias veces. El material que se carga se caracteriza por una alta concentración de sólidos. [18]

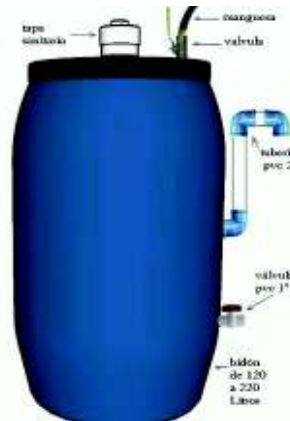


Figura 1.13. Biodigestor batch  
(Fuente: <https://ecoinventos.com/biodigestor-casero/>)

### 1.8.3. Por el número de etapas

- **Una sola etapa.** Este proceso se realiza en un digestor de una etapa o depósito, consiste en un solo tanque, figura 1.14. Debido a que las bacterias formadoras de ácido crecen más rápidamente que las bacterias que forman metano y son más tolerantes a las fluctuaciones en las condiciones operacionales, a menudo ocurre un desequilibrio entre la tasa de producción de ácido y la tasa de producción de metano. Este desequilibrio puede causar una disminución en la alcalinidad y pH que da como resultado la falla del digestor. [11]

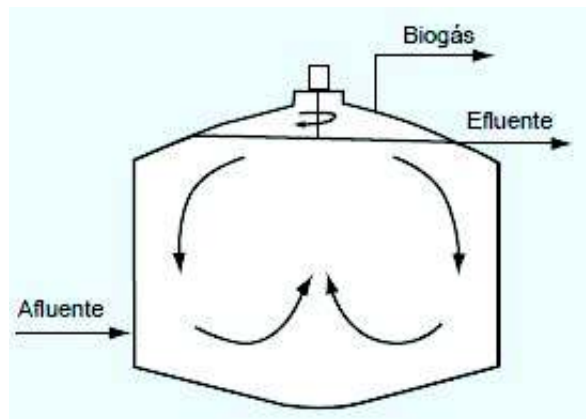


Figura 1.14. Biodigestor de una sola etapa  
(Fuente: Manual de biogás, 2011, p. 92)

- **Dos o más etapas.** La digestión se produce en dos o más cámaras de fermentación. El material en la primera cámara se degrada produciendo biogás, al pasar el efluente a la segunda cámara de fermentación produce un nuevo proceso de digestión, este principio se aplica para construir digestores de 3 o 4 etapas. [18] Un modelo digestor

anaeróbico con dos etapas denominado Schwarting como se observa en la figura 1.15., donde el primer reactor funciona a temperatura mesófila (25 °C a 35°C) para hidrólisis, mientras el segundo reactor se opera a temperatura termófila (50 °C a 60°C) para la metanogénesis. La interrupción se precalienta a la temperatura deseada mediante intercambiadores de calor y luego se bombea a través de una serie de placas perforadas colocadas dentro del reactor. [12]

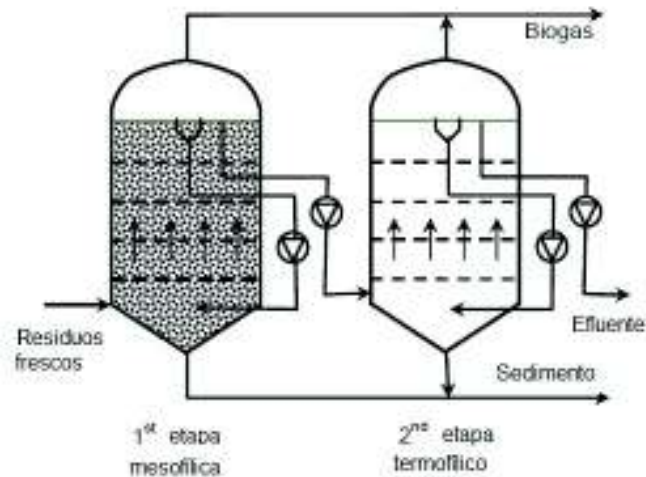


Figura 1.15. Biodigestor modelo Schwarting  
(Fuente: Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production, 2009, p.25)

## 1.9. Biogás

De la digestión anaeróbica de los desechos orgánicos resulta una producción de una mezcla de gases, conjuntamente estos gases se conocen como biogás, teniendo en cuenta que el único gas de valor económico que se produce es el metano.

El metano es inodoro y se quema de forma limpia de acuerdo a la ecuación 1.6. El metano puro tiene un valor de calor de 8905 kcal/m<sup>3</sup>. Cuando el CH<sub>4</sub> se mezcla con CO<sub>2</sub> que se produce en digestor anaeróbico, su valor de calor disminuye significativamente. [11]



### 1.9.1. Características del biogás

En la tabla 1.5. se realiza una comparación de los valores energéticos del biogás con otras fuentes de energía. [23]

Tabla 1.5. Energía equivalente Biogás vs. otras fuentes

Valores	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> S	Otros	Biogás 60/40
Proporciones volumen %	55 - 70	27 - 44	1	3	100
Valor calorífico MJ/m <sup>3</sup>	35,8	--	10,8	22	21,5
kJ/kg	8600	--	2581	5258	20934
Ignición % en aire	5 - 15	--	--	--	6 - 12
Temperatura de encendido °C	650 - 750	--	--	--	650 - 750
Presión crítica MPa	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5 - 8,9
Densidad nominal g/l	0,7	1,9	0,08	--	1,2
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Volumen en % aire	5 - 15	--	--	--	6 - 12

(Fuente: Manual para la producción de biogás, 2011, p. 34)

### 1.9.2. Composición de biogás de diversas fuentes

A continuación en la tabla 1.6. se presenta la composición del biogás de algunos elementos y compuestos químicos de acuerdo a diversas fuentes de materia prima. [10]

Tabla 1.6. Composición del biogás derivado de diversas fuentes

Gases	Desechos agrícolas	Desechos industriales	Relleno sanitario	Propiedades
Metano	50 - 80%	50 - 70 %	46 - 65 %	Combustible
Dióxido de carbono	30 - 50%	30 - 50%	34 - 55%	Ácido, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo, reduce valor calorífico
Hidrógeno	0 - 2 %	0 - 2 %	0 - 1 %	Combustible
Sulfuro de hidrógeno	100 -700 ppm	0 - 8 %	0,5 - 100 ppm	Corrosivo, tóxico, oloroso
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
Monóxido de carbono	0 - 1 %	0 - 1 %	Trazas	Tóxico
Nitrógeno	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 20 %	Inerte
Oxígeno	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 5 %	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	5ppm, (hidrocarburos)	Corrosivo, oloroso

(Fuente: Energía de biomasa, 2004, p. 33)

### 1.9.3. Características de sus principales contaminantes

El biogás es una mezcla de varios componentes, por lo que contiene partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización que tendrá el biogás. La purificación del biogás es importante para: [20]

- Aumentar el poder calorífico del biogás
- Cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.).

En la tabla 1.7. se describe los impactos y el porcentaje de algunos componentes e impurezas que se presentan al generarse el biogás.

Tabla 1.7. Componentes típicos e impurezas en biogás

Compuesto	Contenido	Efecto
CO <sub>2</sub>	25 – 50 % por volumen	- Disminuye el poder calorífico - Aumenta las propiedades antidetonantes de los motores - Causa corrosión (ácido de carbono de baja concentración).
H <sub>2</sub> S	0 – 0,5% por volumen	- Efecto corrosivo en equipos y sistemas de tuberías (corrosión bajo tensión), muchos fabricantes de motores establecen un límite superior de 0,05 por vol.% - Emisiones de H <sub>2</sub> S con combustión imperfecta - límite superior 0,1 por vol.%
NH <sub>3</sub>	0 – 0,05% por volumen	- NOx emisiones después de que los quemadores dañan las celdas de combustible - Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores
Vapor de agua	1 – 5% por volumen	- Causa corrosión de equipos y sistemas de tuberías - Los condensados dañan instrumentos y plantas - Riesgo de congelación de sistemas de tuberías y boquillas
N <sub>2</sub>	0 – 5% por volumen	- Reduce el poder calorífico - Aumenta las propiedades antidetonantes de los motores

(Fuente: Biogas from waste and renewable resources, 2008, p. 52)

### 1.10. Purificación del biogás

El propósito de purificación o acondicionamiento del biogás implica la eliminación de gran parte del H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, vapor de agua y otros gases traza del biogás que afectan el uso de un motor de combustión interna. Existen distintas formas de purificar el biogás con la finalidad de obtener metano en un mayor porcentaje. [17]

### 1.10.1. Métodos de eliminación de CO<sub>2</sub>

Se describe algunos métodos, físicos químicos para eliminar el dióxido de carbono:

- Absorción física
- Absorción química
- Separación por membrana
- Método de conversión química

**Absorción física:** La absorción fisicoquímica puede ser utilizados en bajos caudales, requiere poca infraestructura y bajo costo, utiliza agua presurizada como absorbente. El biogás crudo es comprimido y alimentado desde el fondo a una columna de lecho empacada y el agua presurizada es rociada desde la cima de la columna. El proceso de absorción es un proceso contra-corriente. El agua puede ser recirculada a una torre de purificación. [24]

**Absorción química:** Se basa en la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente, por lo tanto, comprende la ruptura de esos enlaces y el correspondiente aporte de energía. Los solventes químicos generalmente emplean soluciones acuosas de aminas por ejemplo mono, di o tri-ethanolamina o soluciones acuosas de sales alcalinas ejemplo hidróxido de sodio, potasio y calcio. El proceso de absorción es un proceso contra-corriente a través de una columna de absorción. [24]

**Separación por membrana:** El principio de esta técnica es que algunos componentes del gas crudo pueden ser transportados a través de una membrana delgada (menor a 1 mm) mientras que otros son retenidos. El transporte de cada componente se debe a la diferencia de presión parcial sobre la membrana y depende ampliamente de la permeabilidad del componente en el material de la membrana. El producto de gas contiene alrededor de 88% v/v de metano. Los procesos de separación multietapas pueden lograr 98% v/v, la presión necesaria para esta operación es 4 MPa. [24]

**Método de conversión química:** Se utiliza cuando se quiere obtener una alta purificación en el biogás. El método de conversión química se utiliza luego de una buena remoción lograda con otros métodos. Uno de dichos procesos de conversión es la metanización, por el cual el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub> son convertidos catalíticamente en metano y agua. Este proceso se considera muy costoso en su implementación. [24]



### 1.10.2. Métodos de eliminación de H<sub>2</sub>S

Se describe los métodos, físicos químicos para eliminar sulfuro de hidrogeno:

- Proceso seco de oxidación
- Procesos de lavado
- Procesos biológicos
- Reacción química, tecnología seca

**Proceso seco de oxidación.** Se realiza mediante la introducción de aire/hidrógeno dentro del sistema de biogás, es un proceso simple y de bajo costo. No se necesitan químicos y equipos especiales. Dependiendo de la temperatura, el tiempo de reacción y el lugar donde el aire se agrega, la concentración de H<sub>2</sub>S se puede reducir en un 95% a menos de 50 ppm. [24]

**Procesos de lavado.** Con este proceso se puede llegar a eficiencia de remoción superior al 99,5% de H<sub>2</sub>S, para velocidades de gas superficial mayores a 15 m/s y con velocidades de líquido superficial mayores a 4 m/s. Sin embargo, este método presenta una serie de inconvenientes al ser aplicados en la purificación de biogás. [24]

**Procesos biológicos.** Para el caso de H<sub>2</sub>S en el biogás, los métodos que utilizan bacterias anaerobias fototróficas tienen la ventaja inherente de mantener el carácter anaeróbico del gas y evitar cualquier potencial problema de seguridad. *Cholorobium limicola* es una bacteria que es aconsejable usar, debido a su crecimiento utilizando sólo sustratos inorgánicos, a la eficiencia en la conversión de sulfuro a azufre elemental, y a la producción extracelular de azufre elemental. Si la luz se controla correctamente, el producto de la oxidación es en gran medida azufre, que no es tóxico ni corrosivo. [24]

**Reacción química, tecnología seca.** Las tecnologías secas se conforman de sustratos, por donde fluye el biogás libremente, reaccionando química o físicamente con el mismo, que retiene así el H<sub>2</sub>S, a su paso. El sustrato “seco” más utilizado es una forma y fuente de óxido de hierro, el cual reacciona con el H<sub>2</sub>S, para formar sulfuro de hierro, un compuesto no gaseoso, por tanto no podrá seguir el flujo con el biogás.

La reacción química de óxido de hierro con sulfuro de hidrógeno se presenta en la ecuación 1.7.



Existen más de 60 formas de óxido de hierro, formando diferentes tipos de estructuras cristalinas y cada uno tendrá una reacción química diferente con el H<sub>2</sub>S, por tanto, su eficiencia es variable. Entre otros sustratos secos, se mencionan: óxido de zinc, sólidos alcalinos (hidróxido de sodio), absorbentes, tales como el carbón activado, y la zeolita. Este tipo de productos son utilizados en menor grado dado sus altos costos de implementación. [25]

### 1.11. Utilización del biogás

El biogás tiene muchas aplicaciones para generación de energía, dependiendo de la naturaleza de la fuente de biogás y la demanda local. En general, el biogás puede usarse para la producción de calor por combustión directa, producción de electricidad por celdas de combustible o micro-turbinas, generación de cogeneración o como combustible para vehículos, en la figura 1.16. se muestra la utilización del biogás. [19]

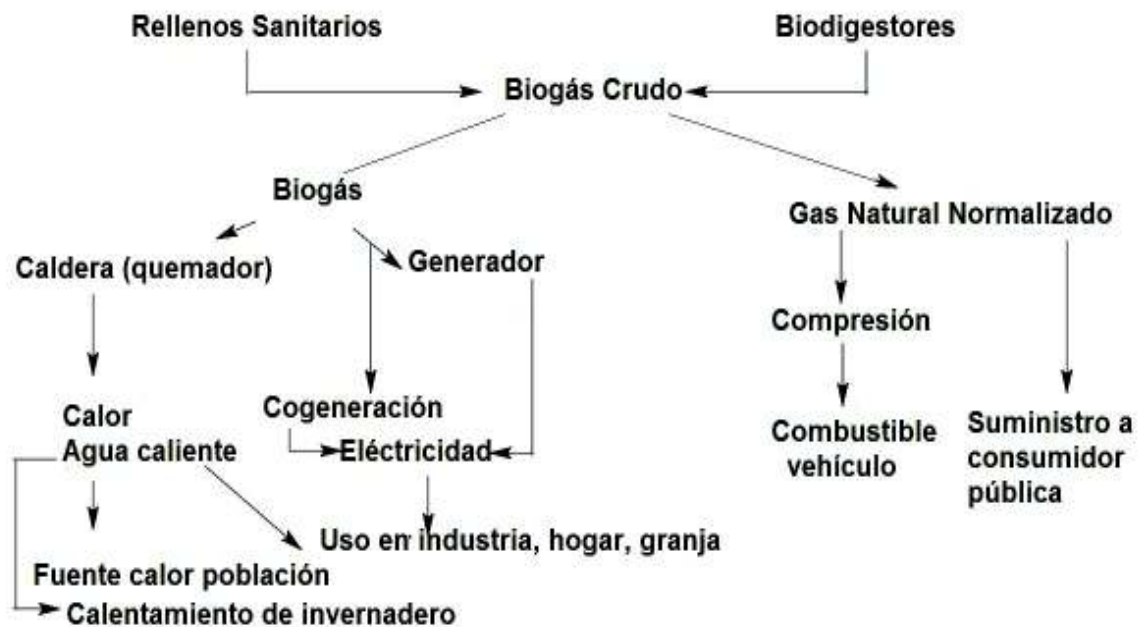


Figura 1.16. Uso de biogás  
(Fuente: Biogás handbook, 2008, p. 41)

#### 1.11.1. Combustión directa y utilización del calor

La forma más simple de utilizar biogás es la quema directa en calderas o quemadores producidos por digestores familiares pequeños. El biogás puede quemarse para la producción de calor, ya sea en el sitio, o transportarse por tubería a los usuarios finales. Para fines de calefacción, el biogás no necesita ninguna actualización, y el nivel de contaminación no restringe la utilización del gas tanto como en el caso de otras aplicaciones. Sin embargo, el biogás necesita someterse a condensación y eliminación

de partículas, compresión, enfriamiento y secado. En la figura 1.17. se observa la utilización del biogás en iluminación y calefacción en granjas. [19]



Figura 1.17. Iluminación y calefacción de granjas

(Fuente: <http://apequiosintegrados.com/productos/avicultura/pollo-de-engorda/criadoras-y-sistemas-de-calefaccion.html>)

### 1.11.2. Generación de electricidad

La electricidad producida a partir de biogás se puede usar como energía de proceso para equipos eléctricos tales como bombas, sistemas de control y agitadores. Los motores para usar biogás se desarrollan de acuerdo con el principio de Otto. Los motores funcionan con excedentes de aire para minimizar las emisiones de monóxido de carbono. Esto conduce a un menor consumo de gas y un menor rendimiento del motor, compensado por el uso de un turbocompresor de escape. Los motores Gas-Otto se pueden operar con biogás o gas natural como se observa en la figura 1.18. un generador eléctrico. [19]



Figura 1.18. Generador eléctrico con combustible biogás

(Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/5kw-home-portable-natural-gas-lpg-electric-generator-single-phase-60681280292.html>)

El motor Stirling funciona sin combustión interna, basado en el principio de cambios de temperatura donde los gases producen cambios de volumen. Los pistones del motor se mueven por la expansión de gas causada por la inyección de calor desde una fuente de energía externa. El calor necesario se puede proporcionar desde varias fuentes, como un quemador de gas, que funciona con biogás. Para utilizar los motores Stirling para biogás es necesaria cierta adaptación técnica. Debido a la combustión externa, también se puede usar biogás con menor contenido de metano.

La eficiencia eléctrica del motor Stirling es del 24-28%, que es menor que los motores Gas-Otto. El motor Stirling se puede usar en centrales térmicas tipo bloque. [19]

Para que un motor de gasolina adaptado a biogás funcione satisfactoriamente, son necesarias algunas condiciones:

- a) Que haya una válvula para controlar la admisión del biogás al motor. Esta válvula, de preferencia, debe ser de bola.
- b) Que el suministro de gas se conserve a una presión constante y dentro de los valores ya recomendados.
- c) Que el filtro de aire del motor se conserve limpio, de modo que se logre mantener una adecuada y constante relación biogás-aire, de esta relación dependerá la aceleración del motor. [23]

En la figura 1.19. se observa la utilización del biogás como fuente de combustible para un motor que va conectado un sistema de triturador de maíz.



Figura 1.19. Aplicación de biogás en sector rural

(Fuente: <http://sistemabiobolsa.com/el-potencial-del-campo-mexicano-para-producir-energia-renovable/>)

## 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las etapas para realizar el diseño del sistema de producción de energía eléctrica a través del uso de biogás, para lo cual se representan las distintas variables que se deben tener en cuenta para el diseño del sistema de generación de energía eléctrica. En la figura 2.1. se presenta el diagrama de flujo con el proceso propuesto para el diseño.

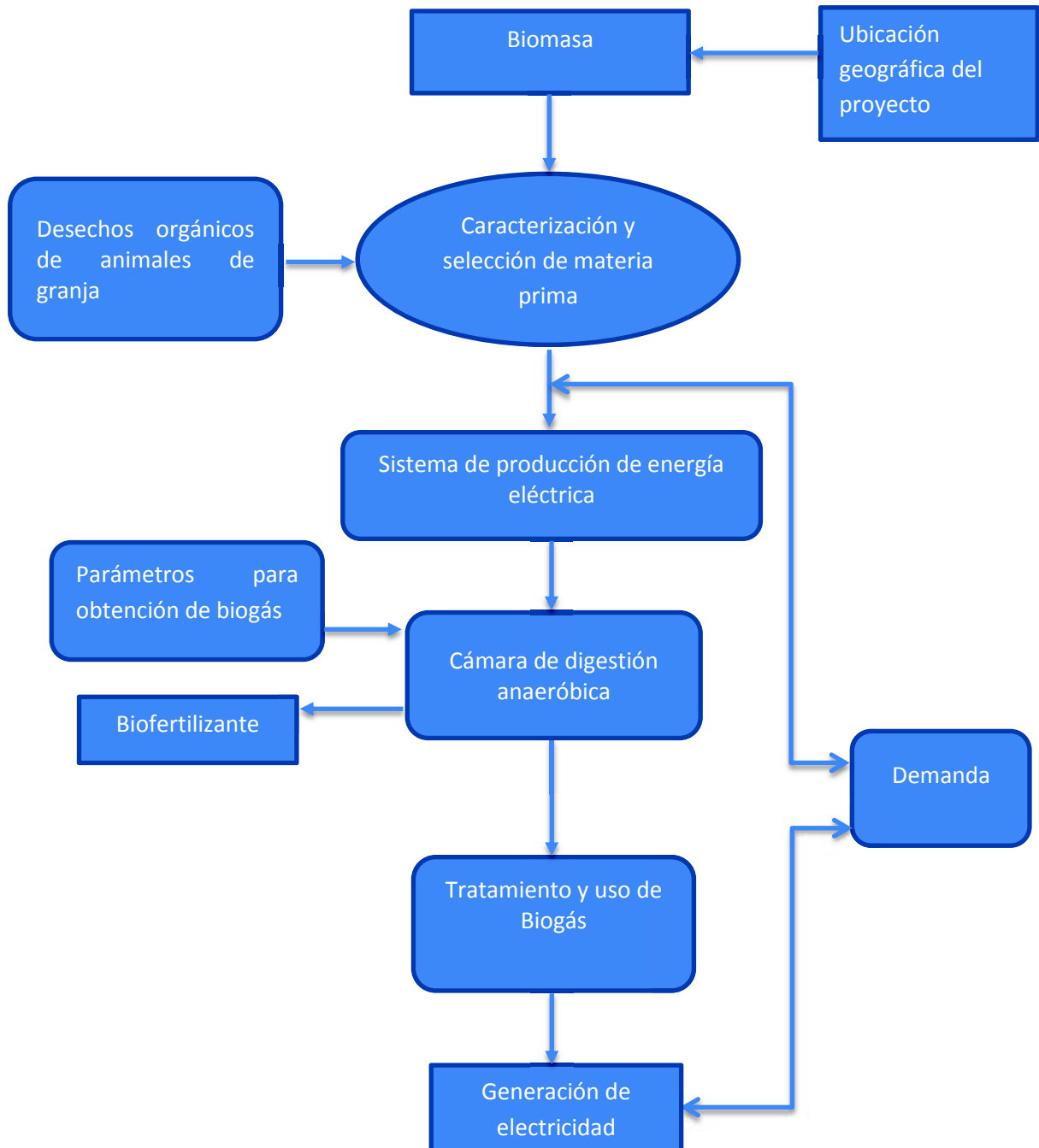


Figura 2.1. Diagrama de flujo con el proceso propuesto para el diseño sistema de generación de energía  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

## 2.1. Ubicación geográfica del proyecto

Este proyecto se va a ejecutar en la Comuna Lumbisí, se localiza en la provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia de Cumbayá, en la figura 2.2 se detalla la ubicación geográfica del proyecto, donde sus límites son: Oriente el río San Pedro, Norte la parroquia de Cumbayá, Occidente el barrio Monjas y Sur limita con la parroquia de Guangopolo, Lumbisí está a 2485 msnm, la altura máxima de la montaña es 3045 msnm y la mínima 2400 msnm, en las riberas del río San Pedro.



Figura 2.2. Ubicación de la granja en la Comuna Lumbisí  
(Fuente: GOOGLE MAPS, 2017)

### 2.1.1. Datos de temperatura de diversas fuentes

A continuación se detalla los datos de temperaturas correspondientes a la ubicación del proyecto, obtenido de varias fuentes:

#### Datos de temperatura obtenidos The Weather Company

En la figura 2.3. se muestra los datos mensuales de las temperaturas de la Comuna de Lumbisí, procedente de la página oficial de The Weather Company que representan el historial de los datos de temperatura correspondiente al año 2017.

En la tabla 2.1. se observa los valores máximos y mínimos de temperaturas mensualmente que se registró en el año 2017. [26]

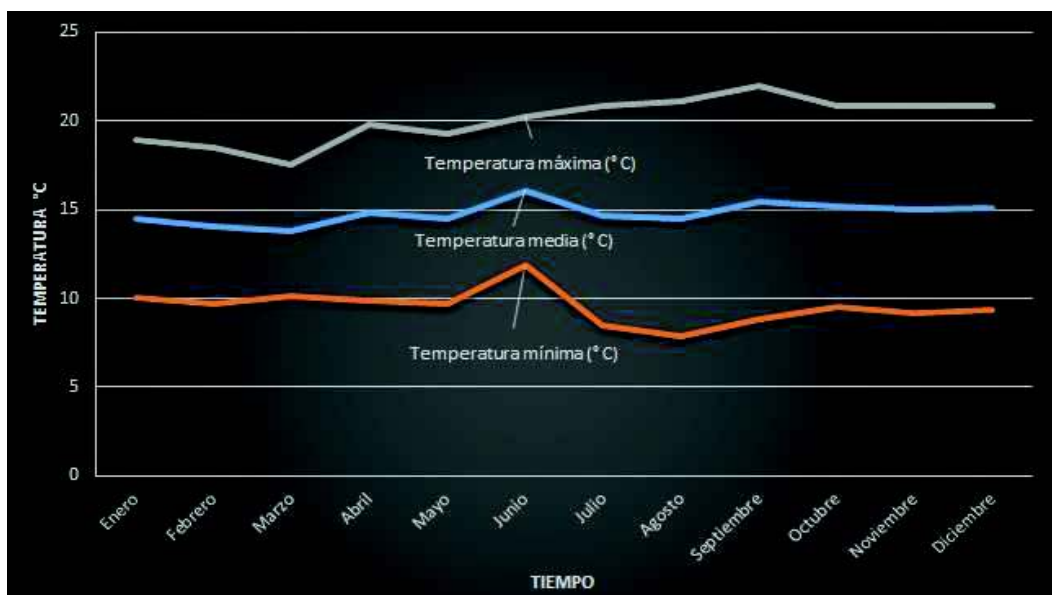


Figura 2.3. Diagrama de temperatura de Lumbisí año 2017  
(Fuente: <https://weather.com/es-EC/tiempo/mensual//ECXX4889:1:EC>, 2017)

Tabla 2.1. Datos temperatura Lumbisí año 2017

Tempo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (° C)	14,5	14,1	13,8	14,9	14,5	14,8	14,6	14,5	15,4	15,1	15,0	15,1
Temperatura mínima (° C)	10	9,7	10,1	9,9	9,7	10,4	8,5	7,9	8,9	9,5	9,2	9,3
Temperatura máxima (° C)	18,9	18,5	17,5	19,8	19,3	19,2	20,8	21,1	21,9	20,8	20,9	20,8

(Fuente: <https://weather.com/es-EC/tiempo/mensual//ECXX4889:1:EC>, 2017)

Los datos registrados de temperatura de The Weather Company, tiene como objetivo determinar los rangos adecuados de temperatura de acuerdo al tiempo, para la ejecución del proyecto y generar un buen proceso de digestión anaeróbica, aumentar la eficiencia de la producción de biogás. Además se concluye que el mes de septiembre es el mes más cálido en promedio, lo cual determina un menor tiempo de retención de la materia orgánica en el interior del biodigestor.

## 2.2. Caracterización y selección de la materia prima

La caracterización del estiércol de ganado vacuno, se realiza a través de la recopilación de los resultados de los análisis químicos, físicos y biológicos de una muestra. El objetivo de efectuar la caracterización es evidenciar si la materia prima disponible en el proyecto tiene los componentes necesarios para generar una buena digestión anaeróbica.

### 2.2.1. Toma de muestras

Se recolecta una muestra representativa homogénea de estiércol fresco de ganado vacuno, aproximadamente 1 kg que se deposita en una funda plástica y se sella herméticamente, para trasladar al Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP. El procedimiento de recolección de muestras se referencia con la norma UNE-EN 14899:2007. “Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo”, se muestra en el Anexo 1. [27]

### 2.2.2. Reporte de análisis de estiércol de ganado vacuno

Una vez realizado el análisis de laboratorio de la muestra de estiércol de ganado vacuno, se presenta los resultados en la tabla 2.2. Los resultados del Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP se muestran en el Anexo 2.

Tabla 2.2. Caracterización del estiércol de ganado vacuno

Refer.	g/100 ml							mg/l				
	N total	P	K	Ca	Mg	S	M.O.	B	Cu	Fe	Mn	C/N
Muestra 1	2,02	0,63	0,57	1,49	0,87	0,17	79,41	30,5	22,3	458,2	339,4	22,8

(Fuente: Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP, 2018)

La elección de materia prima se determina de acuerdo al reporte de análisis del laboratorio presentado en la tabla 2.2. del estiércol procedente de ganado vacuno, donde se observa que los nutrientes se encuentran en los rangos uniformes para el desarrollo de las bacterias metanogénicas generadoras de metano.

Se selecciona como materia prima el estiércol de ganado vacuno debido a las siguientes características:

- La Relación C/N reportada en el análisis se encuentra en el rango aceptable de 20 a 30:1 [18]
- La materia prima al permanecer en el interior del estómago del ganado vacuno tiene un proceso de digestión previo, permanece en el rumen de nueve a doce horas. El fluido rumial contiene gran cantidad de células microbianas  $10^{10}$  y  $10^{11}$  bacterias por ml. [10]
- La materia prima se encuentra disponible en el lugar del proyecto sin ninguna restricción.



- En anteriores estudios se ha constatado la obtención de biogás con la utilización como materia prima el estiércol de ganado vacuno.

### 2.3. Potencia total de equipos

Para obtener la potencia total de trabajo, se verificó las potencias de los equipos que se va a utilizar en las actividades de riego de cultivos e iluminación en el lugar del proyecto. Se muestra en la tabla 2.3., la suma total de potencia de equipos.

Tabla 2.3. Equipos eléctricos para la granja

Equipo	Potencia trabajo (W)	Cantidad	Potencia Total (W)
Lámpara fluorescente	20	2	40
Bomba de agua de baja capacidad	360	1	360
Capacidad instalada			400

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

La tabla 2.4. muestra la potencia de arranque de la bomba de agua, que se utiliza como referencia para seleccionar el generador disponible en el mercado para cubrir la potencia necesaria del proyecto. Las características técnicas del generador eléctrico se encuentran en el Anexo 3.

Tabla 2.4. Potencia de arranque de la bomba de agua

Equipo	Potencia de arranque (W)	Cantidad	Potencia Total (W)
Lámpara fluorescente	20	2	40
Bomba de agua de baja capacidad	550	1	550
Capacidad instalada			590

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### 2.4. Consumo de energía de la granja

Se determinó de acuerdo a la potencia de cada elemento eléctrico el cálculo del consumo eléctrico diario y mensual. En la tabla 2.5. se muestra el consumo eléctrico que se generaría por iluminación y uso de una bomba de agua de baja capacidad.

Tabla 2.5. Demanda de energía

Equipo	Cant	Potencia nominal (W)	Horas de uso al día							Consumo kWh/mes
			Lun	Mar	Mie	Jue	Vier	Sá	Do	
Lámpara fluorescente	2	20	2	2	2	2	2	2	2	2,4
Bomba de agua de baja capacidad	1	360	2	2	2	2	2	2	2	21,6
										24

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

## 2.5. Determinación del consumo de biogás

Se utiliza un modelo donde emplea los conceptos para calcular balance de masa y necesidad de combustible para dimensionar el volumen y las dimensiones del recipiente del biodigestor, equipos, accesorios para el sistema de generación de energía eléctrica que se detalla con la determinación del consumo de biogás.

El consumo de biogás se calcula con la ecuación 2.1 [28]

$$\dot{m}_{biogás} = \frac{\dot{W}_{eléctrica}}{\eta_{t\ generador} \times HHV} \quad (2.1.)$$

Dónde:

$\dot{m}_{Biogás}$  = Flujo másico del biogás (kg/h)

$\dot{W}_{eléctrica}$  = Potencia eléctrica (W)

HHV = Poder calorífico superior combustible (kJ/kg)

$\eta_{t\ generador}$  = eficiencia térmica de un motor generador (Se asume un valor aproximado de 30%) [29]

Datos:

$\dot{W}_{eléctrico}$  = 590 W (Potencia máxima de carga)

HHV = 20934 kJ/kg } (Biogás composición aproximada 60 % CH<sub>4</sub> y 40% de CO<sub>2</sub> de acuerdo a tabla 1.5)

$\rho_{biogás}$  = 1,2 g/l }

Reemplazando los valores en la ecuación 2.1 se obtiene:

$$\dot{m}_{biogás(590 W)} = \frac{590 W}{0,3 \times 20934 \frac{kJ}{kg}}$$

La cantidad de combustible para una potencia máxima con carga de 590 W es

$$\dot{m}_{biogás(590 W)} = 0,338 \frac{kg}{h}$$

Con la ecuación 2.2 se determina el volumen del biogás a través de la densidad tabla 1.5 [28]

$$\begin{aligned} \dot{V}_{biogás(590 W)} &= \frac{\dot{m}_{biogás}}{\rho_{biogás}} && (2.2.) \\ \dot{V}_{biogás(590 W)} &= \frac{0,338 \frac{kg}{h}}{1,2 \frac{g}{l} \times \frac{1kg}{1000g} \times \frac{1000l}{1m^3}} \end{aligned}$$

Necesidad de combustible para una potencia máxima con carga de 590 W es:

$$\dot{V}_{biogás(590 W)} = 0,282 \frac{m^3}{h}$$

### 2.5.1. Determinación cantidad de la masa del sustrato

La cantidad de estiércol por día se calcula con la ecuación 2.3 [18]

$$E_{biomasa} = \frac{C_{biogás}}{\eta_{biogás}} \quad (2.3.)$$

Dónde:

$E_{biomasa}$  = Cantidad del sustrato (kg/día)

$\eta_{biogás}$  = Rendimiento de biogás ( $m^3/kg$ )

$C_{biogás}$  = Necesidad de gas ( $m^3/h$ ) ó  $\dot{V}_{biogás}$

$M_t$  = Masa total del sustrato (kg)

TR = Tiempo de retención (días)

Datos:

$C_{biogás(590 W)} = 0,282 m^3/h$

$\eta_{biogás} = 0,5 m^3/kg$  (El rendimiento para digestores tipo Batch) [18]

Cantidad de la masa del sustrato para una potencia de 590 W

$$E (590 W) = 0,564 \frac{kg}{h} \times \frac{24h}{1 día} = 13,52 \frac{kg}{día}$$

Con la ecuación 2.4 se calcula la cantidad de la masa total del sustrato [30]

$$Mt = E \times TR \quad ( 2.4.)$$

Datos:

TR= 35 días

$$Mt (590 W) = 13,52 \frac{kg}{día} \times 35 días$$

$$Mt (590 W) = 473,2 kg$$

## 2.6. Sistema de producción de energía eléctrica

Una vez estudiado e interpretado la información del capítulo uno, referente al proceso de digestión anaeróbica y los tipos de biodigestores anaeróbicos para desechos sólidos orgánicos, se presenta las características principales de tres modelos para evidenciar la funcionalidad de cada uno y seleccionar el adecuado.

### Método Tubular continuo

- La materia prima se traslada continuamente de acuerdo al tiempo de retención.
- De construcción viable y eficiencia es de 0,25 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>
- El espacio a intervenir es considerable debido a las dimensiones medianas del modelo, de baja inversión inicial, los materiales no son costosos. [18]

### Modelo para dos o más etapas

- La materia prima se traslada al primer depósito y continúe su proceso en el siguiente depósito.
- Requiere más detalle a la construcción de acuerdo al número de etapas del proceso.
- El área es grande según se disponga de los procesos para degradación de la materia prima, la eficiencia es de 0,50 m<sup>3</sup>/ kg
- Alto costo debido a los materiales y mano de obra que requiere si son dos o más etapas. [18]

### Método Batch

- La materia prima se carga en una sola vez para que permanezca en el interior del biodigestor hermético según el tiempo de retención, es ligero y de fácil manipulación.

- La construcción y ensamble es práctica, la eficiencia es de 0,50 m<sup>3</sup>/ kg
- El área es pequeña de acuerdo al tamaño del tanque o depósito de materia orgánica.
- Costo medio bajo, debido a la cantidad de elementos que se puede adquirir o construir. [18]

Se selecciona el modelo tipo batch para la retención de la materia prima, debido a las características de este modelo, que responden a las necesidades del sistema de generación de energía eléctrica.

Se concibe o se conceptualiza el sistema de producción de energía eléctrica como se muestra en la figura 2.4.

Las partes principales del sistema de generación de energía eléctrica son los siguientes:

1. Dispositivo de agitación
2. Tanque de almacenamiento de materia prima, biodigestor
3. Ingreso de materia prima
4. Manómetro
5. Trampa de agua
6. Bolsa de almacenamiento de biogás
7. Desulfurizador
8. Sistema de eliminación de CO<sub>2</sub>
9. Medidor de flujo de biogás
10. Tubería, llaves de paso y accesorios de conexión
11. Generador eléctrico
12. Válvula de seguridad
13. Sensor de temperatura
14. Indicador de nivel de sustrato
15. Salida de sustrato

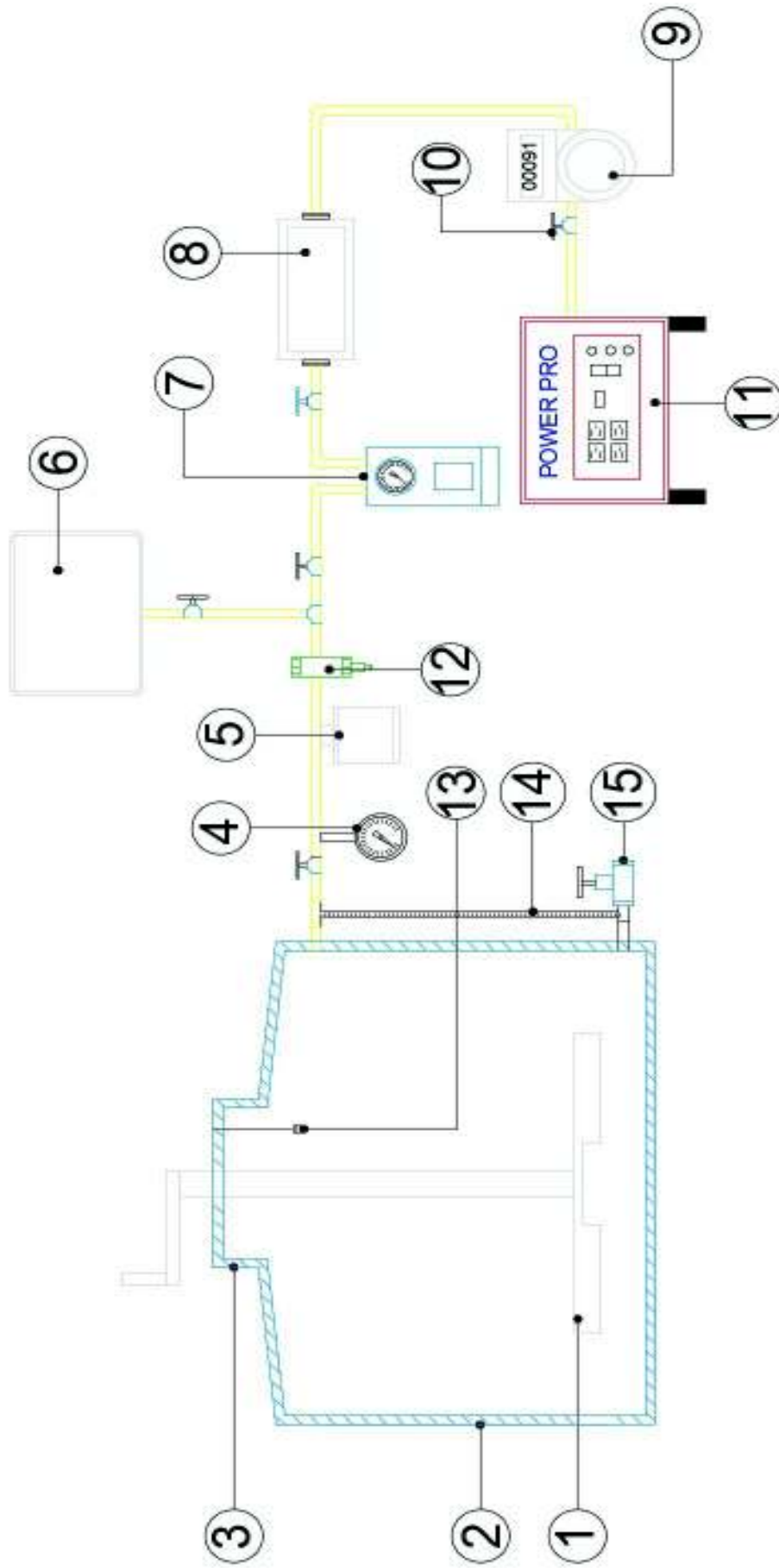


Figura 2.4. Sistema de generación de Energía eléctrica  
(Fuente: Elaborado por el autor, 2018)

## 2.6.2. Cálculo y selección de tanque de biodigestor

El Tanque de biodigestor es de material polietileno, debe estar hermético y no permitir el ingreso del aire. [21] Se determina el volumen del biodigestor tipo batch con la ecuación 2.5 [30]

$$VCF = Mt \times F_d \quad (2.5.)$$

Dónde:

VCF = Volumen de la cámara de fermentación del digestor (m<sup>3</sup>)

F<sub>d</sub> = Factor de dilución del residuo de acuerdo al tipo de sustrato.

Si la relación para ganado bovino es:

F<sub>d</sub> = 1 estiércol + 1 de agua = 2 según la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Relación estiércol - agua para varios tipos de sustrato

Animal	Relación Estiércol : agua
Bovino estabulado	1:1
Bovino semiestabulado	1:1
Porcinos peso > 50 kg	1:1-2-3
Aves peso ≈ 2 kg	1:1

(Fuente: Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas, 2010)

Datos:

$$E_{(590 W)} = 13,52 \text{ kg/día}$$

$$F_d = 2$$

Volumen de la cámara de fermentación para una potencia de 590 W

$$VCF = (473,2 \text{ kg} \times 2) \frac{1L}{1 \text{ kg}} \times \frac{1m^3}{1000 L} = 0,946 m^3$$

Para el cálculo total del digestor se estima que el volumen de la cámara de fermentación (VCF) está constituida del 75% y el 25% corresponde al volumen del gasómetro que sirve para almacenar el biogás.

Dónde:

VTD= Volumen total del digestor (m<sup>3</sup>)

V<sub>G</sub>= Volumen del almacenamiento de gas (m<sup>3</sup>)

Para determinar el volumen de la cámara de gas se calcula con la ecuación 2.6

$$V_G = VCF \times \frac{0,25}{0,75} \quad (2.6.)$$

Volumen de almacenamiento de gas para una potencia de 590 W

$$V_{G(590\text{ W})} = 0,32 \text{ m}^3$$

Por lo tanto el volumen total del digestor se determina con la ecuación 2.7 para una potencia de 590 W

$$VTD = VCF + V_G \quad (2.7.)$$

$$VTD = 0,946 \text{ m}^3 + 0,32 \text{ m}^3$$

$$VTD = 1,26 \text{ m}^3$$

Se selecciona por disponibilidad del mercado un tanque cisterna ECOTANQUE de capacidad de 1,3 m<sup>3</sup>, ver ficha técnica Anexo 4.

Se determina la altura que tendrá la materia orgánica con la ecuación 2.8

$$VCF = \pi \times r^2 \times h \quad (2.8.)$$

Dónde:

VCF= Volumen cámara de fermentación del digestor (m<sup>3</sup>)

r= radio del digestor (m)

h= altura del digestor (m)

Datos:

VCF= 0,943 m<sup>3</sup>

r= 0,6 m (Ficha técnica Anexo 4)

$$h = \frac{0,943 \text{ m}^3}{\pi \times 0,6^2}$$

$$h = 0,83 \text{ m}$$

Se determina la altura que mantiene el gas con la ecuación 2.9

$$H = h_{MO} + h_G \quad (2.9.)$$



Dónde:

H= Altura total del digestor (m)

$h_{MO}$ = Altura de la materia orgánica (m)

$h_G$ = Altura del gas (m)

Datos:

H= 1,45 m (Ficha técnica Anexo 4)

$h_{MO} = 0,83$  m

$$h_G = 1,45 \text{ m} - 0,83 \text{ m} = 0,62 \text{ m}$$

## **2.7. Cálculo, dimensionamiento y selección de partes del sistema de generación energía eléctrica**

### **2.7.1. Selección de válvula de seguridad**

La válvula de seguridad tiene la función de aliviar la presión de operación del biodigestor, debido elevación de la presión interna del biodigestor por causa de la temperatura y evitar roturas, mal funcionamiento del sistema, se selecciona la válvula de acuerdo a la producción del sistema. [21]

Cálculo de presión mezcla de biogás se determina con la ecuación 2.10 [31] [28]

$$P_g = h_g \times \rho \times g \quad (2.10.)$$

Dónde:

$P_g$ = Presión de la mezcla de biogás (Pa)

$\rho$ = Densidad nominal (g/l) (Tabla 1.5 Biogás composición aproximada 60 %  $CH_4$  y 40% de  $CO_2$ ; 1,2 g/l = 1,2 kg/m<sup>3</sup>)

$H_g$ = altura de la mezcla de biogás (m)

$g$ = Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Datos:

$h_g = 0,62$  m

$g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>

$$P_g = 0,62 \text{ m} \times 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_g = 7,29 \text{ Pa}$$

### Cálculo de presión de acuerdo a la máxima de temperatura

Se determina la presión de acuerdo a la ecuación 2.11 [32]

$$P_G = \frac{P_g \times T_{max}}{T_t} \quad (2.11.)$$

Dónde:

$P_G$  = Presión máxima de gas (Pa)

$P_g$  = Presión gas (Pa)

$T_{max}$  = Temperatura máxima (°C)

$T_t$  = Temperatura de trabajo (°C)

Datos:

$P_g = 7,29 \text{ Pa}$

$T_{max} = 50 \text{ °C}$

$T_t = 25 \text{ °C}$

$$P_G = \frac{7,29 \text{ Pa} \times 50 \text{ °C}}{25 \text{ °C}}$$

$$P_G = 14,6 \text{ Pa}$$

Cálculo de presión del fluido sobre las paredes del digestor con la ecuación 2.12 [31]

$$P_{MO} = (h_{MO} \times \rho_{MO} \times g) + P_{m\acute{a}x} \quad (2.12.)$$

Dónde:

$P_{MO}$  = Presión de la materia orgánica (kPa)

$\rho_{MO}$  = Densidad nominal de la materia orgánica (kg/m<sup>3</sup>)

**Datos:**

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  (Se considera la densidad de la materia orgánica equivale a la densidad del agua)

La presión del fluido sobre las paredes del digestor es

$$P_{MO} = \left( 0,83 \text{ m} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) + 14,58 \text{ Pa}$$

$$P_{MO} = 8,15 \text{ kPa}$$



Figura 2.5. Válvula de seguridad  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Se selecciona la válvula de alivio o seguridad al tener una presión de apertura de 12 kPa como se indica en la tabla 2.7.

Las especificaciones técnicas de la válvula de seguridad se pueden revisar Anexo 5.

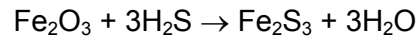
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas de la válvula de seguridad

Modelo	Diámetro (mm)	Presión de apertura (kPa)
AM-AQ08	12,5	12
AV919	25	6

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

**2.7.2. Cálculo y selección del filtro de H<sub>2</sub>S**

Es un elemento que permite eliminar el H<sub>2</sub>S, componente natural del biogás. Debido a que tiene un efecto corrosivo en los metales y dañar a los componentes del generador eléctrico. [24] La reacción química de óxido de hierro con sulfuro de hidrógeno se presenta a continuación, en donde el método que se aplica para eliminar H<sub>2</sub>S es mediante las tecnologías secas.



En la tabla 2.8. se encuentra los parámetros para dimensionar el filtro por el método de absorción.

Tabla 2.8. Parámetros de diseño

Parámetros	Características
Tipo de filtro	Absorción a partir de óxido de hierro
Densidad de H <sub>2</sub> S	1,19 kg/m <sup>3</sup>
Generación de biogás actual	0,282 m <sup>3</sup> /h
Cantidad de H <sub>2</sub> S (5%)	0,0142 m <sup>3</sup> /h

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

De la cantidad de biogás producido 0,282 m<sup>3</sup>/h, se calcula el 5% que correspondería a 0,0142 m<sup>3</sup>/h de H<sub>2</sub>S y se determina la cantidad en masa multiplicando por la densidad del H<sub>2</sub>S.

Con la ecuación 2.13 se determina el peso del H<sub>2</sub>S [33]

$$m_{H_2S} = C_{H_2S} \times \rho_{H_2S} \quad (2.13.)$$

Dónde:

$m_{H_2S}$  = Masa del H<sub>2</sub>S

$C_{H_2S}$  = Cantidad de H<sub>2</sub>S (m<sup>3</sup>/h)

$\rho_{H_2S}$  = Densidad de H<sub>2</sub>S (kg/m<sup>3</sup>)

Datos:

$C_{H_2S} = 0,0142 \text{ m}^3/\text{h}$

$\rho_{H_2S} = 1,35 \text{ kg}/\text{m}^3$

Se obtiene la masa del H<sub>2</sub>S reemplazando valores en la ecuación 2.13

$$m_{H_2S} = 0,0142 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{H_2S} = 0,019 \frac{\text{kg H}_2\text{S}}{\text{h}}$$

Se determina con la ecuación 2.14 la cantidad de  $Fe_2O_3$  requerido para el proceso de filtración [33]

$$C_{Fe_2O_3} = m_{H_2S} \times RT_{\frac{Fe_2O_3}{H_2S}} \times fs \quad (2.14.)$$

Dónde:

$C_{Fe_2O_3}$  = Consumo de óxido férrico ( $Fe_2O_3$ )

$RT_{Fe_2O_3/H_2S}$  = Relación teórica estequiométrica de  $Fe_2O_3$  y  $H_2S$  [34]

$fs$  = factor de seguridad

Datos:

$fs = 1,5$

$$C_{Fe_2O_3/H_2S} = \frac{159,7 \text{ kg } Fe_2O_3}{102 \text{ kg } H_2S}$$

$$C_{Fe_2O_3} = 0,019 \frac{\text{kg } H_2S}{h} \times \frac{159,7 \text{ kg } Fe_2O_3}{102 \text{ kg } H_2S} \times 1,5 =$$

$$C_{Fe_2O_3} = 0,045 \frac{\text{kg } Fe_2O_3}{h}$$

Se calcula el volumen del filtro con la ecuación 2.15 [33] [34]

$$V_{Fe_2O_3} = \frac{M_{Fe_2O_3}}{\rho_{Fe_2O_3}} \quad (2.15.)$$

Dónde:

$V_{Fe_2O_3}$  = Volumen de filtro ( $m^3$ )

$M_{Fe_2O_3}$  = Masa de  $Fe_2O_3$  utilizable (kg) (La cantidad de hierro tratado para un día)

$\rho_{Fe_2O_3}$  = densidad del  $Fe_2O_3$  ( $kg/m^3$ )

Datos:

$\rho_{Fe_2O_3} = 900 \text{ kg}/m^3$

Los valores se sustituyen en la ecuación 2.15

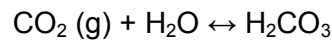
$$V_{Fe_2O_3} = \frac{0,045 \frac{kg Fe_2O_3}{h} \times 1 \text{ dia} \times \frac{24h}{1 \text{ día}}}{900 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V_{Fe_2O_3} = 0,0012 m^3 = 1,2 L$$

Se selecciona un filtro desulfurizador de capacidad de 2 litros, con un porcentaje de 99 % de remoción de H<sub>2</sub>S, en el Anexo 6 se muestra las características del filtro.

### 2.7.3. Cálculo y selección de la columna de absorción de CO<sub>2</sub>

El método seleccionado para eliminar el CO<sub>2</sub> es por absorción física. El proceso consiste en formar una reacción química que se detalla a continuación. [24]



Consiste en la recirculación de una solución de NaOH por la columna de tubo transparente y rellena de anillos rasching, mientras que el biogás fluye en dirección contraria con la finalidad de disminuir el contenido de CO<sub>2</sub>, como se presenta en la figura 2.6. [35]

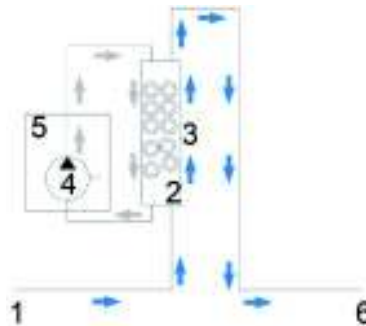


Figura 2.6. Elementos de columna de absorción  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

El detalle de los componentes principales para el diseño y construcción de la columna de absorción son los siguientes:

1. Ingreso de biogás
2. Anillos rasching de porcelana
3. Columna de tubo transparente
4. Bomba de agua de pecera
5. Recipiente de absorbente líquido
6. Salida de biogás

Los rellenos al azar consisten en unidades de 1/4 pulg a 3 pulg en su dimensión mayor; los rellenos inferiores a 1 pulg se utilizan fundamentalmente en columnas de laboratorio o de planta piloto. Las unidades de relleno ordenado son de tamaños comprendidos entre 2 y 8 pulg. En la Figura 2.7. se representan algunos tipos frecuentes de cuerpos de relleno. [36]

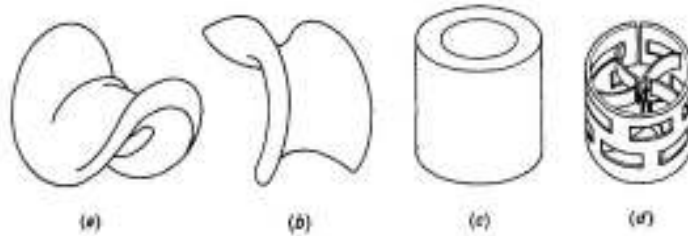


Figura 2.7. Cuerpos de rellenos  
a) montura de Berl; (b) montura Intalox; (c) anillo Raschig; (d) anillo Pall.  
(Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 1998, p. 719)

Para realizar el cálculo de la cantidad de soluto para el proceso de absorción se determina con una solución acuosa. Se toma como referencia un volumen de 1 litro de 2,5M de NaOH, se calcula con la ecuación 2.16 el número de moles del soluto. [35] [37]

$$N_{moles} = M \times V_{solución} \quad (2.16.)$$

Dónde:

$N_{moles}$  = Numero de moles del soluto (mol)

M= Molaridad (mol/ L)

$V_{solución}$  = Volumen de solución (L)

Datos:

M= 2,5 mol/ L

$V_{solución}$  (H<sub>2</sub>O)= 1 L

Se obtiene con la ecuación 2.16 el número de moles del soluto:

$$N_{moles\ soluto} = 2,5\ mol\ NaOH$$

Se determina la cantidad en gramos de soluto a utilizar con la ecuación 2.17 [37]

$$m_{soluto} = N_{moles\ soluto} \times PM_{soluto} \quad (2.17.)$$

Dónde:

$m_{\text{soluto}}$  = masa del soluto (g)

$PM_{\text{soluto}}$  = peso molar del soluto (g/mol)

Datos:

$PM_{\text{soluto}}$  = 40,01 g/mol (ver anexo 7)

Con la ecuación 2.26 se calcula la masa del soluto para preparar la solución:

$$m_{\text{soluto}} = 100 \text{ g}$$

Se determina la densidad de la solución NaOH con la ecuación 2.18

$$\rho_{\text{solución}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{V_{\text{solución}}} \quad (2.18.)$$

Dónde:

$V_{\text{solución}}$  = Volumen de solución (L)

Datos:

$V_{\text{solución}} (\text{H}_2\text{O}) = 1 \text{ L}$

$$\rho_{\text{solución}} = 100 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En el anexo 8 se incluye el manejo y seguridad de NaOH

### Calculo de diámetro de columna de absorción

La tabla 2.9 muestra los parámetros para dimensionar la columna de absorción de CO<sub>2</sub>.

Tabla 2.9. Parámetros de diseño

Parámetros	Biogás	Solución (NaOH)
Temperatura aproximada	25 °C	25 °C
Densidad	1,2 kg/m <sup>3</sup>	100 kg/ m <sup>3</sup>

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Se determina el diámetro de la columna de absorción con la ecuación 2.19 [36]

$$Dc = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (2.19.)$$



Dónde:

Dc= Diámetro de columna de absorción (mm)

S= Área de la sección transversal de la columna de absorción (m<sup>2</sup>)

Para calcular el área de la sección transversal de la columna de absorción, se determina con la ecuación 2.20 [36]

$$S = \frac{\dot{m}_{biogás}}{\left(\frac{Gy}{2}\right)} \quad (2.20.)$$

Dónde:

$\dot{m}_{biogás}$ = rapidez de flujo de masa (kg/s)

Gy= velocidad másica del gas (kg/m<sup>2</sup> s)

Se utiliza un método gráfico para calcular velocidad másica del gas Gy como se detalla a continuación: [36]

- Cálculo de la relación  $\frac{Gx}{Gy} \sqrt{\frac{\rho_{biogás}}{(\rho_{solución} - \rho_{biogás})}}$
- Se determina de acuerdo a la figura 2.8 el valor de la relación  $\frac{Gy^2 \times Fp \times \mu_x^{0,1}}{g_c(\rho_{solución} - \rho_{biogás})\rho_{biogás}}$
- Al tener el valor de la relación  $\frac{Gy^2 \times Fp \times \mu_x^{0,1}}{g_c(\rho_{solución} - \rho_{biogás})\rho_{biogás}}$  se despeja Gy

A continuación se realiza el proceso de cálculo de diámetro de la columna de absorción:

Con la ecuación 2.21 se determina la expresión adimensional

$$\frac{Gx}{Gy} \sqrt{\frac{\rho_{biogás}}{(\rho_{solución} - \rho_{biogás})}} \quad (2.21.)$$

Dónde:

Gx/Gy= La relación de velocidades másicas de líquido y gas

$\rho_{solución}$ = Densidad de solución (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{biogás}$ = Densidad del biogás (kg/m<sup>3</sup>)

La densidad del solución y biogás se reemplazan en la ecuación 2.21

Datos:

$$G_x/G_y = 1$$

$$\rho_{\text{solución}} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{biogás}} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 1 \sqrt{\frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{(100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}}$$

$$= 0,11$$

En la figura 2.7 muestra una correlación para estimar velocidades de inundación y caídas de presión en torres de relleno. Consiste en una representación logarítmica de:

$$\frac{G_y^2 \times F_p \times \mu_x^{0,1}}{g_c(\rho_{\text{solución}} - \rho_{\text{biogás}})\rho_{\text{biogás}}} \text{ frente a } \frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_{\text{biogás}}}{(\rho_{\text{solución}} - \rho_{\text{biogás}})}}$$

Con el valor obtenido de 0,11 se toma como velocidad de inundación y se asume un valor de 0,10 para obtener un valor adimensional de 0,012 de acuerdo a la figura 2.8.

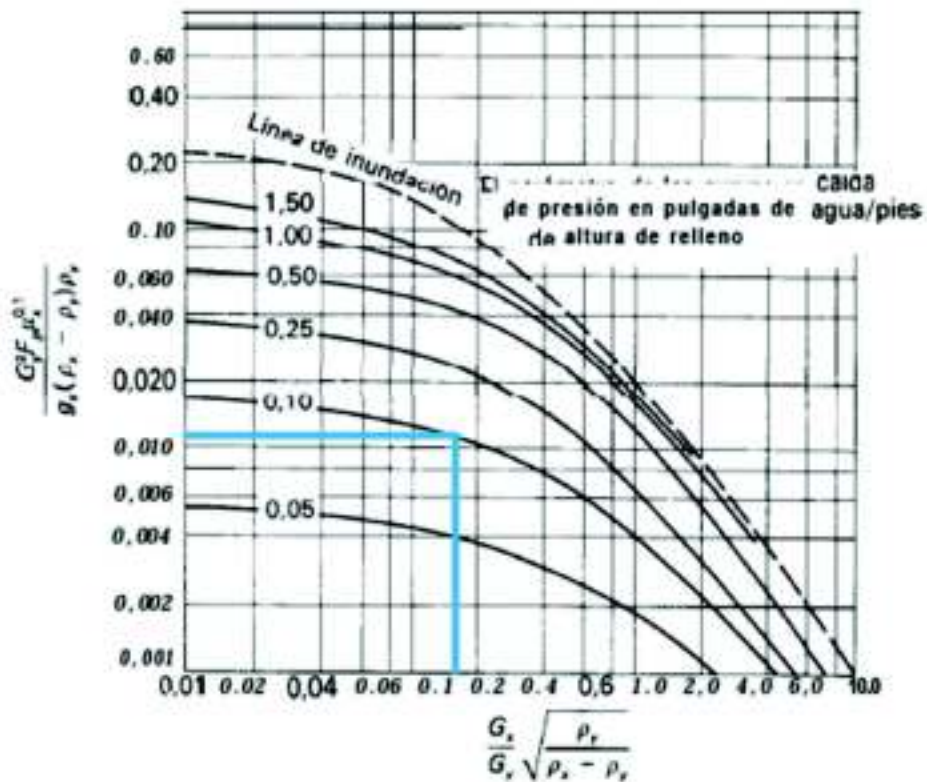


Figura 2.8. Correlación generalizada para inundación y caída de presión en columnas de relleno (Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 1998, p. 722)

El valor de velocidad másica del gas Gy se calcula con la ecuación 2.22 [36]

$$\frac{Gy^2 \times Fp \times \mu_x^{0,1}}{g_c(\rho_{soluto} - \rho_{biogás})\rho_{biogás}} \quad (2.22.)$$

Dónde:

Gy= velocidad másica del gas (kg/m<sup>2</sup> s)

Fp= factor de relleno (m)

μx= viscosidad de la solución (Pa s)

gc= Factor de proporcionalidad de la ley de Newton (kg m/ (kgf s<sup>2</sup>))

Datos:

Fp= 155 (De acuerdo a la forma y tamaño de 25 mm, anillo raschig de cerámica) Anexo 9 [36]

μx= 0,08 Pa s

gc= 9,807 kg m/kgf s<sup>2</sup>

De la ecuación 2.22 se obtiene el valor de Gy reemplazando los valores

$$\frac{Gy^2 \times Fp \times \mu_x^{0,1}}{g_c(\rho_{solución} - \rho_{biogás})\rho_{biogás}} = 0,12$$

$$Gy = \sqrt{0,12 \left( \frac{9,8 \frac{kg \ m}{kgf \ s^2} \left( 100 \frac{kg}{m^3} - 1,2 \frac{kg}{m^3} \right) 1,2 \frac{kg}{m^3}}{155 \times (0,08 \ Pa \ s)^{0,1}} \right)}$$

$$Gy = 0,34 \frac{kg}{m^2 \ s}$$

Para calcular el área de la sección transversal de la columna de absorción, se determina con la ecuación 2.20

Dónde:

S= Área de la sección transversal de la columna de absorción (m<sup>2</sup>)

m<sub>biogás</sub>= Flujo de masa (kg/s)

Datos:

$$\dot{m}_{biogás} = 0,338 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se reemplaza valores en la ecuación 2.17 y se obtiene

$$S = \frac{0,338 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}}{\left( \frac{0,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}}{2} \right)}$$

$$S = 5,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Al ser la superficie de la columna circular, se determina el diámetro de la columna de absorción con la ecuación 2.19 y se reemplaza los valores

$$D = 27 \text{ mm}$$

### Altura de la torre

Se determina por el método de unidades de transferencia con la ecuación 2.23 [38]

$$Z = HOG * NOG \quad (2.23.)$$

Dónde:

Z= Altura de la torre (m)

HOG=HL= Altura total de la unidad de transferencia

NOG= Número de unidades de transferencia

Con la ecuación 2.24 se determina la altura total de la unidad de transferencia [38]

$$HL = \Phi \left( \frac{L}{A} \right)^n \mu_L^{0,5} \quad (2.24.)$$

Dónde:

(L/A)= Velocidad másica del líquido (kg/h m<sup>2</sup>)

$\mu_L$ = Viscosidad del líquido (kg/ h m)

Sc= Numero de Schmidt para el liquido

El número de Schmidt se determina con la ecuación 2.25 para el líquido [38]

$$Sc = \frac{\mu_L}{D_{AB} \rho_L} \quad (2.25.)$$

Se calcula la altura total de la unidad de transferencia de acuerdo a la ecuación 2.21

Datos:

$$\mu_L = 1,005 \text{ kg/m s}$$

$$(L/A) = 2000 \text{ kg/h m}^2$$

$$\Phi = 0,00235 \text{ (Ver Anexo 10)}$$

$$n = 0,22 \text{ (Ver Anexo 10)}$$

Se calcula la difusividad de A en una solución diluida en solvente B con la ecuación 2.26 [38]

$$D_{AB} = \frac{(117,3 \times 10^{-18})(\varphi M_B)^{0,5} T}{\mu_{\text{solución}} \times V_A^{0,6}} \quad (2.26.)$$

Dónde:

$M_B$  = peso molecular del solvente, kg/mol

T = temperatura

$\mu_{\text{solución}}$  = viscosidad de la solución, kg/m s

$V_A$  = volumen molar del soluto en el punto de ebullición normal, m<sup>3</sup>/mol

$\varphi$  = factor de asociación para el disolvente = 2,26 para el agua como disolvente [38]

Datos:

$$M_B = 18,015 \text{ kg/mol}$$

$$T = 293 \text{ °K}$$

$$\mu_{\text{solución}} = 1,43 \times 10^{-6} \text{ kg/m s}$$

$$V_A = 3,99 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$$

Calculo  $D_{AB}$  con la ecuación 2.26

$$D_{AB} = \frac{(117,3 \times 10^{-18})(2,26 \times 18,015 \text{ kg/mol})^{0,5} \times 293 \text{ }^\circ\text{K}}{9,57 \times 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{m s}} \times (3,99 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}})^{0,6}}$$

$$D_{AB} = 9,80 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Reemplazando valores en la ecuación 2.24 se determina la altura total de la unidad de transferencia.

$$HL = 2,26 \left( \frac{2000 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2}}{1,005 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} \right)^{0,22} \left( \frac{1,005 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}{9,80 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,5}$$

$$HL = 1,27 \text{ m}$$

El número de unidades de transferencia está dado por la ecuación 2.27 [38]

$$NOG = \frac{\ln(1 - A) \left( \frac{Y_i - mX_i}{Y_f - mX_i} \right) + A}{1 - A} \quad (2.27.)$$

Dónde:

$$A = 0,9$$

$$\left( \frac{Y_i - mX_i}{Y_f - mX_i} \right) = 0,5$$

Por lo tanto reemplazando valores en la ecuación 2.24 se obtiene

$$NOG = 0,43$$

Con la ecuación 2.20 se determina la altura de la torre

$$Z = 1,27 * 0,43$$

$$Z = 0,55 \text{ m}$$

Por lo tanto la altura de la columna de absorción es de 550 mm y diámetro de 27 mm.

## Cálculo de la bomba para la torre de absorción

La cantidad de biogás que circula por la torre de absorción es de  $\dot{m}_{biogás} = 0,338 \frac{kg}{h}$

Se determina la variación de presión  $\Delta P$  con la ecuación 2.28 [31]

$$\Delta P = \gamma_{solución} \times h \quad (2.28.)$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico de la solución ( $N/m^3$ ) ( $980 N/m^3$ )

$h$  = altura de la torre (m)

Para calcular el caudal de NaOH se determina con la ecuación 2.29 [32]

$$\dot{V}_{solución} = V_{biogás} \times \frac{\rho_{biogás}}{\rho_{solución}} \times R \quad (2.29.)$$

Donde:

$V_{solución}$  = Caudal de la solución ( $m^3/h$ )

$\rho_{solución}$  = densidad de la solución ( $kg/m^3$ )

$R$  = Relación de la solución NaOH/Biogás ( $kg NaOH/ kg biogás$ )

Datos:

$\rho_{solución} = 100 kg/m^3$

$R = 1 kg NaOH/ kg biogás$

Reemplazando valores en la ecuación 2.29

$$\dot{V}_{solución} = 1,35 \times 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$
$$\dot{m}_{solución} = 100 \frac{kg}{m^3} \times 1,35 \times 10^{-3} \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600 s} = 3,75 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

Con la ecuación 2.28 se calcula la variación de la presión:

Datos:

$$\gamma_{solución} = 980 \frac{N}{m^3}$$

$h = 0,55 \text{ m}$

$$\Delta P = 539 \text{ Pa}$$

La potencia de la bomba se calcula con la ecuación 2.30

$$P_b = \frac{m \times \Delta P}{\rho_{\text{solución}} \times \eta} \quad (2.30.)$$

Donde:

$P_b$  = Potencia de la Bomba (W)

$\eta$  = eficiencia de la bomba de 60%

Se reemplaza valores en la ecuación 2.30 obteniendo una potencia

$$P_b = 0,03 \text{ W}$$

Se selecciona una bomba que se acerca a la potencia requerida, ver anexo 11

#### 2.7.4. Selección de tubería de transporte de biogás y cálculo de pérdida de presión

La tubería y accesorios que se utiliza para transportar el biogás, pueden ser metálicos, plásticos, etc., materiales que garanticen la hermeticidad y conducción de biogás.

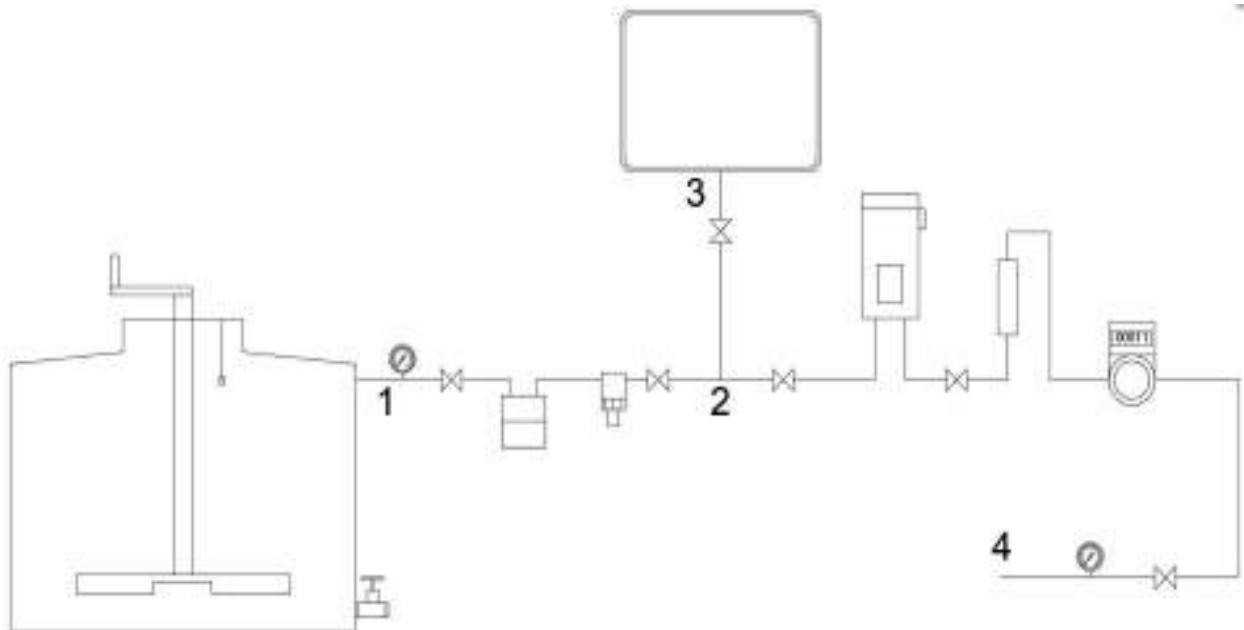


Figura 2.9. Trayecto de biogás  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)



Se realiza el cálculo con varios diámetros de tubería para transporte de biogás que se encuentra numerado de acuerdo a la figura 2.9.

Para determinar las pérdidas de presión se tomó como referencia los diámetros normalizados de tubería de acuerdo a la norma ASTM D 2513, se calcula además las pérdidas en los, accesorios y la pérdida de presión para cada punto se determina con la ecuación 2.31 [31] [39]

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma_2} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.31.)$$

Dónde:

P1 y P2= Presión de biogás (kPa)

$\gamma_1$ = Peso específico (N/m<sup>3</sup>)

z1= altura en la dirección de la gravedad (m)

V1= Velocidad del fluido en la sección (m/s)

hL= Pérdida de fricción en tubería (m)

Se determina la velocidad del flujo con la ecuación 2.32 [31]

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.32.)$$

Dónde:

$\dot{Q}_{biogás}$  = Caudal de biogás (m<sup>3</sup>/h)

A= área de tubería (m<sup>2</sup>)

Se calcula el número de Reynolds con la ecuación 2.33 [31]

$$NR = \frac{V * D * \rho}{\mu} \quad (2.33.)$$

Al ser un flujo turbulento se utiliza la ecuación de Darcy 2.34 [31]

$$hL = f x \frac{L}{D} x \frac{V^2}{2g} \quad (2.34.)$$

A continuación de muestra el cálculo de presión para cada trayecto en los cuadros correspondientes

### Trayecto 1-2

Accesorios:

- 2 Unión
- 2 T
- 2 Válvulas de retención( las pérdidas en los accesorios se pueden ver anexo 12)

Tabla 2.10. Pérdidas según el accesorio

Pérdidas en accesorios	
Unión	0,47 m
Te	1,18 m
Válvula tipo compuerta	0,30 m

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Se determina la pérdida de accesorios total del trayecto 1-2 con la ecuación 2.35 [31]

$$KT_{1-2} = \text{Pérdida accesorio} \times N \text{ de accesorios} \quad (2.35.)$$

Datos:

$$L_{1-2} = 0,5 \text{ m}$$

$$LT_{1-2} = (0,47 \text{ m} \times 2) + (1,18 \text{ m} \times 2) + (0,30 \text{ m} \times 2)$$

$$LT_{1-2} = 3,9 \text{ m}$$

Tabla 2.11. Cálculo de presión

Di (plg)	Di(mm)	A (m2)	Q (m3/s)	V(m/s)	$\rho$ (kg/m3)	$\mu$ (Pa s)	NR	f
¼	6,35	0,000032	7,83E-05	2,47	1,2	0,00001	1885	0,03
3/8	9,53	0,000071	7,83E-05	1,1	1,2	0,00001	1257	0,05
½	12,7	0,000127	7,83E-05	0,62	1,2	0,00001	942,4	0,07
¾	19,05	0,000285	7,83E-05	0,27	1,2	0,00001	628,3	0,1

hL1-2	L1-2 (m)	k accesorios	$\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	P1 (kPa)	P2 (kPa)
4,73	0,5	3,90	7,03	8,15	8,12
4,06	0,5	3,90	7,03	8,15	8,12
3,95	0,5	3,90	7,03	8,15	8,12
3,91	0,5	3,90	7,03	8,15	8,12

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Se selecciona la tubería de diámetro interior 9,53 mm (3/8 plg).

### Trayecto 2-3

Accesorios:

- 1 Válvulas de retención

Se determina pérdida de accesorios total del trayecto 2-3 con la ecuación 2.35 y pérdida en accesorios de acuerdo a tabla 2.12.

Datos:

$$L_{2-3} = 2 \text{ m}$$

$$k_{2-3} = (0,3 \text{ m x1})$$

$$k_{2-3} = 0,3 \text{ m}$$

Tabla 2.12. Cálculo de presión 2

hL2-3	L2-3 (m)	k accesorios	P3(kPa)
3,44	2,00	0,30	8,09
0,76	2,00	0,10	8,12
0,31	2,00	0,10	8,12
0,14	2,00	0,10	8,12

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Se selecciona la tubería de diámetro interior 9,53 mm (3/8 plg).

### Trayecto 2-3

Accesorios:

- 3 Válvulas de retención
- 2 Unión

- 1 Te

Se determina la pérdida de accesorios total del trayecto 2-3 con la ecuación 2.35 y pérdida en accesorios de acuerdo a tabla 2.13.

Datos:

$$L_{2-3} = 1,5 \text{ m}$$

$$k_{2-3} = (0,3 \text{ m} \times 3) + (0,47 \text{ m} \times 2) + (1,18 \text{ m} \times 1)$$

$$k_{2-3} = 3,02 \text{ m}$$

Tabla 2.13. Cálculo de presión 3

hL3-4	L3-4 (m)	k accesorios	P4P3 (kPa)
5,52	1,50	3,02	8,05
3,51	1,50	3,02	8,09
3,18	1,50	3,02	8,10
3,05	1,50	3,02	8,10

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Se selecciona la tubería de diámetro interior 9,53 mm (3/8 plg).

### 2.7.5. Determinación del espesor del tanque de biodigestor

Se determinó la presión al interior del tanque con la ecuación 2.12, como factor de seguridad se estima un 15% del valor obtenido. [40]

Para determinar si el espesor de la pared del tanque soporta la presión de operación se determina con la ecuación 2.36, se calcula la resistencia a la tracción de polietileno con varios espesores de tanque y se compara con la resistencia a la tracción de polietileno de acuerdo a las características del fabricante. [41]

$$Kc = \frac{P_{MO} \times De}{2 \times e} \quad (2.36.)$$

Dónde:

e= espesor de la pared del tanque [mm]

De= diámetro exterior del tanque [m]

Kc= resistencia a la tracción del plástico calculado [kPa]

Datos:

$D= 1,20 \text{ m}$

$K_p= 21000 \text{ kPa}$  (Polietileno de alta densidad)

$P_{MO}= 8,15 \text{ kPa} + 15\%= 9,37 \text{ kPa}$

Al reemplazar los valores en la ecuación 2.36 se determina resistencia a la tracción del tanque de polietileno como se muestra en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Calculo de resistencia de polietileno de acuerdo al espesor

e	$P_{MO}$	$D_e$	$K_c$	$K_p$
3	9,37	1200	1874,0	21000
4	9,37	1200	1405,5	21000
5	9,37	1200	1124,4	21000
6	9,37	1200	937,0	21000

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

La resistencia a la tracción del plástico  $K_c < K_p$  por lo tanto se selecciona un tanque con un espesor de 6 mm.

### 2.7.6. Cálculo del dispositivo de agitación

Su función es mantener el equilibrio de la temperatura del sustrato, mezclar el sustrato, prevención de la formación de aglomeración y capas. [21]

Para el diseño de un agitador, se tiene un eje vertical provisto de impulsores horizontal, el accionamiento se produce mediante un movimiento manual que se traslada a la mezcla, el movimiento de la mezcla es de forma radial y tangencial como se muestra en la figura 2.10.

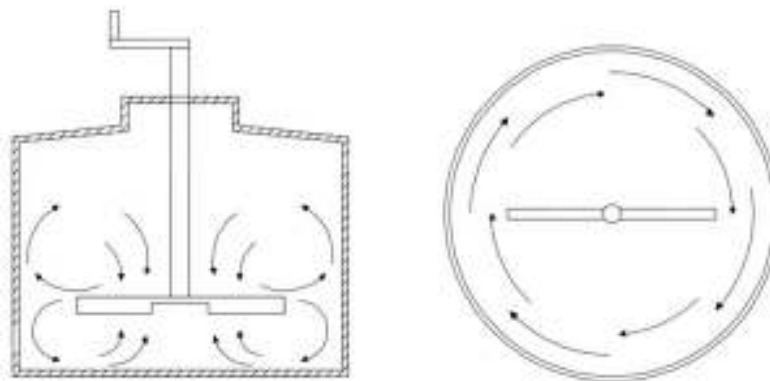


Figura 2.10. Movimiento de mezcla  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Rushton detalla que la potencia correspondiente a la fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes, el fondo del recipiente que contiene la mezcla y las fuerzas de viscosidad, representadas por el número de Reynolds, se relacionan de acuerdo a las siguientes ecuaciones: [42]

Laminar

$$K = \frac{P}{(\mu n^2 Dr^3)} \quad (2.37.)$$

Turbulento

$$K = \frac{P}{(\rho n^3 Dr^5)} \quad (2.38.)$$

Valor transitorio

$$P = K \rho n^3 Dr^5 (N_R)^p (N_F)^q \quad (2.39.)$$

Consideraciones si:

Régimen laminar:  $N_R < 10$

Régimen transitorio:  $300 < N_R < 10000$

Régimen turbulento:  $N_R > 10000$

Dónde:

P = potencia necesaria (W)

n = número de revoluciones por minuto (rpm)

Dr = diámetro del agitador (m)

$\rho$  = Densidad nominal de la materia orgánica ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  = viscosidad [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

K = Número de potencia

En la tabla 2.15. se encuentra los parámetros para dimensionar el agitador.

Tabla 2.15. Parámetros de diseño

Parámetros	Características
Fluido a agitar	Mezcla de estiércol de ganado vacuno y agua
Densidad de mezcla	1000 kg/m <sup>3</sup>
Presión de operación	8,15 kPa
Temperatura de operación	20°C a 25°C
Altura de tanque	145 cm
Diámetro de tanque	120 cm

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

La ecuación 2.40 sirve para calcular el número de Reynolds y verificar el tipo de fluido.  
[42]

$$N_R = \frac{n \rho D e^2}{\mu} \quad (2.40.)$$

Dónde:

n = velocidad de rotación [rpm]

De = diámetro del agitador [m]

ρ = densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>]

μ = viscosidad de la mezcla [Pa·s]

Datos:

N = 10 rpm

De = 1,2 m

ρ = 1000 kg/m<sup>3</sup>

μ = 1002 x 10<sup>-6</sup> Pa·s

$$N_R = \frac{10 \frac{rev}{min} \times (1,2)^2 m^2 \times 1000 \frac{kg}{m^3}}{1002 \times 10^{-6} Pa \cdot s}$$

$$Re = 239520$$

Del cálculo se concluye que la mezcla es de régimen turbulento.

Con la ecuación 2.38 se calcula la potencia necesaria de rotación del agitador y se reemplaza los valores, en la figura 2.11. se muestra el detalle del agitador.

Datos:

$D_r = 0,50$  m (Diámetro del agitador, de acuerdo al diseño propuesto)

$n = 8$  rev/ min

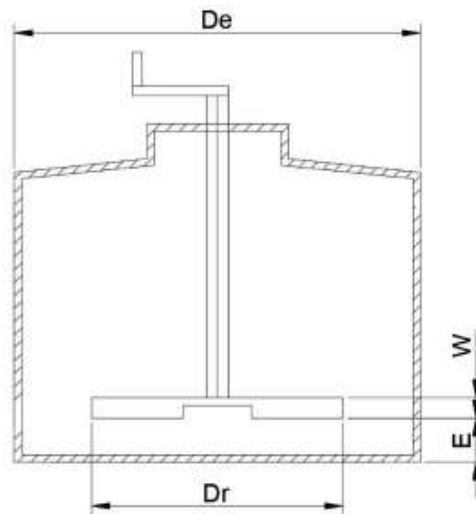


Figura 2.11. Sistema de agitación  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Para determinar número de potencia K, se determina gráficamente con la figura 2.12. y el número de Reynolds calculado, se selecciona la curva 3.

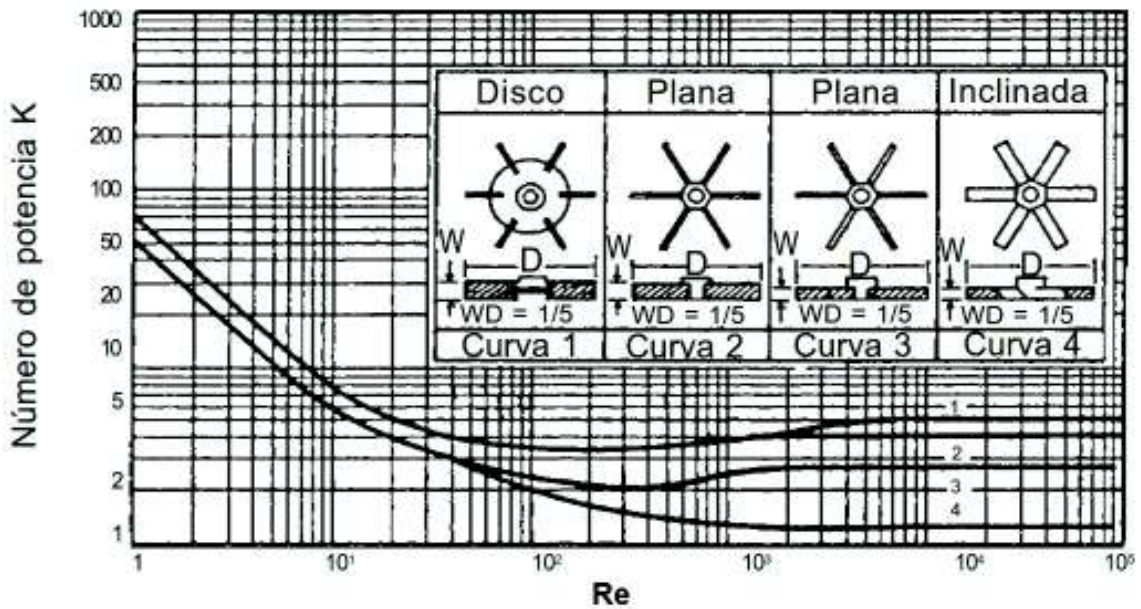


Figura 2.12. Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds  
(Fuente: Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, 2013)



Por lo tanto al realizar el trazado se tiene un número de potencia de  $K= 2$

Reemplazando los valores en la ecuación 2.38 se obtiene la potencia del agitador.

$$P = 2 \times \left[ 1000 \frac{kg}{m^3} \times \left( 8 \frac{rev}{min} \right)^3 \times (0,5 m)^5 \right]$$

$$P = 0,14 W$$

Con la ecuación 2.41 se determina la fuerza necesaria que debe realizar una persona para mover de forma manual el fluido a través del agitador. [41]

$$F_t = \frac{P \times t}{d_b} \quad (2.41.)$$

Dónde:

$F_t$ = Fuerza tangencial del brazo (N)

$d_b$ = Longitud del brazo impulsor (m)

$t$ = tiempo de movimiento (s)

Datos:

$d_b = 0,30 m$

$t = 5 min$

$$F_t = \frac{0,14 \frac{J}{S} \times 5 \frac{min}{1 min} \times 60 s}{0,30 m}$$

$$F_t = 0,14 kN$$

Se observa que la fuerza que debe aplicar una persona es 0,14 kN.

Fuerza máxima de una persona en empujar 0,19 kN [43]

Fuerza máxima de una persona en halar 0,21 kN [43]

## 2.8. Ensamble e instalación del sistema de generación de energía eléctrica

El cálculo, selección de los elementos principales del sistema de generación de energía eléctrica se estableció de acuerdo a la figura 2.4 y la implementación se describe a continuación.

Para la instalación se representa el procedimiento ejecutado:

1. Preparación, limpieza del espacio físico para instalación del sistema de generación de energía eléctrica, que se encuentra cerca de la materia prima para su carga.
2. Delimitación de un espacio físico para implantación del proyecto, figura 2.13.



Figura 2.13. Delimitación de proyecto  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

3. Se construye una cubierta de plástico, para aprovechar el paso directo del sol con la finalidad de mantener una temperatura nominal y protección del medio externo como se muestra en la figura 2.14.



Figura 2.14. Cubierta de sistema de generación de energía eléctrica  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

4. Ensamble e instalación del sistema de generación de energía eléctrica de los elementos seleccionados anteriormente figura 2.15.



Figura 2.15. Elementos del sistema de generación de energía eléctrica  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

El proceso de ensamble se describe a continuación:

Instalación del tanque de polietileno tipo batch, figura 2.16.



Figura 2.16. Tanque de polietileno instalado  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Colocación de tubería, accesorios, válvulas de paso de biogás, válvula de seguridad, desulfurizador y sistema de eliminación de dióxido de carbono, figura 2.17.



Figura 2.17. Ensamble de tubería, accesorios y equipos  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Instalación de depósito de almacenamiento de biogás, de medidor de flujo, generador eléctrico, manómetros y medidor de temperatura, como se muestra en la figura 2.18. y figura 2.19., el plano general se muestra en anexo 13



Figura 2.18. Ensamble de depósito de almacenamiento de biogás  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)



Figura 2.19. Generador eléctrico  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

## **2.9. Protocolo de pruebas**

Para la evaluación del sistema de generación de energía eléctrica, se realiza las siguientes pruebas:

- Prueba de hermeticidad sin carga.
- Prueba de hermeticidad con carga.
- Prueba de temperatura y ph.
- Prueba de generación de biogás purificado.
- Prueba de generación de energía eléctrica.

### **2.9.1. Prueba de hermeticidad sin carga.**

Consiste en verificar la existencia y localización de fugas en las conexiones de todo el sistema de generación de energía eléctrica.

#### **Características de la prueba de hermeticidad sin carga**

La prueba permitirá examinar la existencia de fugas, hermeticidad en los accesorios, tubería y equipos del sistema.

Prevenir fuego, explosiones, contaminación ambiental o daño al ser humano.



#### **Método de prueba**

- Antes de iniciar la prueba de hermeticidad de debe asegurar que las válvulas finales o que limitan la sección a ensayar estén cerradas y válvulas intermedias se encuentren abiertas.
- Se realiza la prueba de hermeticidad al introducir aire a presión de forma completa en toda la instalación, conocido como prueba de presión neumática.
- La presión de prueba es de 15 kPa (2,2 psi), con una duración de 15 minutos, se utiliza un compresor de aire.
- En el rango de tiempo de prueba se observa si existe una disminución de la presión del manómetro instalado en el sistema.

- En cada punto de conexión como codos, uniones, Te, válvulas de paso de flujo, ingreso, salida de equipos y en la tubería, se aplica una mezcla de agua y detergente para detección de fugas o se puede utilizar un detector de fugas.
- Antes de finalizar la prueba, se debe tomar 5 lecturas de presión en el rango de tiempo, los resultados se deben documentar. [44]

### Equipos utilizados

Tabla 2.16. Equipos para prueba de hermeticidad con carga

Equipo	Figura	Descripción
Manómetro		Rango de medición 0 a 140 psi Resolución 2 psi Capacidad máxima 140 psi
Compresor		Compresor de aire, 25 l, 115 psi.

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### Acciones correctivas

Si existe fugas en accesorios, tuberías, equipos se debe realizar el cambio de accesorios, proveedor y calidad.

Cuando en una segunda prueba de hermeticidad, se repitan los problemas de fugas en accesorios, equipos, tubería se debe realizar un rediseño de los elementos.

### 2.9.2. Prueba de hermeticidad con carga.

Se fundamenta al realizar la primera carga total de la materia prima en el biodigestor, para seguimiento y control del funcionamiento del sistema de generación de energía eléctrica.

### Materiales

- Estiércol de ganado vacuno: 473,2 kg

- Agua 0,473 m<sup>3</sup>

### Características de la prueba de hermeticidad con carga



Prevenir la generación de fuego, explosiones, contaminación ambiental, daño al ser humano, verificar la hermeticidad de accesorios y equipos.

### Método de prueba

- Al inicial la prueba se abre las válvulas de paso de flujo, excepto la válvula de paso al generador eléctrico.
- Se realiza la prueba a partir de los 10 días, cuando el sistema comienza a producir biogás, se verifica la presión del manómetro instalado a la salida del biodigestor, la presión reportada en el manómetro es el valor a tener como referencia para la prueba.
- En la presión reportada del manómetro, se procede a revisar la superficie exterior del biodigestor y cada punto de conexión en el sistema, evidenciando que no varíe la presión, además se puede aplicar una mezcla de agua y detergente para localizar fugas o puede utilizar un detector de fugas.
- Al finalizar la prueba los resultados se deben documentar. [44]

### Equipos utilizados

Tabla 2.17. Equipos para prueba de hermeticidad con carga

Equipo	Figura	Descripción
Balanza		Rango de medición 0 a 15 kg Resolución 1 kg Capacidad máxima 15 kg
Manómetro		Rango de medición 0 a 140 psi Resolución 2 psi Capacidad máxima 140 psi

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

## Acciones correctivas

Si existen fugas de biogás en conexiones se debe cambiar de accesorios, tubería o equipo que presente problemas en el funcionamiento.

Cuando existan problemas de funcionamiento de los componentes se debe realizar el rediseño de equipos.

### 2.9.3. Prueba de temperatura y ph

La prueba consiste en verificar la temperatura y ph del interior del tanque de almacenamiento durante la primera carga de la materia prima.

#### Características de la prueba de temperatura y ph

- La prueba permitirá verificar las condiciones mesofílica que establece un rango óptimo de temperatura de 25 °C a 35 °C para la generación de biogás.
- Detectar una acumulación de ácidos orgánicos, la presencia de residuos que inhiben la actividad de las bacterias formadoras de metano.

#### Método de prueba


- Registrar cuatro mediciones diarias de temperatura en el siguiente horario durante 40 días y realizar de las cuatro mediciones un promedio general:

06:00; 10:00; 12:00; 18:00


- A partir de los 5 días de inicio de prueba y cada 3 días se verifica el ph. La lectura tomada de ph se comprueba que se encuentre en el intervalo de 6,8 a 7,2.
- Al finalizar la prueba los resultados se deben documentar.

#### Equipos utilizados

Tabla 2.18. Equipos para prueba de temperatura y ph

Equipo	Figura	Descripción
Termocupla y medidor digital		Resolución -20°C~100°C con conector TC, flexible, Teflón, longitud de 500 mm, Tipo K



Medidor de ph		Rango de pH desde pH 0.0 a 14.0
---------------	---	---------------------------------

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### Acciones correctivas

- En caso de que la temperatura del interior del tanque de almacenamiento de materia prima se mantenga en un valor inferior a los 20° C, se debe agregar un material aislante sobre la superficie externa a fin de mantener una temperatura mayor.
- Cuando el ph se encuentre inferior a 6 se debe añadir sustancias neutralizantes como oxido de calcio (CaO), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), hidróxido de sodio (NaOH).
- Si el proceso no genera biogás por niveles de acidez muy altos se debe vaciar el depósito de materia prima y reiniciar el proceso de fermentación.

### 2.9.4. Prueba de generación de biogás purificado

La prueba consiste en establecer la generación de biogás, mediante mediciones de presión y caudal, además por medio de análisis de cromatografía se verifica el estado de pureza del biogás.




#### Método de prueba

- Para verificar la combustión del biogás, se dejar fluir un caudal de biogás a la salida de manguera antes de la conexión del generador eléctrico, se enciende el biogás para confirmar la combustión del biogás producido.
- Se debe tomar una muestra de biogás en una bolsa al vacío Tedlar, la muestra se debe trasladar para el análisis en el laboratorio de Análisis Instrumental, Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.

La muestra sirve para comprobar la composición de biogás, evidenciando la cantidad de metano, dióxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, sulfuro de hidrogeno.

## Equipos utilizados

Tabla 2.19. Equipos para prueba de generación de biogás purificado

Equipo	Figura	Descripción
Manómetro		Rango de medición 0 a 140 psi Resolución 2 psi Capacidad máxima 140 psi
Medidor de caudal de biogás		Caudal máximo 4 m <sup>3</sup> /h Caudal mínimo 0,025 m <sup>3</sup> /h Presión máxima 30 kPa
Bolsa tedlar para tomar muestra de biogás		Capacidad de 1 L

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### Acciones correctivas

- Cuando no exista una disminución del porcentaje de dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno se debe cambiar de método de purificación de biogás.
- Si no existe generación de biogás se debe vaciar y reiniciar el proceso de fermentación, cambiar de materia prima y realizar la caracterización.

### 2.9.5. Prueba de generación de energía eléctrica

La prueba se debe efectuar de acuerdo a una carga aplicada y la potencia entregada por el generador en un tiempo establecido.

#### Características de la prueba

La prueba permitirá verificar el tiempo de funcionamiento del generador eléctrico con un volumen de biogás.

## Método de prueba

- Se abre la válvula de paso de biogás hacia el generador manteniendo una presión de trabajo en el rango de 2 kPa a 6 kPa, encender de forma manual el generador, verificar el tiempo de funcionamiento y la potencia entregada por el generador eléctrico.
- Se conecta una carga variada, para verificar la potencia entregada por el generador eléctrico.
- Se verifica el consumo en el tiempo de prueba de biogás del generador, utilizando el medidor de flujo.
- Al finalizar la prueba los resultados se deben documentar.

## Equipos utilizados

Tabla 2.20. Equipos para prueba de generación de energía eléctrica

Equipo	Figura	Descripción
Multímetro digital		Milivoltios de CC Rango 600,0 mV Voltios de CC Rango/Resolución: 6,000 V/0,001 V Continuidad Rango 600 $\Omega$ Resolución: 1 $\Omega$
Medidor de caudal de biogás		Caudal máximo 4 m <sup>3</sup> /h Caudal mínimo 0,025 m <sup>3</sup> /h Presión máxima 30 kPa

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

## Acciones correctivas

Si no se enciende el generador eléctrico se debe verificar el sistema de conversión de combustible y conexiones eléctricas.

Además de presentar paradas imprevistas del generador se debe verificar la pureza del biogás.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra los resultados que se obtuvieron en la puesta en marcha del proyecto implantado en la ciudad de Quito, Comuna de Lumbisí, de acuerdo a la aplicación de las distintas metodologías de cálculo, donde se realizó el análisis técnico, selección de elementos, equipos, a través de la medición, revisión, ejecución de pruebas de funcionamiento, laboratorio y arranque del sistema.

Además en esta sección se realiza un análisis de la viabilidad económica de la ejecución del proyecto.

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Prueba de hermeticidad con carga y sin carga

Los resultados obtenidos en la prueba de hermeticidad sin carga se reporta en la tabla 3.1., en los datos reportados de las 5 mediciones se observa que no existió cambio de presión se mantuvo constante durante 15 minutos.

Tabla 3.1. Prueba de hermeticidad sin carga

Medición	Presión de operación (kPa)	Presión de operación (psi)	Presión de prueba (psi)	Presión medida (psi)
1	6	0,9	2,2	2,2
2	6	0,9	2,2	2,2
3	6	0,9	2,2	2,2
4	6	0,9	2,2	2,2
5	6	0,9	2,2	2,2

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

La prueba de hermeticidad con carga de la materia prima, realizada después de los 10 días se constató la generación de biogás, se revisó los componentes, accesorios, superficie exterior del biodigestor donde no se registró fugas, figura 3.1.



Figura 3.1. Prueba de hermeticidad  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### 3.1.2. Resultados de mediciones de presión y temperatura en condiciones de operación para generación de biogás con carga.

Se genera un reporte de los valores de presión y temperatura, medidos en la hoja de registro, que corresponde a la toma diaria de lecturas de presión, temperatura, como se muestra en la figura 3.2., figura 3.3. y figura 3.4., en el registro diario se tiene como observación sobre las mediciones de temperatura, que durante la mañana y noche se registran valores bajos.



Figura 3.2. Medición de temperatura en la mañana  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)



Figura 3.3. Medición de temperatura al medio día  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)



Figura 3.4. Medición temperatura en la noche  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Los resultados de la medición de temperaturas y presión en el biodigestor se muestran en la tabla 3.2., la fecha de inicio de las mediciones es a partir del 2018-01-06.

Tabla 3.2. Medición de temperatura y presión con el biodigestor cargado

Medición	Fecha	Temperatura Interior del biodigestor (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Presión biodigestor (psi)
1	2018-01-06	21	15	0
2	2018-01-07	24	17	0
3	2018-01-08	20	15	0
4	2018-01-09	20	15	0
5	2018-01-10	25	19	0
6	2018-01-11	28	21	0
7	2018-01-12	22	17	0
8	2018-01-13	21	16	0
9	2018-01-14	25	18	0
10	2018-01-15	27	20	0,1
11	2018-01-16	21	15	0,1
12	2018-01-17	21	15	0,1
13	2018-01-18	22	15	0,1
14	2018-01-19	24	17	0,1
15	2018-01-20	25	19	0,1
16	2018-01-21	19	16	0,2
17	2018-01-22	21	17	0,2
18	2018-01-23	22	17	0,2
19	2018-01-24	26	20	0,2
20	2018-01-25	29	20	0,4
21	2018-01-26	27	20	0,4
22	2018-01-27	28	21	0,4
23	2018-01-28	22	18	0,4
24	2018-01-29	28	21	0,8
25	2018-01-30	21	17	0,8
26	2018-01-31	26	20	0,8
27	2018-02-01	26	21	0,8
28	2018-02-02	25	19	0,8
29	2018-02-03	22	17	0,8
30	2018-02-04	25	19	0,8
31	2018-02-05	22	18	0,8
32	2018-02-06	21	18	1,2
33	2018-02-07	23	19	1,2
34	2018-02-08	29	21	1,6
35	2018-02-09	26	19	1,6
36	2018-02-10	22	18	2
37	2018-02-11	28	20	2

38	2018-02-12	27	21	2
39	2018-02-13	23	18	2
40	2018-02-14	25	18	2

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

La figura 3.5. detalla los resultados reportados en la tabla 3.2, corresponden al monitoreo de la temperatura interna del biodigestor y medio ambiente, que se realizó en el lugar de implantación del proyecto, en el grafico se observa como varía el comportamiento de la temperatura de acuerdo al tiempo de retención. Los valores de temperatura corresponden al promedio diario de cuatro lecturas en el siguiente horario 06:00; 10:00; 12:00; 18:00

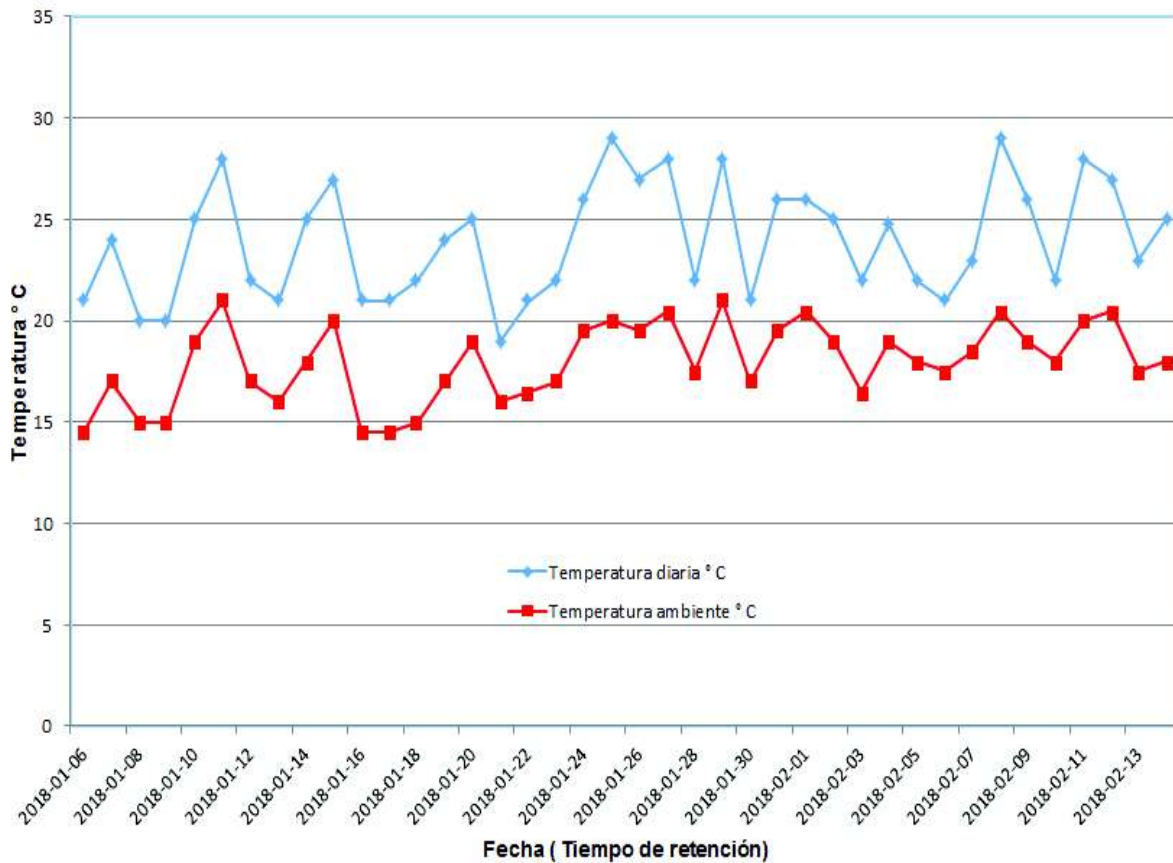


Figura 3.5. Monitoreo de temperatura en el interior de biodigestor  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

Al establecer el tiempo de retención de 35 días se obtiene los valores de presión de la primera carga de materia prima, las lecturas de la presión corresponden al registro diario hasta finalizar el tiempo establecido de prueba, además se considera que después de los 35 días, continua la generación de biogás disminuyendo el volumen de generación de biogás después de un tiempo en el cual finaliza la digestión anaeróbica. La figura 3.6 evidencia la toma de datos de presión y la figura 3.7., detalla el comportamiento y

aumento de la presión de acuerdo a el tiempo de retención. En el anexo 14 se muestra la carga de la materia prima.



Figura 3.6. Medición presión  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

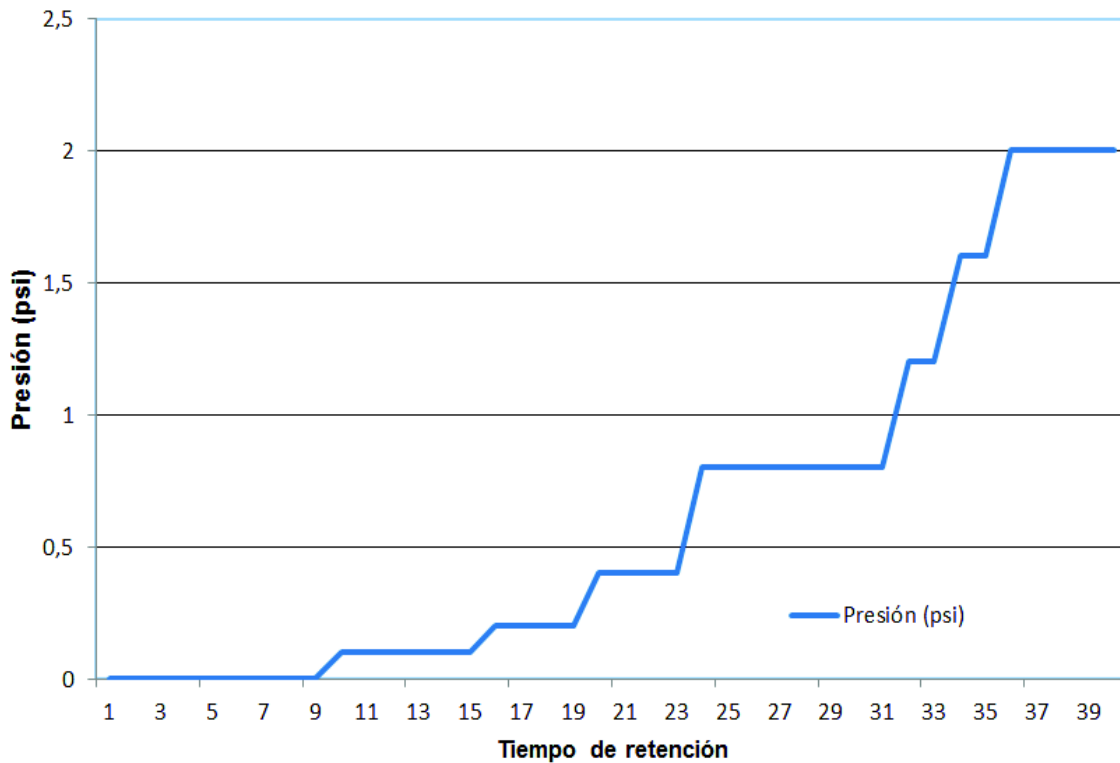


Figura 3.7. Monitoreo de presión  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

En la figura 3.8 se muestra el monitoreo del pH en el biodigestor de acuerdo al tiempo de retención. De acuerdo al monitoreo del pH se observa que se encuentra en los rangos de 6,8 a 7,2. Siendo este potencial el idóneo para la producción del biogás.



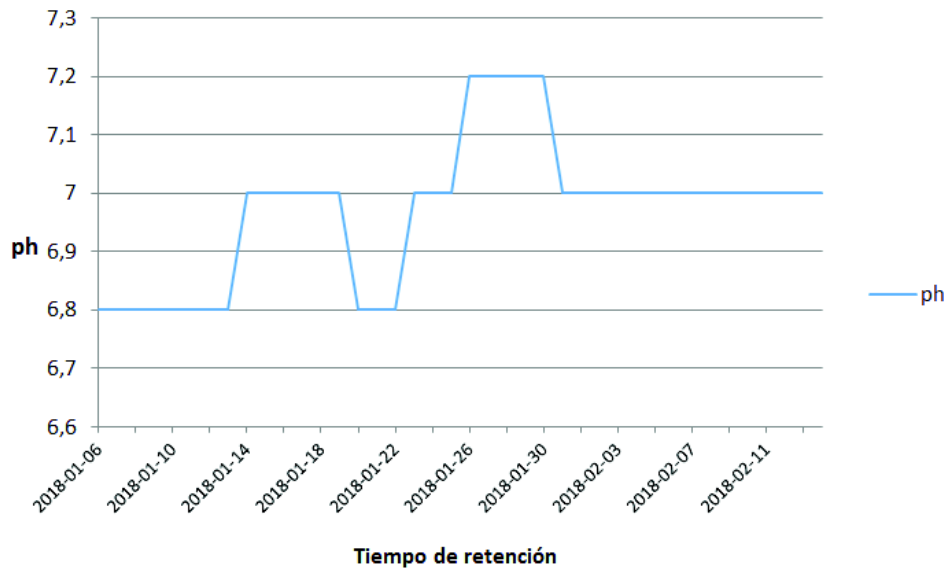


Figura 3.8. Monitoreo de ph  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### 3.1.3. Resultados de generación de biogás purificado

Para evidenciar la generación de biogás y que el volumen almacenado contenga un porcentaje considerable de metano, se realiza por medio de la combustión del biogás que una llama continua en la figura 3.9. se presenta generación de una llama continúa producida por la combustión del biogás, durante el tiempo de retención de 35 días el sistema generó un volumen de biogás de  $0,72 \text{ m}^3$ .



Figura 3.9. Prueba de combustión de biogás  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

En el laboratorio de Análisis Instrumental, Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional se realizó el análisis de cromatografía de gases, lo que determinó el estado de pureza del biogás, presentados en la tabla 3.3. Ver anexo 15.

Tabla 3.3. Composición de muestra de biogás

Componente	% Peso	% Moles
Nitrógeno	1,32	1,23
Oxígeno	4,32	3,51
Metano	37,77	61,32
Dióxido de carbono	56,05	33,17
Agua	0,54	0,78
H2S	<0,001	<0,001
Total	100,00	100,00

Densidad relativa	0,90
Peso molecular promedio (g/mol)	26,04
Poder calorífico superior (Btu/pie <sup>3</sup> )	599,57
Poder calorífico inferior (Btu/pie <sup>3</sup> )	540,29

(Fuente: laboratorio de Análisis Instrumental, Departamento de Ingeniería Química, EPN, 2018)

### 3.1.4. Resultados de generación de energía eléctrica

La eficiencia energética global del sistema se calcula con la ecuación 3.1 [45]

$$\eta_e = \frac{Ne}{Ch * LHV_{biogás}} \times 100 \quad (3.1.)$$

Dónde:

Ch= Consumo por hora de biogás por el motor (m<sup>3</sup>/h)

Ne= Carga eléctrica efectiva en el motor-generator (W)

LHV= Poder calorífico inferior de biogás (kWh/m<sup>3</sup>)

Para medir el consumo por hora de biogás por el generador se utilizó un medidor de flujo másico, la carga se mantiene de forma constante. Las mediciones se realizaron en los días 19 y 20 de mayo de 2018.

La eficiencia del sistema se determinó con la ecuación 3.1, a continuación se exponen los resultados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Cálculo de eficiencia del sistema de energía eléctrica

Nº Medición	Consumo específico biogás (m <sup>3</sup> )	Tiempo (min)	Carga eléctrica generador (W)	Poder calorífico inferior de biogás (kWh/m <sup>3</sup> )	Eficiencia (η)
1	0,175	10	120	5,6	20,44
2	0,180	10	120	5,6	19,88
				promedio	20,16

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

En las figuras 3.10. y 3.11. se presenta la generación de energía eléctrica a través del generador, posteriormente se adiciona una carga de iluminación y se mide la corriente, la prueba fue realizada en dos ocasiones con la misma carga y el tiempo de 10 minutos.



Figura 3.10. Medición de Corriente  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)



Figura 3.11. Prueba de medición del consumo de biogás  
(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### 3.2. Costos del proyecto

El cálculo de la inversión total del proyecto se muestra a continuación:

#### 3.2.1. Inversión inicial del proyecto

La inversión inicial del proyecto se refiere al costo del ensamblaje, construcción del sistema de generación eléctrica, adecuaciones de protección del sistema y ensayos de laboratorio que se presenta en la tabla 3.5., en el anexo 16 se detalla el costo específico de cada componente del sistema de generación de energía eléctrica.

Tabla 3.5. Inversión inicial de proyecto

Ítem	Componente	Costo total (USD)
1	Sistema de generación eléctrica	1.005,87
2	Ensayos de laboratorio	157,55
3	Construcción de la cubierta	80,80
	TOTAL	1.244,22

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

#### 3.2.2. Costo de operación

El costo de operación incluye conceptos de gastos recurrentes anuales asociados con la fase de operación. Los costos directo e indirecto de operación se asocian con las cinco áreas principales de recursos (personal, maquinaria, materiales, energía e información) son una parte muy importante de los costos de esta categoría. [46]

**Costos directos.** Se establece los costos directos a los que están relacionados con costos de la mano de obra y materiales que se asocian con alguna actividad productiva, de servicio o construcción. [46]

Los costos directos de materiales para operación del sistema se resumen en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Costos directos materiales

Insumos	Unidad	Costo USD	Cantidad utilizada al mes	Costo directo total mensual USD	Costo anual USD
Hidróxido de Sodio	C/100 g	0,41	100	0,41	4,92
Óxido de Hierro	Kg	1,40	2,7	3,78	45,36
Agua	m <sup>3</sup>	0,45	0,474	0,21	2,52
				TOTAL	52,80

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

El costo directo de mano de obra de operación se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Costo directo de mano de obra

Costo Directo	Costo USD/hora	Horas laborables al mes	Costo total mensual USD	Costo total Anual USD
Mano de obra	2,40	84	201,60	2.419,20
Diseño e ingeniería para construcción	50,00	12	---	600,00
			TOTAL	3.019,20

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

En la tabla 3.8. se muestra el resumen del costo total de operación al año

Tabla 3.8. Resumen de costo total de operación

Descripción	Valor (USD)
Costos directos	52,80
Costo de mano de obra y diseño e ingeniería para construcción	3019,20
<b>Costo total de operación</b>	<b>3072,00</b>

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

### 3.2.3. Costo por mantenimiento

Esta actividad consiste en realizar revisión de válvulas, sujeción de tubos de conducción de biogás, equipos, cambio de aceite del generador, limpieza de equipos y cubierta, todas estas actividades se asume un valor del 10% del costo de la inversión lo cual da un valor \$124,00 al año.

### 3.2.4. Costo total

En la tabla 3.9. se presenta el resumen de los costos de las distintas actividades y procesos.

Tabla 3.9. Costo total

<b>Descripción</b>	<b>Subtotal USD</b>
Inversión inicial del proyecto	1.244,22
Costo de operación	3.072,00
Costo por mantenimiento	124,00
<b>TOTAL</b>	<b>4.440,22</b>

(Fuente: Elaborado por autor, 2018)

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se cumplió el objetivo del proyecto de generar energía eléctrica, mediante el diseño y selección de los elementos para la construcción del sistema de generación eléctrica a través de la utilización de biogás como combustible, la misma que se utilizará para iluminación y accionamiento de bomba de agua de baja capacidad en una pequeña granja ubicada en la Comuna Lumbisí, obteniéndose una eficiencia del 20% del sistema.
- La temperatura en el interior del biodigestor durante el tiempo de estudio y retención de la mezcla del sustrato presentó un promedio de 25 °C, lo cual comprueba que se encuentra en el rango de fermentación mesofílico, por lo que la generación de biogás se realiza en un tiempo de 35 días, evidenciando que este tiempo es alto.
- En el análisis de cromatografía realizado en el laboratorio de Análisis Instrumental, Departamento de Ingeniería Química, EPN, se comprobó que el biogás tiene un poder calorífico de 599,57 Btu/pe3 y un contenido de metano 37,77 %, dióxido de carbono 56,05 %, agua 0,54 %, sulfuro de hidrogeno <0,001, nitrógeno 1,32 % y oxígeno 4,32 %. En el cual, se evidencia un alto contenido de dióxido de carbono en el biogás que dificulta el encendido del generador eléctrico.
- Los resultados de análisis energético muestran que para obtener una carga en kW a la salida de generador, se requiere más combustible debido a que el biogás tiene menor porcentaje de CH<sub>4</sub> y mayor cantidad de CO<sub>2</sub> en la mezcla de biogás, esto se debe principalmente a la disminución en el poder calorífico inferior del biogás.
- En base a la caracterización de la materia prima realizado en el laboratorio del INIAP, se verificó que las características del estiércol de ganado vacuno se encuentran en una relación carbono nitrógeno y un nivel de 22,80, lo que muestra que tiene una mayor velocidad de biodegradación del sustrato y generación de biogás.
- Las pruebas de campo reflejaron el comportamiento real de la unidad generadora, evidenciando que se requiere mayor cantidad de biogás para la generación de energía eléctrica, la generación de biogás en un tiempo de 35 días no es suficiente para cubrir la demanda de energía. El tiempo total de prueba fue de 20 minutos con un volumen de consumo de biogás de 0,36 m<sup>3</sup> con una carga de 120 W.

## 4.2. Recomendaciones

- Instalar un sistema de calentamiento solar para agua con el cual a través de un serpentín circule por el interior del biodigestor y caliente el sustrato, con la finalidad de disminuir el tiempo de generación de biogás para alcanzar un rango de fermentación termofílica de 50 °C a 60°C.
- Implementar un sistema de generación de biogás de mayor capacidad debido a que el biogás presenta un bajo contenido de metano y alto en dióxido de carbono, bajo poder calorífico. El sistema realizado en el proyecto fue mediante la aplicación de un biodigestor tipo batch, se recomienda utilizar el mismo proceso con el incremento de una unidad tipo batch en el sistema.
- Para optimizar el sistema de generación de energía eléctrica, el arranque del generador eléctrico se realiza con GLP y el funcionamiento normal del sistema se realiza con biogás, mediante la instalación de un bypass para distribución de combustible.
- Para mejorar la calidad y rendimiento del biogás, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materias primas con bajo, alto rendimiento y distintas velocidades de generación, para en los próximos estudios se debe realizar las mezclas de sustrato con lo que genera la Comuna de Lumbisí provenientes de la ganadería ovina, porcina, cunicultura, avicultura y residuos de los cultivos agrícolas.
- Para optimizar el proceso de limpieza de biogás principalmente la remoción de CO<sub>2</sub> se puede aplicar el método de separación por membrana, donde el principio consiste en que algunos componentes de gas puedan ser transportados a través de una membrana delgada mientras que otros son retenidos, además para la purificación de metano, la permeabilidad debe ser alta.



## Referencias Bibliográficas

- [1] Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, «Línea de investigación biomasa,» 2014. [En línea]. Available: [http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/BIOMASA\\_DOSSIER](http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/BIOMASA_DOSSIER). [Último acceso: 3 9 2017].
- [2] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Balance Energético Nacional 2016, año base 2015, p. 28.
- [3] Registro Oficial N° 315 Organo del Gobierno del Ecuador, *Ley de Organización y Régimen de Comunas, Nro. 142*, Quito, 2004, pp. 31-36.
- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería, Roma, 2013, p. 21.
- [5] National Renewable Energy Laboratory, Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in St. Bernard, Louisiana, 2013, p. 6.
- [6] International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, Energy and Biomass Engineering, 1999, p. 3.
- [7] Organización Latinoamericana de Energía, OLADE, «Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe,» *enerLAC*, vol. I, n° 1, pp. 110,114, 2017.
- [8] Organización Latinoamericana de Energía, OLADE, «Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe,» *enerLAC*, vol. I, n° 2, p. 126, 2017.
- [9] J. Rincón y E. Silva, Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad, Bogotá, 2014, p. 22.
- [10] L. Carrillo, Energía de biomasa, San Salvador de Jujuy, 2004, pp. 16, 17, 33.
- [11] M. H. Gerardi, The Microbiology of Anaerobic Digesters, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 51-57, 101, 148.
- [12] S. E. Nayono, Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production, Karlsruhe, 2009, pp. 8, 9, 11, 25 - 30.
- [13] S. E. F. M. María Díaz, Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología, Bogotá, 2002, p. 45.
- [14] A. Claudio, *Análisis térmico de un digestor de laboratorio para producción de biogás*, Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica, EPN, 1987, pp. 11, 12, 13, 14.
- [15] J. Lam, *Reader for the compact course on domestic biogas technology and mass*

- dissemination*, Oldenburg, 2014, pp. 13, 14, 135.
- [16] P. L. McCarty, «Anaerobic Waste Treatment Fundamentals,» *Chemistry and Microbiology*, p. 109, 1964.
- [17] M. Varnero, Manual de biogás, Santiago de Chile: CHI/00/G32, 2011, pp. 29, 35, 42, 49, 57, 98.
- [18] A. Guevara, *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*, Lima, 1996, pp. 16, 18, 22, 24.
- [19] T. Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk y R. Janssen, *Biogas Handbook*, Esbjerg: University of Southern Denmark, 2008, pp. 23, 24.
- [20] D. Deublein y A. Steinhauser, *Biogas from waste and renewable resources*, Weinheim: Strauss GmbH, 2008, p. 115.
- [21] The German Solar Energy Society, *Planning and installing bioenergy systems : a guide for installers, architects, and engineers*, New York, 2005, pp. 54, 55.
- [22] C. A. Lemos Chernicharo, *Anaerobic Reactors*, New Delhi, 2007, p. 53.
- [23] INTA, *Manual para la producción de biogás*, Castelar, 2011, p. 34.
- [24] B. Moreno, E. Gropelli y E. Campanella, «Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás,» *Ciencia y Tecnología*, pp. 191,192, 193, 194, 2010.
- [25] J. Viquez, «Remoción del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S (g))/ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S (aq)) en el biogás,» *Ecag informa*, n° 53, pp. 17, 18, 2010.
- [26] CLIMATE-DATA.ORG, «CLIMATE-DATA.ORG,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/location/1005544/>. [Último acceso: 25 Octubre 2017].
- [27] Asociación Española de Normalización, UNE, *Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de muestreo*, 2007, pp. 20, 21, 23.
- [28] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*, Séptima edición ed., México, 2012, pp. 54, 79, 80.
- [29] J. Viquez, «Informe de validaciones de 10 aplicaciones de biogás,» SNV, Managua, 2017.
- [30] K. Chungandro y G. Manitio, *Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas*, Quito: EPN, 2010, p. 55.
- [31] R. Mott, *Mecánica de fluidos*, Sexta edición ed., México, 2006, pp. 55, 324, 325,

326.

- [32] R. Chang, Química, México: McGraw-Hill, 2002, p. 169.
- [33] J. Walsh y C. Ross, Handbook on biogas utilization, Atlanta, 1988, pp. 40,41.
- [34] L. Fernández Garcia, *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina*, Cádiz: UCA, 2016, p. 76.
- [35] M. A. Valerio Garcia, *Diseño y evaluación de un sistema para la purificación del metano producido mediante biodigestión en el ITCR*, Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, TEC, 2010, p. 43.
- [36] W. MacCabe, J. Smith y P. Harriott, Operaciones unitarias en ingeniería química, Madrid, 1998, pp. 719 - 724.
- [37] R. Burns, Fundamentos de Química, México, 2011, p. 262.
- [38] R. Treybal, Operaciones de transferencia de masa, México, 2009, pp. 39, 40, 341, 343.
- [39] American Society for Testing and Materials, ASTM, *Standard Specification for Polyethylene (PE) Gas Pressure Pipe, Tubing, and Fittings*, 2016, pp. 3, 4.
- [40] C. J. Flores Benalcazar, *Dimensionamiento de un sistema anaerobio para el tratamiento de aguas residuales domésticas rurales*, Quito: EPN, 2013, p. 185.
- [41] R. Hibbeler, *Mecánica vectorial para ingenieros, Estática*, México, 2004, p. 424.
- [42] V. Castillo, *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*, Concepción: UBB, 2013, pp. 34-38.
- [43] Ministerio de Educación y Cultura, Consejo Superior de Deportes, *Biomecánica de la fuerza muscular y su valoración*, Madrid, 1999, p. 123.
- [44] Servicio Ecuatoriano de Normalización, *Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial. Requisitos*, Quito, NTE INEN 2260. 2010, pp. 60, 61.
- [45] S. d. Souza, A. Lenz, I. Werncke, C. Nogueira, J. Antonelli y J. d. Souza, «Gas emission and efficiency of an engine generator set running on biogas,» *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, pp. 615, 616, 2015.
- [46] W. Sullivan, E. Wicks y J. Luxhoj, Ingeniería Económica, México, 2004, pp. 37, 151.


## Anexos

### Anexo 1. Formato para muestreo de estiércol de ganado vacuno

<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>	
Solicitante:.....	Teléfono:.....
Dirección:.....Provincia:..... Cantón:.....	
<b>MATERIAL</b>	
Tipo de material	
Fuente y origen de la materia prima	
Tipo de animal proveniente de materia prima	
Identificación de problemas que afectan al programa de muestras	
<b>METODOLOGIA DE TOMA DE MUESTRAS</b>	
Lugar de muestreo: .....	Fecha de muestreo:.....
Equipos y herramientas a utilizar en muestreo:	
Identificar técnica de muestreo:..... .....	Documento Normativo de Muestreo:.....
Medidas de seguridad en el muestreo	
<b>REQUISITOS, CONSERVACIÓN, ALMACENAJE Y TRANSPORTE</b>	
Envasado	
Conservación	
Almacenaje	
Transporte	
<b>DESTINATARIO</b>	
Laboratorio:.....	Dirección:.....


Si algún requisito no se aplica puede registrar como: N.A. o No aplica

## Anexo 2. Reporte de análisis de estiércol de ganado vacuno



**INIAP**  
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

**ESTACIÓN EXPERIMENTAL "SANTA CATALINA"**  
**DEPARTAMENTO DE MANEJO DE SUELOS Y AGUAS**  
**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS Y AGUAS**  
Panamericana sur Km. 1. Apartado 17-01-340  
Teléfono: 3007284. Email: laboratorio.dmsa@iniap.gob.ec  
Mejía -Ecuador



DEPARTAMENTO DE MANEJO DE SUELOS Y AGUAS  
INIAP

### REPORTE DE ANÁLISIS DE ABONOS ORGÁNICOS

**DATOS DEL PROPIETARIO**  
 Nombre : Esteban Cusi  
 Dirección : Cumbayá  
 Ciudad :  
 Teléfono :  
 Fax :

**DATOS DE LA PROPIEDAD**  
 Nombre : S/N  
 Provincia : Pichincha  
 Cantón : Quito  
 Parroquia : Cumbayá  
 Ubicación :

**PARA USO DEL LABORATORIO**  
 No. Muestra Lab. : 1157  
 Fecha de Muestreo : 16/02/2018  
 Fecha de Ingreso : 16/02/2018  
 Fecha de Salida : 05/02/2018

No. Muestra Lab.	Identificación de la muestra	mS/cm		g/100 ml							mg/l				%						
		C.E	N	Total	P	K	Ca	Mg	S	M.O.	B	Zn	Cu	Fe	Mn	pH	C/N	D.A	H	CO	
1157	Muestra 1		2.02	0.63	0.57	1.49	0.87	0.17	79.41	30.5	99.0	22.3	458.2	339.4			22.80				

**Unidades**  
 g/100 ml : gramos/100 mili litros = % ; porcentaje  
 mg/l : miligramos/litro = ppm ; partes por millón.  
 dS/m : deciSiemens/metro = mmhos/cm ; milimhos/centimetro.

**Método**  
 pH : Potenciométrico  
 C.E: Conductimétrico  
 M.O.: Calcinación.

  
**RESPONSABLE DEL LABORATORIO**

  
**LABORATORISTA**

### Anexo 3. Generador eléctrico



#### CARACTERISTICAS

Generador JL4500CX:

Potencia máxima 3800W

de potencia de emergencia para la recreación y el uso en el hogar  
mantenimiento fácil con alternato sin escobillas

generador JL4500CX:

\* Frecuencia nominal (Hz) \* 50 60

\* Potencia nominal (kW) \* 3,0 3,5

\* Max. Potencia (kW) \* 3,3 3,8

\* Tensión nominal (V) \* 115/230 120/240

\* Corriente nominal (A) \* 26,1 / 13,1 29,2 / 14,6

\* Velocidad nominal (r / min) \* 3000 3600

\* El modo de excitación \* 1

\* Factor de potencia (cos) \* 1

\* Número de fases \* Soltero

\* Modelo de motor\* JL177F

\* Tipo de motor\* Monocilíndrico, 4 tiempos, motor de gasolina refrigerado por aire

\* Diámetro x carrera (mm) \* 77x58

\* Tipo de combustible\* gasolina sin plomo de automoción

\* Marca de aceite lubricante \* 90 # gasolina, FC lubricante para motor de 4 tiempos

\* Capacidad del depósito de combustible (L) \* 25

\* Dimensión total (mm) (LxWxH) \* 690 \* 525 \* 560

\* NW / GW (kg) \* 72/76

\* Sistema de arranque\* inicio de retroceso / arranque eléctrico

\* Tipo de estructura \* Marco abierto

## Anexo 4. Tanque de polietileno



**Ficha Técnica**

# Tanques Botella

Línea  
**eco**

**Para almacenamiento de productos industriales y consumo humano**



### Características:

- Material aprobado y recomendado para alimentos por la F.D.A.
- Protección contra rayos ultravioleta (UV).
- Fabricado con resinas orgánicas (No Tóxico)

### Ventajas:

- Alta resistencia al impacto e inclemencias del clima
- Higiénicos y de fácil limpieza interior.
- No contaminan ni alteran el producto almacenado
- Con indicador de entrada y salida
- Fácil transporte y almacenaje
- Mayor capacidad
- Moderno diseño con tapa a presión

### \*Colores a elección



### Especificaciones y capacidades

Capacidad		A1	A2	H (con tapa)
Referida	Total			
Litros		cm.	cm.	cm.
600	625	85	45	130
1.300	1.350	120	55	145
2.500	2.600	170	55	145
5.000	5.150	170	55	255

\* Capacidad Total: lleno hasta el borde



A1: Diámetro inferior
A2: Diámetro superior de la boca del tanque
H: Altura Total



Pregunte por nuestra nueva Línea Industrial

Contáctenos: (593) (04) 600 8523 - 600 8524

[www.colplast.com.ec](http://www.colplast.com.ec)

## Anexo 5. Válvulas de seguridad

### SAFETY RELIEF VALVE AV919

5 up to 500 mbar



Spring loaded, direct acting safety relief valve for venting excess pressure from receivers, pipelines and other equipment.

Every safety relief valve 100% tested.

#### Benefits

- individual opening pressure
- TÜV-certification of pressure setting
- available in anodised aluminium or stainless steel (ES)
- sealing material to suit gas or customer request
- compact size for easy, problem free installation
- adapter for connection to ventilation pipe
- free of oil and grease

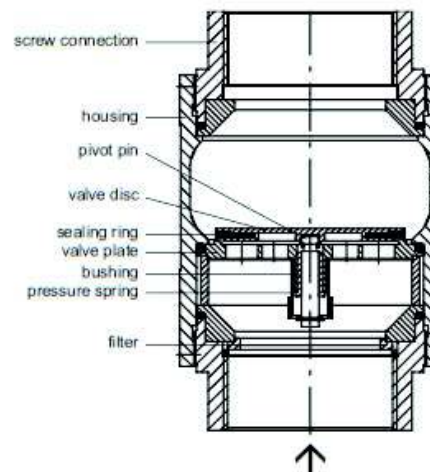
#### Approvals

Company certified according to ISO 9001 and PED 2014/68/EU Module H  
Cleaned for Oxygen Service according to:  
- EIGA IGC Doc 13/12/E: Oxygen Pipeline and Piping Systems

Other models, options and accessories available on request.

Please identify the individual gases, temperature and opening pressure at the time of enquiring!

	AV919 / AV919-ES
Opening pressure	from 0.005 up to < 0.5 bar
Gases	all technical gases
Material	housing anodised aluminium or stainless steel, metal turned parts made of stainless steel, pressure spring made of stainless steel, valve seal corresponding to the gas
Width across flats	70 mm
Weight	approx. 1500 g / approx. 3000 g (ES)
Connections	G 2 RH F 1.1/2", 2" NPT F flange DN40 according to DIN 28403
Marking	TÜV AV919 47,0*3.23 15.72 °CR* *PN16
Temperature range	-40 °C/-40 °F up to approx. +300 °C/+572 °F (in accordance to gas and valve sealing)



AV3 - F01/A8 subject to change

WITT-Gasetechnik GmbH & Co KG, Salinger Feld 4-8, D-58454 Witten, Tel. +49 (0)2302-8901-0, witt@wittgas.com



## SAFETY RELIEF VALVE AV919

### 5 up to 500 mbar

Flow capacity for air and closing pressure at 20 °C / 68 °F  
(valid only for atmospheric back pressure)

Standard reference conditions: 0 °C/32 °F / 1013.3 mbar


Flow capacity at  $p = 2 \times p_s$  [Nm<sup>3</sup>/h]

$p_s$  = Setting pressure

#### Connection G 2 / 2" NPT

$p_s$ Setting pressure [mbar]	5	15	30	40	60	80	100
Flow capacity [m <sup>3</sup> /h]	22,7	39	177	268	319	434	440
Closing pressure in % of $p_s$	66,5	76	79	83	87	86	88
$p_s$ Setting pressure [mbar]	140	200	250	300	400	450	500
Flow capacity [m <sup>3</sup> /h]	529	550	686	610	781	926	967
Closing pressure in % of $p_s$	88	89	89	90	90	88	90

other connections available on request

<p><b>Pressure safety Valve</b></p>	<p>When pressure exceeds 12 KPA pressure relief Automatically.</p>	
-------------------------------------	--	---

## Anexo 6. Filtro desulfurizador

<p><b>2L Desulfurizer</b></p>	<p>volume:2L            Inlet Diameter: 16mm            Outlet Diameter: 16mm            Material: PE            Advantages: good cleaning effect</p>		<p>N.W.: 2.0kg            G.W.: 2.3kg            170*190*400mm</p>
-------------------------------	---	--	--



## Anexo 7. Ficha técnica de NaOH

### HOJA DE SEGURIDAD II HIDROXIDO DE SODIO

**FORMULA:** NaOH.

**PESO MOLECULAR:** 40.01 g/mol

**COMPOSICION:** Na: 57.48 %, H: 2.52 %, y O:40.00%

**GENERALIDADES:**

El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza como disolución al 50 % por su facilidad de manejo. Es soluble en agua, desprendiéndose calor. Absorbe humedad y dióxido de carbono del aire y es corrosivo de metales y tejidos.

Es usado en síntesis, en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza, entre otros usos.

Se obtiene, principalmente por electrólisis de cloruro de sodio, por reacción de hidróxido de calcio y carbonato de sodio y al tratar sodio metálico con vapor de agua a bajas temperaturas.

**NUMEROS DE IDENTIFICACION:**

CAS: 1310-73-2

UN: sólido:1823

disolución: 1824

NIOSH: WB 4900000

NOAA: 9073

STCC: 4935235

RTECS: WB4900000

NFPA: Salud:3 Reactividad:1 Fuego: 0

HAZCHEM CODE: 2R

El producto está incluido en : CERCLA, EHS, SARA, RCRA,

MARCAJE: SOLIDO CORROSIVO.

**SINONIMOS:**

SOSA

SOSA CAUSTICA

LEJIA

Otros idiomas:

HYDROXYDE DE SODIUM (FRANCES)

NATRIUMHYDROXID (ALEMAN)

AETZNATRON (ALEMAN)

NATRIUMHYDROXYDE (HOLANDES)

SODIO(IDROSSIDO DI) (ITALIANO)

En inglés:

ASCARITE

CAUSTIC SODA

COLLO-GRILLREIN

COLLO-TAPETTA

LEWIS-RED DEVIL LYE

SODIUM HYDRATE

SODIUM HYDROXIDE

LYE

SODA LYE

WHITE CAUSTIC

**PROPIEDADES FISICAS Y TERMODINAMICAS:**

Punto de ebullición: 1388°C (a 760 mm de Hg)

Punto de fusión: 318.4 °C

Indice de refracción a 589.4 nm: 1.433 ( a 320 °) y 1.421 (a 420 °C)

Presión de vapor: 1mm (739 °C)

Densidad: 2.13 g/ml (25 °C)

Solubilidad: Soluble en agua, alcoholes y glicerol, insoluble en acetona (aunque reacciona con ella) y éter.

1 g se disuelve en 0.9 ml de agua, 0.3 ml de agua hirviendo, 7.2 ml de alcohol etílico y 4.2 ml de metanol.

pH de disoluciones acuosas (peso/peso): 0.05 %: 12; 0.5 %: 13 y 5 %: 14

En la tabla a continuación, se presentan algunas propiedades de disoluciones acuosas de NaOH.

PROPIEDADES DE DISOLUCIONES ACUOSAS DE NaOH

Concentración (% peso/peso)	$d_4^{15}$	Punto de congelación (°C)	Punto de Ebullición (°C)
5	1.056	-4	102
10	1.111	-10	105
20	1.222	-26	110
30	1.333	1	115

# Anexo 8. Hoja de manejo de seguridad de NaOH

## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD HIDROXIDO DE SODIO



Fecha Revisión: 21/03/2005

### SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

<b>Nombre del Producto:</b>	HIDROXIDO DE SODIO
<b>Sinónimos:</b>	Soda cáustica (anhídrica), Soda cáustica en escamas, Cáustico blanco, Lejía, Hidrato de sodio.
<b>Fórmula:</b>	NaOH
<b>Número Interno:</b>	
<b>Número UN:</b>	1823 Solido
<b>Clase UN:</b>	8
<b>Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad:</b>	Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.

Teléfonos de Emergencia:

### SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

Componente	CAS	COMPONENTES		
		TWA	STEL	%
Hidróxido de sodio	1310-73-2	N.R. (ACGIH 2004)	C 2 mg/m3 (ACGIH 2004)	99-100

**Uso:** Neutralización de ácidos, refinación del petróleo, producción de papel, celulosa, textiles, plásticos, explosivos, removedor de pinturas, limpiador de metales, electroplateado, limpiadores comerciales y domésticos, pelado de frutas y verduras en la industria de alimentos.

### SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

#### VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Peligro. Corrosivo. Higroscópico. Reacciona con agua ácidos y otros materiales. Causa quemaduras a piel y ojos. Puede ocasionar irritación severa de tracto respiratorio y digestivo con posibles quemaduras. En casos crónicos puede producir cáncer en el esófago y dermatitis por contacto prolongado con la piel.

#### EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

<b>Inhalación:</b>	Irritante severo. Los efectos por la inhalación del polvo o neblina varían desde una irritación moderada hasta serios daños del tracto respiratorio superior, dependiendo de la severidad de la exposición. Los síntomas pueden ser estornudos, dolor de garganta o goteo de la nariz. Puede ocurrir neumonía severa.
<b>Ingestión:</b>	Corrosivo. La ingestión puede causar quemaduras severas de la boca, garganta y estómago. Pueden ocurrir severas lesiones tisulares y muerte. Los síntomas pueden ser sangrado, vómitos, diarrea, caída de la presión sanguínea. Los daños pueden aparecer algunos días después de la exposición.
<b>Piel:</b>	Corrosivo. El contacto con la piel puede causar irritación o severas quemaduras y cicatrización en las exposiciones mayores.

HIDROXIDO DE SODIO

CISPROQUIM 1

<b>Ojos:</b>	Produce irritación con dolor, enrojecimiento y lagrimeo constante. En casos severos quemaduras de la córnea e incluso ceguera.
<b>Efectos crónicos:</b>	Contacto prolongado produce dermatitis, fisuras e inflamación de la piel. Puede causar cáncer al esófago.

#### SECCIÓN 4: PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS

<b>Inhalación:</b>	Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo.
<b>Ingestión:</b>	Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito. Buscar atención médica inmediatamente.
<b>Piel:</b>	Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.
<b>Ojos:</b>	Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Colocar una venda esterilizada. Buscar atención médica.
<b>Nota para los médicos:</b>	Después de proporcionar los primeros auxilios, es indispensable la comunicación directa con un médico especialista en toxicología, que brinde información para el manejo médico de la persona afectada, con base en su estado, los síntomas existentes y las características de la sustancia química con la cual se tuvo contacto.

#### SECCIÓN 5: MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

<b>Punto de inflamación (°C):</b>	N.A.
<b>Temperatura de autoignición (°C):</b>	N.A.
<b>Límites de inflamabilidad (%V/V):</b>	N.A.
<b>Peligros de incendio y/o explosión:</b>	No es combustible pero en contacto con agua puede generar suficiente calor para encender combustibles. El material caliente o fundido puede reaccionar violentamente con agua. El contacto con algunos metales genera hidrógeno el cual inflamable y explosivo. Durante un incendio se forman gases tóxicos y corrosivos.
<b>Medios de extinción:</b>	No usar medios de extinción halogenados ni chorro de agua a presión. Utilizar un agente adecuado al fuego circundante.
<b>Productos de la combustión:</b>	Óxido de Sodio.
<b>Precauciones para evitar incendio y/o explosión:</b>	Evitar el contacto con metales, combustibles y humedad. Mantener los contenedores cerrados. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de explosiones y resistentes a la corrosión.
<b>Instrucciones para combatir el fuego:</b>	Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar todos los materiales combustibles de la zona. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Refrigerar los contenedores con agua en forma de rocío. Si los contenedores están cerrados, retirarlos del área de peligro.

#### SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. No permitir que caiga en fuentes de agua y alcantarillas. Los residuos deben recogerse con medios mecánicos no metálicos y colocados en contenedores apropiados para su posterior disposición.

#### SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

<b>Manejo:</b>	Utilizar los elementos de protección personal así sea muy corta la exposición o la actividad que realizar con la sustancia; mantener estrictas normas de higiene. No fumar ni beber en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar.
----------------	---

**Almacenamiento:** Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. En recipientes no metálicos, preferiblemente a nivel del piso. Señalizar adecuadamente. Rotular los recipientes adecuadamente.

## SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

**Controles de Ingeniería:** Ventilación local para mantener la concentración por debajo de los límites de salud ocupacional. Debe disponerse de duchas y estaciones lavajojos.

### EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

**Protección de los ojos y rostro:** Gafas de seguridad con protector lateral.

**Protección de piel:** Careta, guantes, overol de PVC y botas de caucho.

**Protección respiratoria:** Respirador con filtro.

**Protección en caso de emergencia:** Equipo de respiración autocontenido (S.C.B.A) y ropa de protección TOTAL resistente a la corrosión.

## SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

**Apariencia, olor y estado físico:** Sólido blanco inodoro en forma de escamas.

**Gravedad específica (Agua=1):** 2.13 / 25°C

**Punto de ebullición (°C):** 1390

**Punto de fusión (°C):** 316

**Densidad relativa del vapor (Aire=1):** N.R.

**Presión de vapor (mm Hg):** 42.0 / 999°C

**Viscosidad (cp):** 4 a 350 °C.

**pH:** 14 (solución 5%)

**Solubilidad:** Soluble en agua, alcohol y glicerol.

## SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

**Estabilidad química:** Estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación. No se polimeriza. Es sensible a la humedad o exposición excesiva al aire.

**Condiciones a evitar:** Calor, llamas, humedad e incompatibles.

**Incompatibilidad con otros materiales:** El contacto con ácidos y compuestos halogenados orgánicos, especialmente tricloroetileno, puede causar reacciones violentas. El contacto con nitrometano u otros compuestos nitro similares produce sales sensibles al impacto. El contacto con metales tales como aluminio, magnesio, estaño o cinc puede liberar gas hidrógeno (Inflamable). Reacciona rápidamente con varios azúcares para producir monóxido de carbono. Reacciona con materiales inflamables.

**Productos de descomposición peligrosos:** Cuando este material se calienta hasta la descomposición puede liberar óxido de sodio.

**Pollimerización peligrosa:** No ocurrirá.

## SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Quemaduras severas por ingestión y contacto. Puede provocar desprendimiento del epitelio conjuntival y corneal.

LDLo oral conejo= 0.5 g/kg (en solución al 10%).

Irritación de los ojos y la piel: el hidróxido de sodio ha sido extensivamente estudiado en animales porque este tiene la habilidad de causar severos daños a la piel y a los ojos.

Los factores que determinan la extensión y reversibilidad de el daño incluye el estado físico, la concentración, la cantidad involucrada y la duración del contacto. Los efectos pueden variar de una irritación mediana a severa corrosión con destrucción del tejido, incluyendo la ceguera y la muerte.

Toxicidad inhalación: Exposición de ratas a aerosoles formados a partir del hidróxido de sodio en solución (5 a 40%) resulta en irritación significativa del tracto respiratorio.

Es considerado como no carcinógeno por ACGIH, NIOSH, NTP, OSHA e IARC.

No existe información disponible relacionada con efectos de tipo teratogénico, mutagénico o neurotóxico.

## SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Peligroso para la vida acuática aún en bajas concentraciones. Mortal para peces a partir de 20 mg/L. Toxicidad peces: LC10 = 25 ppm/24H/Trucha de arroyo/Agua fresca. DBO= ninguno. No biodegradable.

### **SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN**

Debe tenerse presente la legislación ambiental local vigente relacionada con la disposición de residuos para su adecuada eliminación.

Los residuos de este material pueden ser llevados a un relleno sanitario legalmente autorizado para residuos químicos, previa neutralización.

### **SECCIÓN 14: INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE**

Etiqueta blanca-negra de sustancia corrosiva. No transportar con sustancias explosivas, sustancias que en contacto con agua puedan desprender gases inflamables, sustancias comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, sustancias incompatibles ni alimentos.

### **SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA**

1. Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional.

2. Decreto 1609 del 31 de Julio de 2002, Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.

3. Ministerio de Transporte. Resolución número 3500 del 11 de diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga.

4. Los residuos de esta sustancia están considerados en: Ministerio de Salud. Resolución 2309 de 1988, por la cual se hace necesario dictar normas especiales complementarias para la cumplida ejecución de las leyes que regulan los residuos sólidos y concretamente lo referente a residuos especiales.

### **SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES**

La información relacionada con este producto puede no ser válida si este es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

#### **Bibliografía**

## Anexo 9. Características de rellenos para torres

Tipo	Material	Tamaño nominal, pulg	Densidad global?, lb/pie <sup>3</sup>	Área total†, pie <sup>2</sup> /pie <sup>3</sup>	Porosidad, ε	Factores de relleno‡		
						F <sub>p</sub>	f <sub>p</sub>	
Monturas	<b>Berl</b>	Cerámica	½	54	142	462	240	§1,58
			1	45	76	0,68	110	§1,36
			1½	40	46	0,71	65	§1,07
Monturas	<b>Intalox</b>	Cerámica	½	46	190	0,71	200	2,27
			1	42	78	0,73	92	1,54
			1½	39	59	0,76	52	1,18
			2	38	36	0,76	40	1,0
			3	36	28	0,79	22	0,64
Anillos	Raschig	Cerámica	4	55	112	0,64	580	§1,52
			1	42	58	0,74	1,55	§1,36
			1½	43	37	0,73	95	§1,0
			2	41	28	0,74	65	§0,92
Anillos	<b>Paill</b>	Acero	1	30	63	0,94	48	1,54
			1½	24	39	0,95	28	1,36
			2	22	31	0,96	20	1,09
		Polipropileno	1	5,5	63	0,90	52	1,36
			1½	4,8	39	0,91	40	1,18

† La densidad global y el área total están referidas a la unidad de volumen de la columna.

‡ El factor F<sub>p</sub> es un factor de caída de presión, y el factor f<sub>p</sub> es un coeficiente relativo de transferencia de materia.

§ Basados en datos NH<sub>3</sub>—H<sub>2</sub>O; los demás factores basados en datos CO<sub>2</sub>—NaOH.



## Anexo 10. Altura de la unidad de transferencia HL.

Empaque	$\phi \times 10^4$	$\eta$	Intervalo de L/A
<b>Anillos Raschig</b>			
3/8"	3.21	0.46	2000-75000
1/2"	7.18	0.35	2000-75000
1"	23.5	0.22	2000-75000
1.5"	26.1	0.22	2000-75000
2"	29.3	0.22	2000-75000
<b>Sillas Berl</b>			
1/2"	14.55	0.28	2000-75000
1"	12.85	0.28	2000-75000
1.5"	13.65	0.28	2000-75000
<b>Anillos en espiral</b>			
Espiral sencilla de 3"	19.85	0.28	2000-75000
Espiral triple de 3"	23.35	0.28	2000-75000

Ecuación de Sherwood y Halliday

$$HL = \phi \left( \frac{L}{\mu_L} \right)^\eta Sc^{0.5}$$

$$\frac{L}{A} = \text{velocidad másica del líquido } \frac{kg}{h m^2}$$

$$\mu_L = \text{viscosidad del líquido } \frac{kg}{h m}$$

$Sc = \text{Número de Schmidt para el líquido}$

## Anexo 11. Bomba sumergible



-Características:

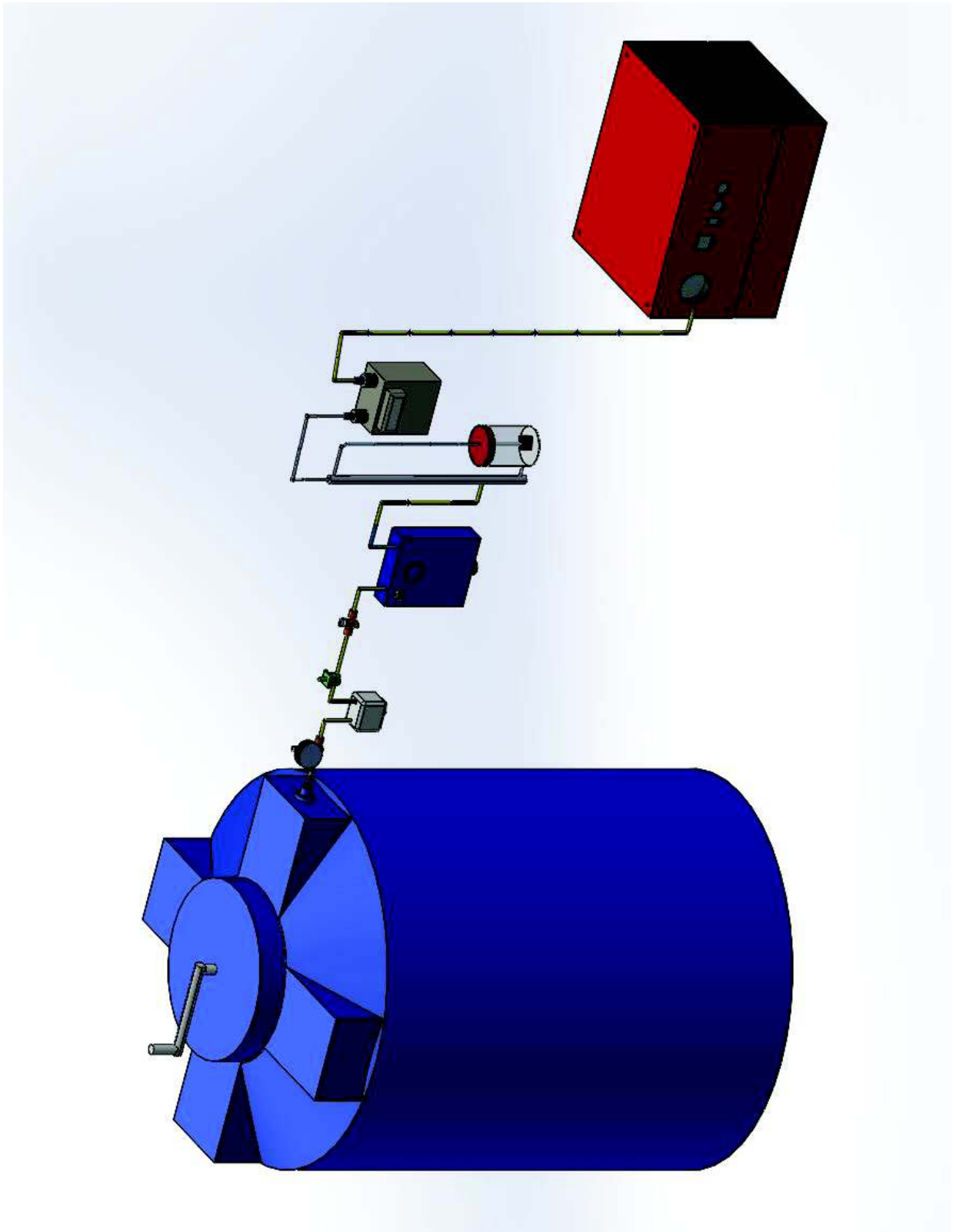
- Caudal: 240 litros/h
- Diámetro de entrada y salida: 5mm
- Dimensiones máximas: 40x35x28 mm (LxWxH)
- Voltaje: 12VCD
- Corriente: <100 mA

## Anexo 12. Perdidas en accesorios

Coefficientes de pérdida para componentes de tubería  $\left(h_L = K_L \frac{V^2}{2g}\right)$

Component	$K_L$		
<b>a. TUBOS ACODADOS</b>			
Regular de 90°, embridado	0.3		
Regular de 90°, roscado	1.5		
De 90° con gran radio, embridado	0.2		
De 90° con gran radio, roscado	0.7		
De 45° con gran radio, embridado	0.2		
Regular de 45°, roscado	0.4		
<b>b. CODOS DE 180°</b>			
Codo de 180°, embridado	0.2		
Codo de 180°, roscado	1.5		
<b>c. CONEXIONES EN T</b>			
Flujo de línea, embridado	0.2		
Flujo de línea, roscado	0.9		
Flujo derivado, embridado	1.0		
Flujo derivado, roscado	2.0		
<b>d. UNION ROSCADA</b>			
	0.08		
<b>e. VALVULAS</b>			
De globo, completamente abierta	18		
De ángulo, completamente abierta	2		
De compuerta, completamente abierta	0,15		
De compuerta, 1/4 cerrada	0,26		
De compuerta, 1/2 cerrada	2,1		
De compuerta, 3/4 cerrada	17		
De retención a bisagra, flujo hacia adelante	2		
De retención a bisagra, flujo hacia atrás	infinito		
De bola, completamene abierta	0,05		
De bola, 1/3 cerrada	5,5		
De bola, 2/3 cerrada	2,15		

### Anexo 13. Ensamble del sistema de generación de energía eléctrica



**Anexo 14. Carga de estiércol de ganado vacuno en biodigestor**



## Anexo 15. Informe de ensayo de composición de biogás



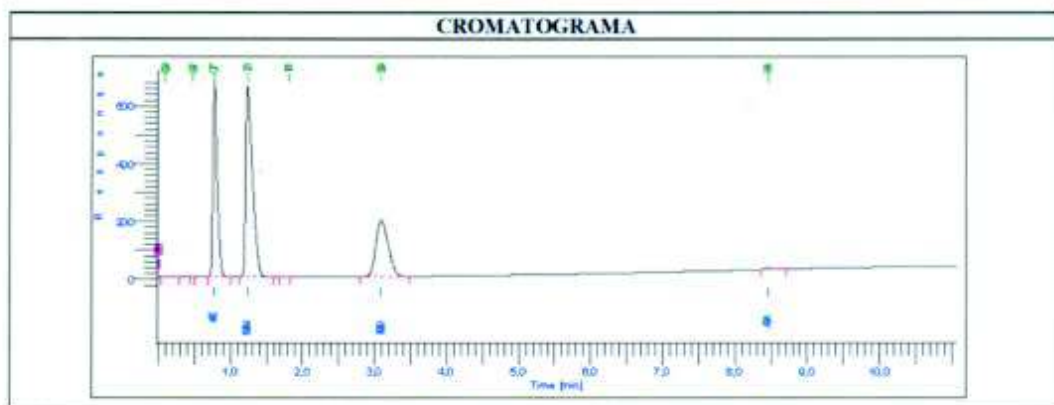
**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL**

**REPORTE DE ANÁLISIS LAI-018-019**  
**OT. 5862**

PARÁMETROS DE LA MUESTRA			
Cliente	Esteban Cusi		
Muestra	Muestra de biogas		
Fecha de recepción de la muestra	08/05/2018	Fecha de entrega del informe	10/05/2018
Observaciones	El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución		

CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura (°C)	20	Norma de referencia	ASTM D 1945-03 (2010)

RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Peso	% Moles
	Nitrógeno		1.32	1.23
	Oxígeno		4.32	3.51
	Metano		37.77	61.32
	CO <sub>2</sub>		56.05	33.17
	Agua		0.54	0.78
	H <sub>2</sub> S		<0.001	<0.001
	Total		100.00	100.00
PROPIEDADES	Densidad relativa		0.90	
	Peso molecular promedio [g/mol]		26.04	
	Poder calorífico superior [Btu/pie <sup>3</sup> ] <sub>CS</sub>		599.57	
	Poder calorífico inferior [Btu/pie <sup>3</sup> ] <sub>CS</sub>		540.29	



<i>Lucía Montenegro</i>	<i>Gabriela Pérez</i>
Ing. Lucía Montenegro	Ing. Gabriela Pérez
Jefe de Laboratorio de Análisis Instrumental	Especialista en técnicas de Análisis Químico

## Anexo 16. Detalle de costos de materiales, equipos y ensayos

Cantidad	Componente	Costo Unitario	Costo Total
1	Tanque industrial de PE, capacidad 1300 L	165	\$ 165,00
1	Desulfurizador, capacidad 2 L	60	\$ 60,00
1	Recipiente de drenaje de agua, capacidad 1 L	3	\$ 3,00
1	Válvula de seguridad	15	\$ 15,00
3	Te 1/2 plg	0,59	\$ 1,77
1	Te 3/8 plg	0,5	\$ 0,50
1	Medidor de flujo, rango 0,025 m <sup>3</sup> /h - 4 m <sup>3</sup> /h	80	\$ 80,00
1	Generador eléctrico Potencia 2 kW	550	\$ 550,00
2	Manómetro de presión 0 a 140 psi	15	\$ 30,00
15	Abrazaderas	0,3	\$ 4,50
1	Anillos rasching, Caja	5	\$ 5,00
1	Tubo de PVC 1 plg	2	\$ 2,00
2	Bolsa de almacenamiento de biogas	8	\$ 16,00
3	Válvulas de paso 1/2 "	3	\$ 9,00
4	Unión 1/2 "	0,45	\$ 1,80
6	Neplo de 1/2"	0,8	\$ 4,80
4	Tubería reforzada para conducción de gas 3/8 plg	0,75	\$ 3,00
2	Tubería de polietileno conducción de fluido y nivel de sustrato 3/8 plg	0,5	\$ 1,00
7	Acople de manguera de 3/8 plg	1,5	\$ 10,50
2	Teflón	1,5	\$ 3,00
1	Recipiente para preparación de solución	1	\$ 1,00
1	Sello Rojo	3	\$ 3,00
5	Busing	2	\$ 10,00
1	Batería bomba de solución	6	\$ 6,00
1	Bomba de agua	20	\$ 20,00
		TOTAL	\$ 1.005,87

Cantidad	Ensayo	Costo Total
1	Caracterización de materia prima	\$ 23,21
1	Ensayo de cromatografía de gases	\$ 134,34
TOTAL		\$ 157,55

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
1	Limpieza, instalación de cubierta	20	\$ 20,00
16	Puntales	1,5	\$ 24,00
30	Plástico de polietileno transparente	1,2	\$ 36,00
1	Clavos de 2 plg (1 Libra)	0,8	\$ 0,80
	<b>TOTAL</b>		<b>\$ 80,80</b>