

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN DE BIOMASA EN
ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN LA AVÍCOLA MEGAVES CIA. LTDA.**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Juan Gabriel Lara Puerres

Director:

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

Ibarra-Ecuador

2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100404024-0		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Lara Puerres Juan Gabriel		
DIRECCIÓN:	Barrio 19 de enero		
EMAIL:	ingelectrica2019@hotmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0981822255

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN LA AVÍCOLA MEGAVES CIA. LTDA
AUTOR (ES):	Lara Puerres Juan Gabriel
FECHA: DD/MM/AAAA	28/06/2019
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Gerardo Collaguazo

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de Junio de 2019

EL AUTOR: 
(Firma).....
Nombre: Juan Gabriel Lara Puerres



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Lara Puerres Juan Gabriel, con cedula de identidad No. 100404024-0, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de propiedad intelectual del Ecuador, articulo 4, 5 y 6 en calidad de autor del trabajo de grado denominado: **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN LA AVÍCOLA MEGAVES CIA. LTDA”**. Que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes mencionada, aclarando que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y que no ha sido previamente presentando para ningún grado o calificación profesional. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

.....
Firma

Nombre: Juan Gabriel Lara Puerres
C.I. 100404024-0
Ibarra, junio del 2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN

PhD. Gerardo Collaguazo

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Lara Puerres Juan Gabriel certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN LA AVÍCOLA MEGAVES CIA. LTDA”** para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

PhD. Gerardo Collaguazo
DIRECTOR DE TESIS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN

MSc. Ramiro Flores

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Lara Puerres Juan Gabriel certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN LA AVÍCOLA MEGAVES CIA. LTDA"** para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

.....
MSc. Ramiro Flores
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN

MSc. Eliana Ormeño

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Lara Puerres Juan Gabriel certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN LA AVÍCOLA MEGAVES CIA. LTDA"** para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.

.....
MSc. Eliana Ormeño
ASESORA DE TESIS

Dedicatoria

Esta meta cumplida es una pequeña forma de recompensar todo el sacrificio realizado por mis padres que siempre me brindaron lo mejor y me apoyaron incondicionalmente para verme formado como profesional. Por todo esto esta tesis se las dedico con todo el amor y cariño a mis padres Gustavo y Narciza.

La voluntad de ganar, el deseo de triunfar, la urgencia de alcanzar tu potencial. Esas son las claves que abrirán la puerta a tu excelencia personal.

Eddie Robinson

Agradecimiento

En primer lugar, le agradezco a Dios por cada día de vida que me brinda, por haberme acompañado y guiado durante toda mi carrera y bendecirme con el amor incondicional de mis padres. En especial le doy gracias a Dios por haberme brindado una segunda oportunidad y permitirme seguir compartiendo momentos de alegría a lado de mis seres queridos y lograr alcanzar una de mis metas.

En segundo lugar, le doy gracias a mis padre por depositar su confianza en mí y haberme brindado la oportunidad de formarme profesionalmente, por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos de mi vida. Les agradezco por haberme formado con buenos valores enseñándome el camino correcto a seguir y enseñarme que nunca hay que darse por vencido a pesar de las adversidades.

Además, agradezco a mis hermanos y mi tía Nelly por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo incondicional y ayudándome a superar las adversidades presentadas durante este largo camino.

Finalmente agradezco a mi tutor el Ing. Gerardo Collaguazo por haberme guiado durante el desarrollo del trabajo de titulación.

Tabla de contenidos

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
CONSTANCIAS.....	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	III
Dedicatoria.....	VII
Agradecimiento.....	VIII
Tabla de contenidos.....	IX
Índice de figuras.....	XIII
Índice de cuadros.....	XIV
Resumen.....	XV
Abstract.....	XV
Introducción.....	XVI
A.1. Contextualización.....	XVI
A.2. Planteamiento del problema.....	XVII
A.3. Formulación del problema.....	XVIII
A.4. Justificación del trabajo.....	XVIII
A.5. Alcance del trabajo.....	XIX
A.6. Viabilidad del trabajo.....	XIX
A.7. Objetivo general.....	XX
A.8. Objetivos específicos.....	XX
CAPITULO 1.....	1
Proceso de producción y utilización del biogás.....	1
1.1. Biomasa.....	1
1.1.1. Tipos de biomasa.....	2
1.2. Biomasa e industria avícola.....	4
1.2.1. Descripción de la industria avícola.....	4
1.2.2. Aspectos ambientales.....	6

1.3.	Producción de biogás	7
1.3.1.	Proceso de producción de biogás	8
1.3.2.	Parámetros que influyen en la producción de biogás	11
1.3.3.	Inhibidores de la digestión anaerobia	13
1.3.4.	Digestores anaerobios	15
1.3.5.	Estructura de los biodigestores	16
1.4.	Generación de electricidad mediante biogás	17
1.4.1.	Motores de combustión interna alternativos	19
1.4.1.1.	Elementos principales de los motores alternativos.....	20
1.4.1.2.	Motor de cuatro tiempos / cuatro carreras.....	21
CAPITULO 2.....		23
Potencial de biogás en la avícola Megaves Cía.Ltda.....		23
2.1.	Descripción de la avícola	23
2.2.	Producción de pollinaza.....	24
2.3.	Análisis proximal y elemental de pollinaza	26
2.5.	Producción de biogás en digestor	29
CAPITULO 3.....		32
Factibilidad técnica-económica.....		32
3.1.	Sustrato	32
3.2.	Producción de biogás	33
3.2.1.	Digestor.....	34
3.2.1.1.	Disponibilidad de biomasa	34
3.2.1.2.	Grado de dilución.....	35
3.2.1.3.	Temperatura del proceso.....	36
3.2.1.4.	Carga orgánica volumétrica (COV)	37
3.2.1.5.	Volumen del digestor	37
3.2.2.	Tanque y sistema de alimentación	38
3.2.3.	Tanque de descarga	39
3.2.5.	Sistema de agitación	41

3.2.6.	Tuberías de captación y conducción de biogás	43
3.2.7.	Tanques de almacenamiento de biogás	44
3.3.	Generación de energía eléctrica y térmica	45
3.3.1.	Purificación del biogás	45
3.3.1.1.	Remoción de dióxido de carbono (CO ₂)	45
3.3.1.2.	Remoción de agua (H ₂ O)	46
3.3.1.3.	Remoción de sulfuro de hidrogeno / ácido sulfhídrico (H ₂ S).....	46
3.3.2.	Tren de calibración.....	47
3.3.3.	Aprovechamiento energético del biogás.....	48
3.3.4.	Selección grupo electrógeno	51
3.3.5.	Antorcha.....	53
3.3.6.	Localización de la planta	53
3.3.7.	Acoplamiento de la planta a la red eléctrica de la granja´	53
3.3.8.	Demanda de energía eléctrica.....	56
3.4.	Análisis ambiental	57
3.5.	Análisis económico	60
3.5.1.	Presupuesto estimado de la construcción de la planta	60
3.5.2.	Presupuesto rediseño red eléctrica	62
3.5.3.	Viabilidad económica	63
3.5.3.1.	Resumen de egresos.....	63
3.5.3.2.	Resumen de ingresos.....	64
	Conclusiones.....	67
	Recomendaciones.....	68
	Bibliografía	69
	ANEXOS.....	76
	Anexo A: Calculo de producción de pollinaza	76
	Anexo B: Análisis de pollinaza.....	78
	Anexo C: Diagrama caudal-presión	80
	Anexo D: Ubicación de la planta de cogeneración.....	81

Anexo E: Rediseño red eléctrica.....	82
Anexo F: Diagrama de conexión del tablero de transferencia.....	83

Índice de figuras

Fig.1. Generación de biomasa	1
Fig.2. Tipos de biomasa.....	2
Fig.3. Crecimiento del comercio de carne de pollo.....	5
Fig.4. Esquemático del proceso de digestión anaerobia	8
Fig.5. Diagrama de flujo de un sistema de digester anaeróbico	10
Fig.6. Influencia de la temperatura en la digestión anaerobia.....	12
Fig.7. Estructura de un biodigestor.....	17
Fig.8. Usos del biogás.....	18
Fig.9. Elementos principales de los motores de combustión interna alternativos	20
Fig.10. Proceso de funcionamiento del motor de cuatro tiempos	21
Fig.11. Ubicación de la granja Moquetes	23
Fig.12. Biodigestor experimental.....	29
Fig.13. pH del sustrato	30
Fig.14. Etapas generación de energía eléctrica y térmica	32
Fig.15. Planta de producción de biogás	33
Fig.16. Flujograma para dimensionamiento de biodigestores.....	34
Fig.17. Implantación planta biogás.....	38
Fig.18. Esquema topográfico para la construcción del biodigestor	39
Fig.19. Esquema de alimentación y descarga	39
Fig.20. Tuberías de alimentación y descarga (Corte A-A)	40
Fig.21. Descarga de lodos	40
Fig.22. Velocidad del agitador a diferentes potencias y diámetro del impulsor.....	42
Fig.23. Sistema de agitación (Corte B-B)	43
Fig.24. Captación y conducción del biogás	44
Fig.25. Proceso de cogeneración.....	45
Fig.26. Elementos tren de calibración de biogás	47
Fig.27. Sopladores ATEX.....	48
Fig.28. Balance energético CHP.	49
Fig.29 Ciclos de producción de biogás en el año.	51
Fig.30. Diagrama de conexión del transformador.....	54
Fig.31. Grupo electrógeno AQL con tablero de transferencia.....	55
Fig.32. Módulo de control DSE 7320.....	56
Fig.33. Demanda energética granja Moquetes.....	57
Fig.34. Plazo de recuperación de la inversión.....	65

Índice de cuadros

TABLA 1.1. FUENTES DE ORIGEN DE LA BIOMASA	3
TABLA 1.2. PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN EXPLOTACIONES GANADERAS	4
TABLA 1.3. EFECTO DE LOS NIVELES DE AMONIACO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	14
TABLA 1.4. CONCENTRACIONES INHIBIDORAS.....	15
TABLA 1.5. CARACTERÍSTICAS DE DIGESTORES ANAEROBIOS.....	16
TABLA 1.6. TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE BIOGÁS.....	19
TABLA 2.1. PRODUCCIÓN DE POLLINAZA EN LA GRANJA MOQUETES	26
TABLA 2.2. ANÁLISIS ELEMENTAL DE POLLINAZA	26
TABLA 2.3. ANÁLISIS PROXIMAL DE POLLINAZA	26
TABLA 2.4. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS.....	28
TABLA 2.5. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	29
TABLA 2.6. CONTENIDO DE METANO	31
TABLA 3.1. PARÁMETROS DISEÑO BIODIGESTOR.....	37
TABLA 3.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAS	41
TABLA 3.3. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA	50
TABLA 3.4. CARACTERÍSTICAS CHP AQL99.....	52
TABLA 3.5. CONSUMO ENERGÍA MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	52
TABLA 3.6. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL GENERADOR	53
TABLA 3.7. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE LA PLANTA	56
TABLA 3.8. COMPOSICIÓN GASES DE ESCAPE.....	59
TABLA 3.9. COSTO BIODIGESTOR	61
TABLA 3.10. COSTO TANQUE DE ALIMENTACIÓN	61
TABLA 3.11. COSTO TANQUE DE DESCARGA.....	61
TABLA 3.12. COSTO LECHO DE SECADO DE LODOS.....	62
TABLA 3.13. PRESUPUESTO DE LA PLANTA	62
TABLA 3.14. PRESUPUESTO REDISEÑO RED ELÉCTRICA	63
TABLA 3.15. COSTOS DE DEPRECIACIÓN	63
TABLA 3.16. COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	64
TABLA 3.17. INGRESOS ANUALES	64

Resumen

La pollinaza es un fuente de biomasa con un alto poder energético, sin embargo, el tratamiento inadecuado conduce a la emisión de contaminantes a la atmosfera. Por tal motivo durante esta investigación se ha analizado la factibilidad técnica y económica que conlleva la implementación de una planta para la generación de energía eléctrica y térmica a partir de los residuos avícolas. La determinación de producción de biogás se lo realizó a través de modelos teóricos obteniéndose una producción de biogás de 52,18 m³/h con un contenido de metano del 72,09%. Mediante la producción de pollinaza y de biogás se dimensionó la planta de cogeneración obteniéndose una capacidad de generación de energía eléctrica y térmica de 62 kW y 80,88 kW respectivamente. Además, se realizó el análisis económico que implica la implementación de la planta y la reducción de emisiones a la atmósfera. Mediante el estudio se determinó que la planta se encuentra en la capacidad de abastecer el consumo interno y disponer de un excedente para su venta, por la parte económica se estableció que la inversión inicial es de \$316.669,85 y el tiempo de recuperación es de 5,47 años, además es importante mencionar que la aplicación anaerobia reduce un 84,3% las emisiones de dióxido de carbono con lo que se concluye que es un proyecto técnica, ambiental y económicamente viable.

Palabras claves: Digestión anaerobia, pollinaza, biogás, grupo electrógeno.

Abstract

Poultry litter as a biomass source has high energetic potential; however its inadequate treatment leads to the pollutants emission into the atmosphere. In this research the technical and economic feasibility regarding the implementation of a plant for the generation of electrical and thermal energy from the processing of poultry litter has been analyzed. The biogas production was achieved through theoretical models reaching a production of 52.18 m³/h with a methane content of 72.09%. Through the poultry litter and biogas production the cogeneration plant (CHP) is dimensioned with a generation capacity of electrical and thermal energy of 62 kW and 80.88 kW specifically. The economic analysis regarding the plant implementation and emissions reduction the atmosphere was carried out. It was also concluded that the plant is in the capacity to supply the domestic consumption and have an excess for sale, it was determined an initial investment of \$316,669.85 with a recovery time of 5.47 years. Finally, anaerobic digestion application reduces carbon dioxide emissions by 84.3%, resulting in a project which is technically, environmentally and economically viable.

Key words: anaerobic digestion, poultry litter, biogas, genset.

Introducción

A.1. Contextualización

Actualmente, la electricidad es muy demandada debido a su gran uso. Figueroa (2014) menciona que la energía es esencial en el desarrollo de las actividades cotidianas y, al mismo tiempo, un motor para el crecimiento, progreso económico y avances sociales de un país (Cáceres, 2015) . El elevado consumo de combustibles fósiles (81,7 % de la producción mundial (International Energy Agency, 2017)) y los efectos negativos que producen al planeta (calentamiento global, contaminación, agotamiento de recursos), como también las políticas ambientales internacionales, regionales y nacionales (protocolo de Kyoto, directivas europeas, Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos [PNGRS]) han hecho que se dirijan esfuerzos investigativos a la búsqueda de nuevas formas de energía, como las energías renovables para la generación de energía eléctrica y térmica (Arévalo, 2015; Trinić, Stojiljković, Jovović, & Jankeš, 2016).

Como menciona Chorkulak (2016), “Las renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, aunque habría que decir que, para fuentes como la biomasa, esto es así siempre que se respeten los ciclos naturales”. La biomasa es cualquier tipo de materia orgánica de origen biológico (J. Fernández et al., 2015). Es una energía renovable que puede usarse para producir calor, electricidad, combustibles para el transporte y productos (Energy Efficiency and Renewable Energy, s.f.; Trinić et al., 2016), sin embargo, a pesar de que ha convivido a diario con la humanidad no se le ha dado la importancia que se merece por lo cual la idea de extraer esta energía de forma eficiente se ha convertido en un nicho de estudio y experimentación muy prometedor como solución al problema energético mundial (Arévalo, 2015).

Según el último estudio realizado por la Renewable Energy Policy Network a nivel mundial únicamente se aprovecha el 12,8% de biomasa del cual solo el 0,4 % se emplea para generar electricidad mientras que el porcentaje restante se lo emplea para el transporte y calefacción (industrial, tradicional y moderna de edificios) (Renewable Energy Policy Network, 2018). En el Ecuador el recurso más empleado para la generación eléctrica es el hidráulico cubriendo el 58,54%, mientras que la biomasa apenas cubre el 1,74% de la demanda Nacional (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2019).

La biomasa tiene un gran potencial para impulsar el suministro de energía en las naciones populosas con una demanda creciente, como Brasil, India y China (International Renewable Energy Agency, s.f.) En Suecia la biomasa es una fuente de energía muy importante, la mitad

del consumo total de biomasa se lo utiliza para la generación de electricidad y calor (Ericsson & Werner, 2016).

Una de las materias biológicas que se encuentran dentro de las fuentes de biomasa son los residuos de la industria avícola que según G. Fernández (2015), es una mezcla de excrementos, material de cama, restos de alimentos, aves muertas, plumas, entre otras. Estas generan un impacto negativo en el ambiente contribuyendo a la contaminación de suelo, agua y aire (Riera et al., 2014). El amoníaco (NH₃) y gases de efecto invernadero (metano [CH₄] y dióxido de carbono[CO₂]) son los principales contaminantes (Böjti et al., 2017).

Un estudio realizado en el Valle de Cauca- Colombia (3er lugar en producción de pollos de engorde, aproximadamente 10 millones) determinó que por hora se está desaprovechando 36.735 m³ de biogás que representa 45,91 MWh de electricidad los cuales se pueden aprovechar sin realizar mucha inversión (Aguilar, 2017).

En Ecuador según los datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, la producción de pollos de engorde en el 2017 fue de 140'395.312 aves (aproximadamente 350.000 toneladas) (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2017). El pollo de engorde produce entre 0,1 a 0,5 kg heces/día (Chorkulak, 2016; Montenegro, Rojas, Cabeza, & Hernández, 2016; Reyes, 2018) y un potencial de biogás de 0,014 m³/día/pollo (Chorkulak, 2016).

La digestión anaeróbica es un proceso en el que la materia orgánica es descompuesta en biogás y digestato por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno (Cerdá, 2012; M. González, Pérez, Wong, Bello, & Yañe, 2015) reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes orgánicos, patógenos, malos olores (Parra, 2015; Ulusoy, Ulukardesler, Arslan, & Tekin, 2017), contribuyendo a reducir el volumen y los costos de eliminación de desechos (Saravanan, Suganthi, & Chinnaiyan, 2014).

Como lo menciona Paterlini, González, & Picone (2017), "La cama de pollo se caracteriza por tener un contenido de humedad de 42,70%, óptimo para favorecer el proceso de compostaje, un pH levemente alcalino, y valores altos de NO₃⁻ (máximo 5,45 g N Kg⁻¹), de P extraíble (máximo 3,32 g P Kg⁻¹) y de CE (8,35 dS m⁻¹)".

A.2. Planteamiento del problema

La industria avícola es la mayor generadora de excreta de gallina, la cual es una fuente de biomasa con un alto poder energético (Aguilar, 2017), sin embargo, en el país los residuos avícolas son tratados de manera inadecuada desaprovechando el potencial energético que presenta.

La industria avícola es la responsable del 4% del total de emisiones de GEI, sea directamente o indirectamente a través de su cadena de suministro (Kleyn 2015). El proceso productivo avícola afecta el medio ambiente generando inconvenientes con la autoridad ambiental y personas de predios aledaños (Morocho, 2014). Uno de los principales problemas ambientales generados por esta actividad es la emisión de material particulado y gases nocivos, como el amoníaco, el metano y el óxido nitroso siendo el amoníaco uno de los más perjudiciales y más abundante, que a su vez es el precursor de malos olores (Rueda, 2016).

En la granja Moquetes, aproximadamente el 30% de pollinaza es usada como abono orgánico en los pastos aledaños a los galpones el cual al ser aplicado directamente al suelo produce malos olores, emite gases de efecto invernadero y contamina suelos y aguas, mientras que el 70% restante es vendido para los mismos fines, desaprovechando de esta manera las características energéticas que presentan los residuos.

A.3. Formulación del problema

¿Cuál es el nivel de factibilidad técnica y económica que presenta la conversión de la biomasa a energía eléctrica y térmica en una avícola?

A.4. Justificación del trabajo

La generación de electricidad mediante fuentes renovables que contribuyan a reducir la contaminación ambiental se ha convertido en un tema de interés a nivel Nacional. El artículo 413 de La Constitución de la República del Ecuador dispone que el Estado promoverá el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientales limpias y sanas, así como de energías renovables diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua (Constitución de la República del Ecuador 2008)

La generación de electricidad a partir de biomasa está en capacidad de proveer energía de forma sostenible y con emisiones netas de gases de efecto invernadero cercanas a cero (Arenas, 2009). En las granjas avícolas se dispone de grandes cantidades de biomasa formada por los residuos de las aves, sin embargo, a pesar de ser una fuente potencial para generación de biogás, el tratamiento inadecuado de los desechos genera graves problemas ambientales.

El literal 4.1.1.4 del Libro VI, Anexo 2 del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio dispone que los desechos provenientes de granjas avícolas deberán recibir tratamiento técnico adecuado a fin de evitar la disposición directa sobre el

suelo y evitar de esta forma la contaminación por microorganismos y cambio en sus características naturales (TULAS, 2003).

En base a los puntos establecidos anteriormente, se ha visto necesario desarrollar el estudio de conversión de la pollinaza a energía eléctrica y térmica mediante digestión anaeróbica que se caracteriza por descomponer o degradar la materia en ausencia de oxígeno a biogás y digestato (Reyes, 2018), con lo cual se daría un tratamiento más adecuado a los residuos resolviendo diversas problemáticas de índole energético, ambiental, económico y tecnológico (Aguilar, 2017).

El estudio por realizarse tiene como principal beneficiario a los propietarios de la avícola, ya que de esta manera tendrán conocimiento de que mediante los residuos producidos en la crianza de aves se puede obtener biogás para producir energía eléctrica para cubrir el consumo interno de los galpones, energía térmica para emplearse en los sistemas de calefacción y abono estabilizado para usarse en los pastos, reduciendo de esta manera la emisión de gases al medio ambiente.

A.5. Alcance del trabajo

El estudio se lo realizará en los galpones Moquetes Bajo, Moquetes Alto, San Antonio Bajo y San Antonio Alto ubicados en la Granja Moquetes perteneciente a la empresa MEGAVES CIA. LTDA ubicada en la parroquia Ascázubi cantón Cayambe.

La investigación por realizarse constará de dos partes: el estudio técnico y estudio económico.

El estudio técnico consistirá en determinar el potencial de biogás de los desechos avícolas (pollinaza) para la producción de electricidad mediante pruebas de composición proximal y elemental de biomasa en los laboratorios del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER). Con los resultados obtenidos se seleccionará los equipos para la planta de generación de electricidad.

El estudio económico radicará en determinar el costo de los equipos necesarios para la conversión de la pollinaza a energía y mediante esto realizar el análisis económico que tendría la empresa con la incorporación del sistema de generación de electricidad y calor.

A.6. Viabilidad del trabajo

El presente proyecto cuenta con un documento de compromiso otorgado por la empresa MEGAVES CIA. LTDA que garantiza el acceso a la granja y a toda la información necesaria para su desarrollo. A la vez la empresa garantiza que el proyecto podrá ser terminado en el tiempo que sea necesario.

El tema por desarrollarse es de gran interés a nivel mundial por lo cual existen varios estudios realizados, y al contar con el acceso a la base de datos de diferentes universidades del mundo y a portales científicos se puede obtener la información necesaria que sirva como punto de partida del proyecto.

Desde el punto económico el proyecto es viable ya que las pruebas de biomasa se realizarán en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) en el cual los ensayos no tienen costo ya que trabaja por cooperación investigativa, mientras que los demás gastos serán cubiertos por cuenta propia.

El proyecto por desarrollarse cuenta con características y condiciones técnicas que cumplen con los objetivos y ejes estratégicos del Plan Nacional de Buen Vivir (PNBV), Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), Ministerio del Ambiente, Ministerio de Agricultura y Ganadería que se basan en el cambio de la matriz productiva, la diversificación de la matriz energética y mitigación del cambio climático.

A.7. Objetivo general

Realizar el estudio de factibilidad para generación de energía eléctrica y térmica mediante biomasa a través de un análisis técnico-económico promoviendo la sostenibilidad ambiental e impulsando la transformación de la matriz energética en el la avícola MEGAVES CIA LTDA.

A.8. Objetivos específicos

1. Realizar investigación bibliográfica sobre la conversión de la biomasa a energía.
2. Determinar el potencial de biogás.
3. Realizar el análisis de factibilidad técnico-económico

CAPITULO 1

Proceso de producción y utilización del biogás

1.1. Biomasa

La biomasa es la materia orgánica no fosilizada originada en un proceso biológico espontáneo o provocado que está disponible de manera renovable (Mariusz & Pawlowski, 2016). Es considerada una energía renovable debido a que su contenido energético es el resultado de la fotosíntesis, que consiste en un proceso que convierte la energía lumínica en química y que posteriormente es utilizada para la transformación del dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno (Patiño, 2014).

La biomasa es una alternativa válida a los combustibles fósiles, para desarrollar productos de valor añadido tales como energía, productos químicos, materiales y bienes de consumo (Romanelli, Ruiz, & Pasquale, 2017).



Fig.1. Generación de biomasa
Fuente: (ERENOVABLE)

La biomasa se produce en un ciclo que inicia a través del proceso de fotosíntesis donde las plantas captan la energía del sol y convierten el dióxido de carbono del aire y el agua del suelo en carbohidratos para formar la materia orgánica. Las plantas se comportan como almacenes de energía la cual es liberada o convertida en otra forma de energía en el instante que la planta es quemada, fermentada o está en proceso de descomposición. El proceso de producción de energía térmica produce dióxido de carbono que es liberado al aire, el mismo que es absorbido por nuevas plantas repitiéndose el ciclo de la generación de biomasa (Romanelli et al., 2017).

1.1.1. Tipos de biomasa

La biomasa es una fuente de energía que ha convivido por años con la humanidad sin ser aprovechada. Existen numerosas fuentes y tipos de biomasa (Borja, 2017; Carta, Calero, Colmenar, Castro, & Collado, 2013.; Vignote, 2016). Según Arévalo (2015), la biomasa se divide en dos grandes grupos: Biomasa de cultivos energéticos y biomasa residual . En la Figura 2 se presenta los diferentes tipos de biomasa correspondientes a cada grupo.

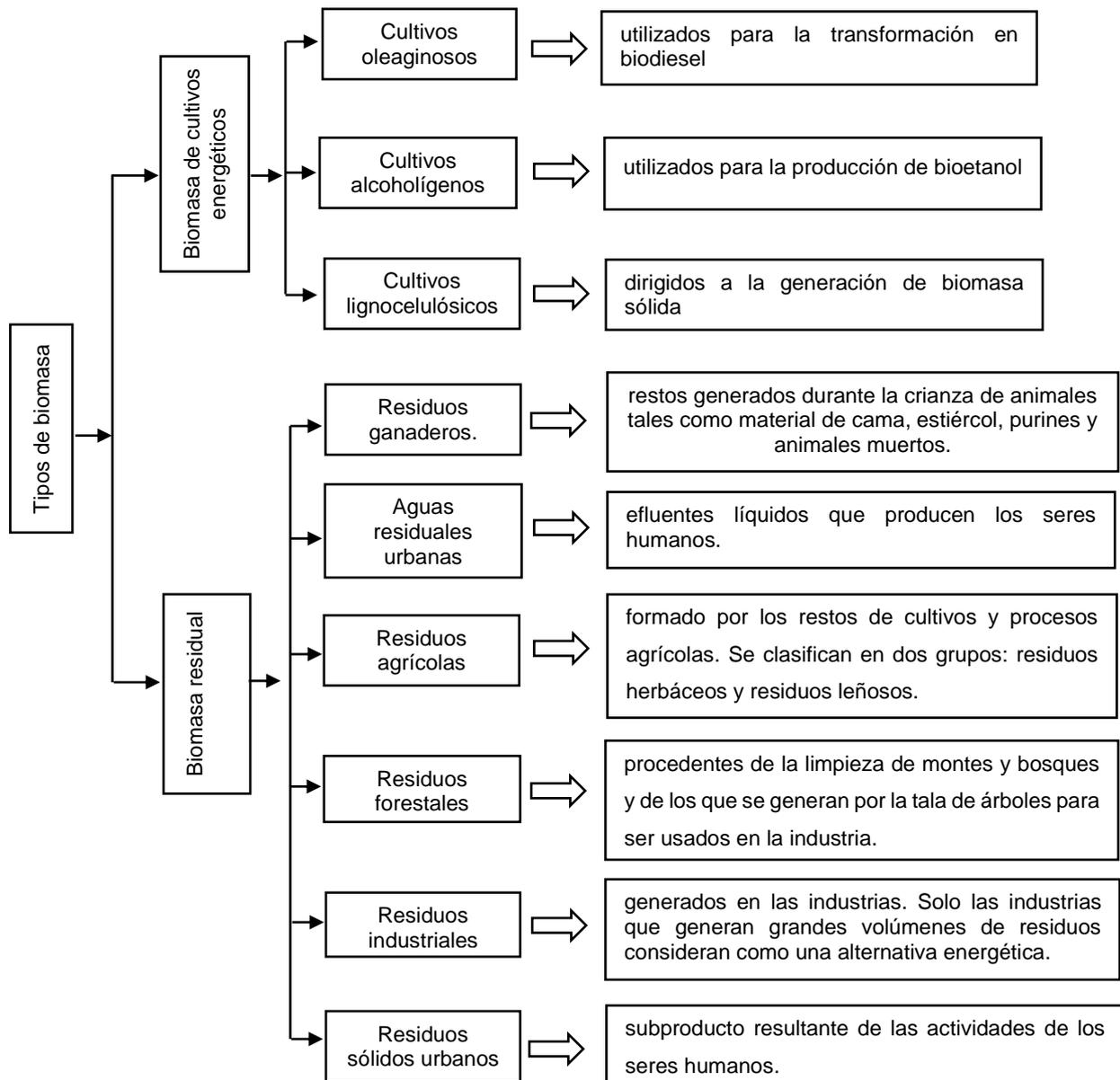


Fig.2. Tipos de biomasa
Fuente: Elaborado por el autor

En la Tabla 1.1. se mencionan varios ejemplos de fuentes de biomasa de cultivos energéticos y fuentes de biomasa residual con el fin de facilitar el reconocimiento de las diferentes formas de biomasa disponibles en el medio.

TABLA 1.1. FUENTES DE ORIGEN DE LA BIOMASA

Tipos de biomasa	Clasificación	Ejemplos	
Cultivos energéticos	Herbáceos	Cardo, sorgo, miscanto, girasol, soja, maíz, trigo, cebada, remolacha, especies C4 agrícolas.	
	Leñosos	Chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias y especies C4 forestales.	
Restos y residuos	Restos de cultivos agrícolas	Herbáceos	Paja, restos de cereales, restos de cultivos hortícolas.
		Leñosos	Poda o eliminación de plantaciones de frutales de hueso y pepita, olivo, vid, cítricos, etc.
	Restos de operaciones silvícolas	Cortas finales, podas, claras, clareos, apertura de vías y pistas forestales, limpieza de monte para prevención de incendios, catástrofes forestales, etc.	
	Restos de las industrias agroalimentarias	Piel de frutos(cítricos), cáscaras (almendra, cacahuete), huesos(aceituna), pulpa en industrias de zumo, etc.	
	Restos de industrias forestales	Serrines y virutas, polvo de lijado, corteza, tacos y recortes.	
	Restos de explotaciones ganaderas	Purines, cama animal, animales fallecidos.	
	Productos o restos marinos	Algas, conchas, etc.	
	Actividades humanas	Residuos alimenticios, papel, otros residuos industriales.	

Fuente: (Borja, 2017)

Dentro de los diferentes tipos de biomasa es importante remarcar los residuos ganaderos que consisten principalmente en la acumulación de deyecciones. Las deyecciones se clasifican en tres tipos: solidas (poseen aproximadamente más del 20% de materia seca), semisólidas (poseen entre el 10 - 22% de materia seca) y líquidas o semilíquidas (poseen entre 0 - 15% de materia seca) (Rufete, 2015). La cantidad de residuos dependen del tipo de explotación, especie, raza, alimentación, tamaño (Reyes, 2018). En la Tabla 1.2 se presenta la cantidad de desechos producidos por los diferentes tipos de ganado.

TABLA 1.2. PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN EXPLOTACIONES GANADERAS

Tipo de ganado	Kg/heces/día
Vacuno	30-50
Equino	20-50
Porcino	4,8
Ovino	4,8
Aves	0,1-0,5

Fuente: (Reyes, 2018)

Es importante mencionar la evolución que ha tenido la actividad ganadera durante los últimos años. En un principio no se producía residuos en grandes cantidades y debido a las características del suelo se presentaba como el único abono nitrogenado y rico en nutrientes, sin embargo en la actualidad la intensificación ganadera produce una elevada cantidad de residuos mismos que reciben un tratamiento inadecuado y como consecuencia de haberse usado durante años como fertilizante para suelos ha provocado un desequilibrio de nutrientes (Moreno, Moral, García, Pascual, & Bernal, 2014; Rufete, 2015). Debido a las elevadas cantidades de residuos que se generan se ha convertido en una fuente importante de contaminación ambiental contribuyendo entre un 7 y 18 por ciento de emisiones totales de gases de efecto invernadero (Food and Agriculture Organization, 2013; Parra, 2015), por tal motivo se ha convertido en un tema de interés para muchos investigadores que buscan alternativas para reducir los efectos negativos que conllevan los residuos ganaderos.

1.2. Biomasa e industria avícola

Como se mencionó anteriormente existen diferentes formas de biomasa. Los residuos ganaderos son una forma de biomasa residual y dentro de esta se encuentran los generados en la industria avícola.

1.2.1. Descripción de la industria avícola

La industria avícola se encuentra dentro del subsector pecuario que tiene como objetivo la producción de alimentos de alto contenido nutricional destinado al consumo humano, como son carne, leche y huevos (Romero, 2016). La avicultura comprende las etapas de mejoramiento genético, producción de aves reproductoras, producción de alimento balanceado, incubación, cría y recría de pollitas, crianza y beneficio de pollos de engorde, incluyendo la comercialización del producto final (Aranda, 2016) .

En la presente investigación se considera únicamente a la producción de pollos de engorde o broiler. Los pollos de engorde son aquellas aves criadas por su carne en lugar de sus huevos. El ciclo de producción toma entre 5 y 8 semanas dependiendo de la especie, el

peso del sacrificio, la alimentación y el estado de las aves (European Bank for Reconstruction and Development, 2016).

A nivel mundial el comercio de pollos de engorde ha ganado mucha importancia convirtiéndose en una actividad rentable, esto a pesar de la decadencia económica mundial. El bajo precio de la carne de pollo en comparación con otros tipos de carne (carne de res, cerdo) y al ser una fuente rica en proteína ha hecho posible que la industria siga en crecimiento (Nan, Chenjun, & Will, 2015; Santos Dalólio et al., 2017).

En la Figura 3 se presenta el crecimiento en la producción y exportación mundial de carne de pollo entre los años 2014 - 2019.

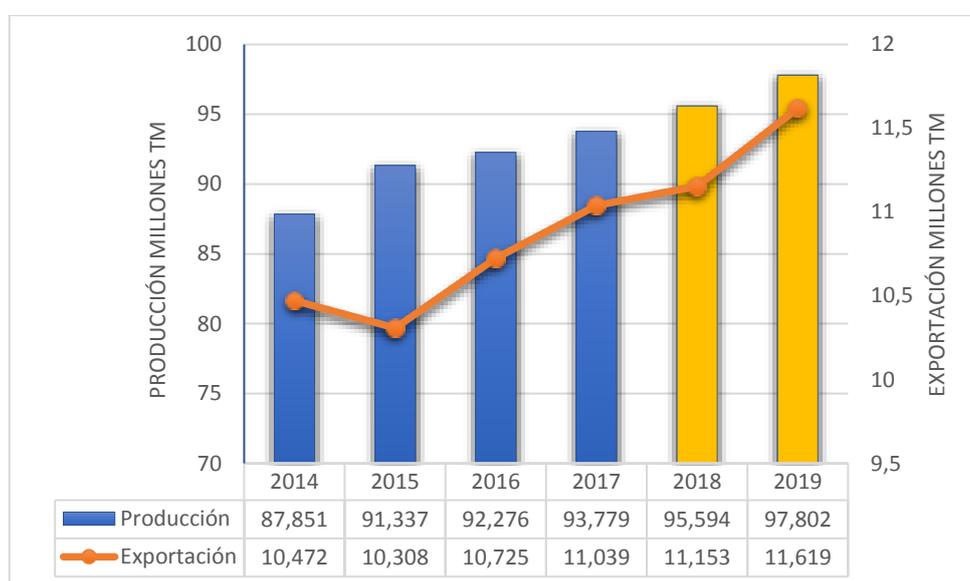


Fig.3. Crecimiento del comercio de carne de pollo
Fuente: USDA-FAS-PSD

Como se muestra en la Figura 3, la producción mundial de carne de pollo crecerá un 2% en 2019 a un récord de 97,8 millones de toneladas mientras que las exportaciones crecerán un 4% a un récord de 11,6 millones de toneladas (United States Department of Agriculture, 2018). El continente americano es la región productora de pollo más grande del mundo con una producción de 44,3 millones de toneladas (44% de la producción total del mundo) (El Sitio Avícola, 2016).

En Ecuador la avicultura ha sido una actividad muy dinámica durante los últimos 30 años, esto gracias a la gran demanda de sus productos para todos los estratos sociales de la población (Vargas, 2016). En el año 2000 la producción de carne de pollo fue de 191 mil toneladas mientras que en el año 2010 la producción fue de 334,1 mil toneladas lo que

representa un crecimiento del 75% (El Sitio Avícola, 2016). Para el año 2017, según los datos de la última encuesta realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) la producción de carne de pollo fue de 351 mil toneladas (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2017) que representa un crecimiento del 5% entre los años 2010 al 2017.

El crecimiento de la producción de pollos de engorde entre los años 2010 - 2017 es considerablemente baja en comparación con el crecimiento de los años 2000 - 2010, sin embargo los productos de la industria avícola tienen mayor demanda en comparación con otras fuentes de carne dentro del país lo que le ha permitido ser la mayor productora de carne a nivel nacional y de esta manera abastecer la demanda total de carne de pollo (Nasimba, 2017).

1.2.2. Aspectos ambientales

Los establecimientos intensivos de producción avícola generan grandes cantidades de desechos animales (3,6 kg/ave durante los 42 días del ciclo de producción) (Böjti et al., 2017; Santos Dalólio et al., 2017). Los desechos avícolas son conocidos como pollinaza, que consiste en una mezcla de excrementos, material de cama, resto de alimentos, aves muertas, plumas, entre otras (Huang et al., 2015; Riera et al., 2014), y representan diferentes problemas ambientales como el mal olor, la atracción de roedores, insectos y otras plagas, liberación de animales patógenos, emisión de amoníaco y de gases de efecto invernadero (CH₄, CO₂, N₂O), durante el proceso de producción, manejo, almacenamiento y aplicación (Böjti et al., 2017; Hu, Cheng, & Tao, 2017; Scarlat, Dallemand, & Fahl, 2018).

La pollinaza tienen un impacto negativo en el medio ambiente y salud pública, debido a los altos contenidos de nitrógeno, carbono orgánico total y bacterias patógenas (Elasri & El amin Afilal, 2016; Kostadinova et al., 2013), sin embargo, al ser un recurso valioso es usado directamente como fertilizante en la agricultura (Cabrera et al., 2018). La aplicación excesiva sin un tratamiento previo conlleva problemas ambientales, desequilibrio de nutrientes en el suelo, contaminación del agua y aire (Food and Agriculture Organization, 2013).

A nivel mundial, las cadenas de suministro de pollos emiten emisiones de GEI de 606 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 8 % de las emisiones del sector ganadero (Gerber et al., 2013). En Ecuador, según el último inventario Nacional de GEI las emisiones totales en el 2010 fue de 80,62 millones de toneladas de CO₂ equivalente del cual el sector de la agricultura contribuyó con el 18,03 % de las emisiones, donde la fermentación entérica y manejo de estiércol generó el 89,8% de las emisiones del sector (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

En cuanto al marco legal regulatorio sobre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se menciona los aspectos más importantes.

El Ecuador es una de las Partes No Incluidas en el Anexo I de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y no tiene compromisos obligatorios de reducción de GEI, a pesar de esto la ley ecuatoriana es la primera legislación en el mundo en reconocer los derechos de la naturaleza, por tal motivo adopta medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, restringiendo sus emisiones de GEI (Ministerio del Ambiente, 2016).

La Constitución de la República del Ecuador contiene dos artículos específicos relacionados con la gestión sobre cambio climático en el país. El artículo 413 promueve el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientales limpias y sanas, así como de energías renovables diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua (Constitución de la República del Ecuador 2008) y el artículo 414 busca la adopción de medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica (Constitución de la República del Ecuador 2008). Además, El Plan Nacional de Desarrollo 2017 - 2021 menciona al cambio climático en uno de sus ejes fundamentales para garantizar la efectiva implementación de las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático y mediante su objetivo 3 garantiza los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones (PLAN NACIONAL DE DESARROLLO, 2017).

Es importante mencionar uno de los objetivos del Ministerio del Ambiente en la Estrategia Nacional de Cambio Climático que consiste en identificar e incorporar prácticas apropiadas para mitigar el cambio climático en el sector agropecuario (Ministerio del Ambiente, 2016). En lo referente a la industria avícola se tiene que el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio dispone que los desechos provenientes de granjas avícolas deben recibir tratamiento técnico adecuado a fin de evitar la disposición directa sobre el suelo y evitar de esta forma la contaminación por microorganismos y cambio en sus características naturales (TULAS, 2003)

1.3. Producción de biogás

La producción de biogás tiene el potencial de contribuir significativamente al desarrollo de una economía verde y baja en carbono a partir de diversos residuos, no tiene efectos secundarios y proporciona una reducción a las emisiones de GEI (Scarlat et al., 2018).

1.3.1. Proceso de producción de biogás

La producción de biogás se basa en la descomposición de materiales orgánicos mediante comunidades microbianas complejas en condiciones anaeróbicas (Pap et al., 2015). El proceso de producción de biogás es el resultado de cuatro reacciones o pasos generales y en cada paso individual participan grupos específicos de microorganismos, y cada grupo descompone sucesivamente los productos del paso anterior (León & Martín, 2016).

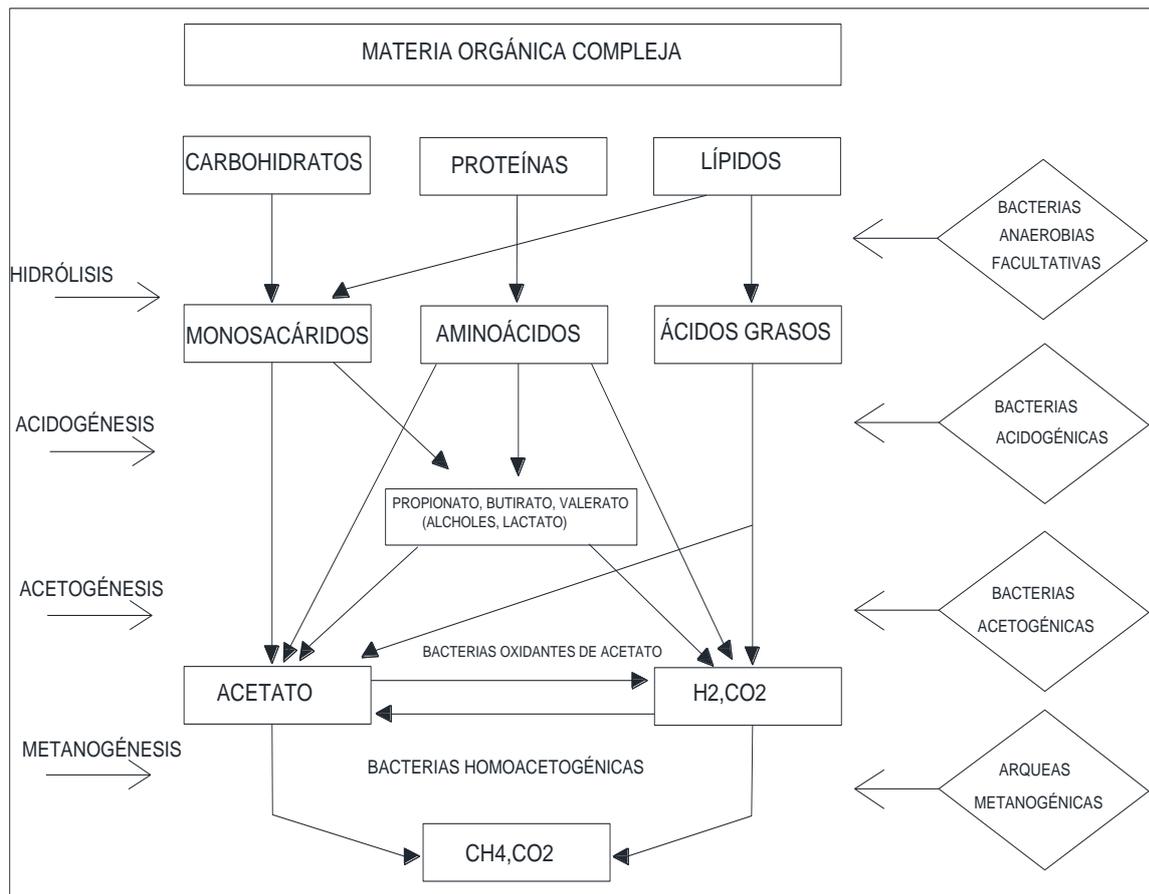


Fig.4. Esquemático del proceso de digestión anaerobia
Fuente: (Merlin Christy, Gopinath, & Divya, 2014; Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013)

- **Etapas 1: Hidrolisis-Licuefacción**

La biomasa está compuesta por polímeros orgánicos muy grandes por tal motivo es necesario descomponer en moléculas más pequeñas para su uso. La hidrolisis es el paso que permite descomponer grandes polímeros (proteínas, grasas, carbohidratos) en moléculas más pequeñas (aminoácidos, ácidos grasos, azúcares simples) para ser utilizadas en las siguientes etapas del proceso (Dahiya, 2015; Mani, 2016). Este proceso se lleva a cabo por medio de enzimas que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas (Corrales, Antolinez, Bohórquez, &

Corredor, 2015). El pH óptimo para la licuefacción esta entre 5,5 y 6,5 (Hagos, Zong, Li, Liu, & Lu, 2017).

- Etapa 2: Fermentación o acidogénesis

La fermentación tiene lugar en ácidos orgánicos de cadena larga, azúcares, aminoácidos para convertirlos en ácidos orgánicos más pequeños como el propionato, butirato y valerato, lo que se denomina fase de formación de ácido o fase de fermentación (Mani, 2016). A la vez en esta etapa los monómeros se convierten en ácidos grasos volátiles y alcoholes por microorganismos acidogénicos y se forma el hidrógeno y dióxido de carbono (Rajin, 2018).

Los acidógenos no pueden sobrevivir en ambientes extremadamente ácidos (pH = 3) o alcalinos (pH = 12). Los valores óptimos de pH se encuentran en el rango de 5,25 - 11 (Lee, Chua, Yeoh, & Ngoh, 2014).

- Etapa 3: Acetogénesis

La acetogénesis consiste en la fermentación adicional de los productos intermedios de la acidogénesis para producir también acetato, hidrogeno y CO₂ (Tchobanougous et al., 2014). En esta etapa también se encuentran las bacterias homoacetogénicas que convierten el hidrogeno y CO₂ en acetato y bacterias oxidantes que convierten el acetato en hidrogeno y CO₂ (Tauseef et al., 2013).

Las bacterias acetogénicas son anaerobios estrictos, crecen lentamente, tienen un pH óptimo de alrededor de 6, están aisladas principalmente de hábitats anóxicos y son sensibles a las fluctuaciones en las cargas orgánicas y los cambios ambientales (Merlin Christy et al., 2014).

Según Nursanto (2017), “La tasa de crecimiento de los organismos acetogénicos es ligeramente más alta que los organismos metanogénicos, pero aún más baja que la fermentación. La μ_m (tasa de crecimiento específica máxima) de los microorganismos es de $\sim 0,5 - 0,8 \text{ d}^{-1}$ ”.

- Etapa 4: Metanogénesis

Constituye la etapa final del proceso, que consiste en la acción de los metanógenos para la creación de metano a partir de los productos finales de la acetogénesis y algunos productos intermedios entre la hidrólisis y la acidogénesis (Dahiya, 2015). Hay dos grupos de microorganismos responsables en este paso: un organismo que utiliza ácido acético como sustrato y los organismos que utilizan hidrógeno y dióxido de carbono para generar metano (Nursanto, 2017). A la vez durante la producción de metano se puede diferenciar dos tipos de bacterias: las mesófilas (se activan a temperaturas de 20 - 45 °C) y termofílicas (se activan

a temperaturas de 48 - 55 °C y altas temperaturas de hasta 70 °C), sin embargo, para la producción de biogás se emplean bacterias mesofílicas debido a que son menos susceptibles a los cambios de temperatura que las bacterias termofílicas (Hoysall & Malayil, 2012).

El rango de pH adecuado para que funcione la mayoría de las bacterias metanogénicas es de 6,7 – 7,4 (Hagos et al., 2017; Hoysall & Malayil, 2012) y la tasa de crecimiento es baja, las μm se registran en un rango de $\sim 0,3 - 0,5 d^{-1}$ y son muy sensibles al medio ambiente (Nursanto, 2017).

El biogás puede ser obtenido mediante digestión anaerobia, también denominada biometanización que consiste en un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno donde además de obtener biogás (mezcla de gases principalmente metano y dióxido de carbono) se obtiene digerido (residuo estabilizado) (Casanova, 2017; Moreno et al., 2014). En la Figura 5 se presenta un diagrama de flujo sobre los subproductos que es posible obtener mediante la digestión anaerobia de residuos animales.

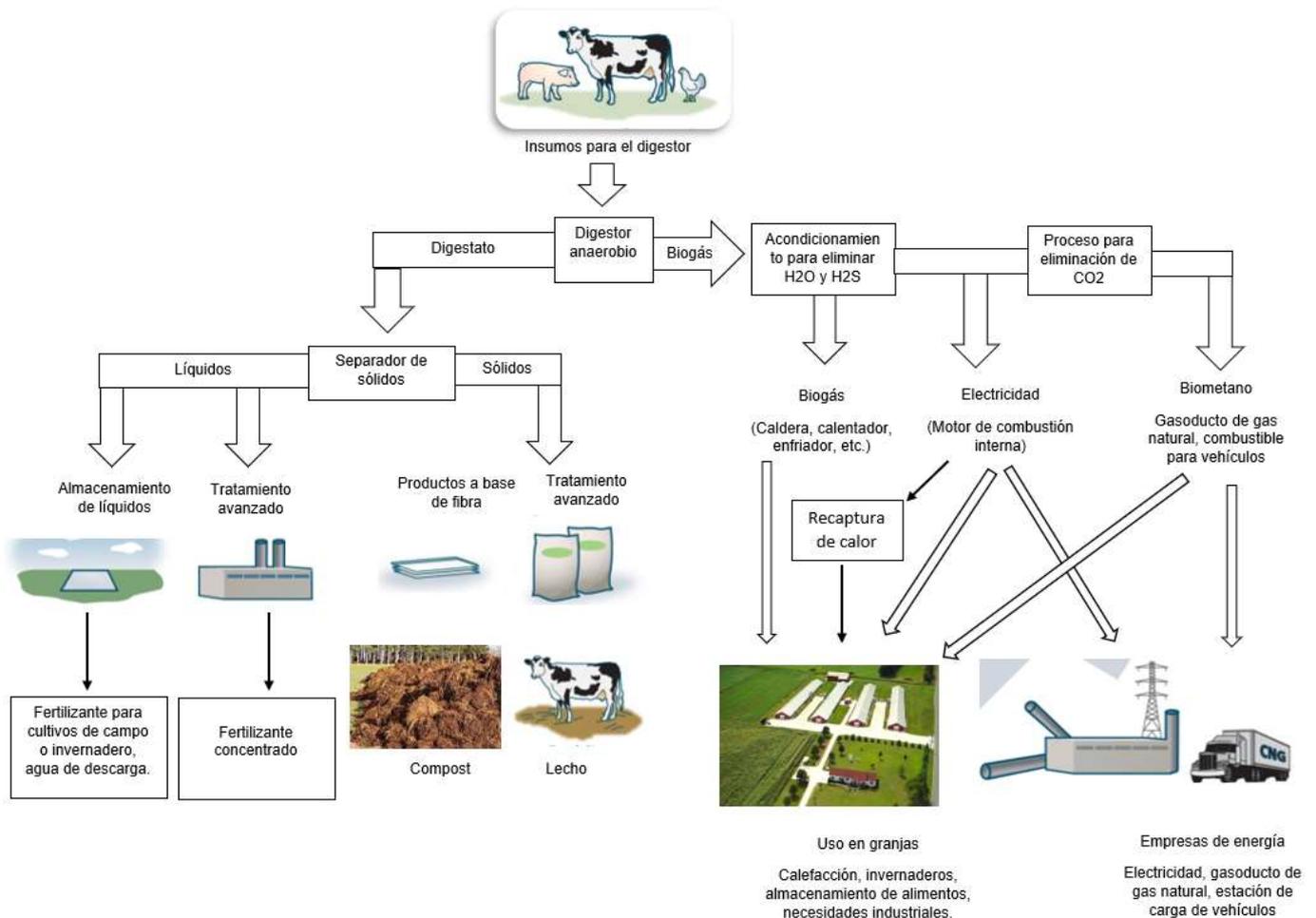


Fig.5. Diagrama de flujo de un sistema de digestor anaeróbico
Fuente: (Washington State University, 2015)

El biogás contiene una mezcla de 40 - 60% de CH₄ y 60 - 40% de CO₂, sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃), dihidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂) monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles y siloxanos (Aryal, Kvist, Ammam, Pant, & Ottosen, 2018). El biogás generalmente es incoloro, inflamable, con un poder calorífico mayor de 4400 Kcal/m³ (J. González & Violante, 2017).

El digerido es el residuo orgánico fuertemente estabilizado que se obtiene como subproducto y puede emplearse como fertilizante en la agricultura ya sea directamente o tras ser sometido a un proceso de separación sólido - líquido como se muestra en la Figura 5 (Moreno et al., 2014).

La digestión anaerobia además de ser una técnica que permite aprovechar el potencial energético de los residuos animales favorece la reducción de los efectos negativos que producen (Dalkılıç & Ugurlu, 2015). Contribuye a mitigar los olores asociados con el almacenamiento y la descomposición del estiércol y elimina los agentes patógenos que representan un riesgo importante para la salud de las personas y los animales (Scarlat et al., 2018), a la vez contribuye con la reducción del consumo de combustibles fósiles y ayudan a reducir las emisiones de GEI (principalmente metano) al medio ambiente (Ziganshina et al., 2015).

1.3.2. Parámetros que influyen en la producción de biogás

La mejora de la estabilidad y eficiencia de la digestión anaerobia es crucial para la aplicación de esta tecnología (Zhang et al., 2018). La temperatura, el tipo de sustrato, la tasa de carga orgánica, tiempo de retención, concentración de amoníaco, pH, alcalinidad, mezcla, relación C/N son factores decisivos en la producción de biogás (Pap et al., 2015).

- Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes que afectan la estabilidad y rendimiento de la producción de biogás. (Lin, De Vrieze, He, Li, & Li, 2016). La digestión anaerobia puede ocurrir bajo tres regímenes de temperatura: psicrófilico (bajo los 20 °C), mesófilico (20 - 45 °C, óptimo a 35 °C) y termófilico (50 - 75 °C, óptimo a 55 °C) (Hoysall & Malayil, 2012; Moreno et al., 2014).

La tasa de producción de biogás es directamente proporcional a la temperatura, es decir, con un aumento de temperatura la tasa de producción de biogás aumenta (Deepanraj, Sivasubramanian, & Jayaraj, 2014), tal como se muestra en la Figura 6.

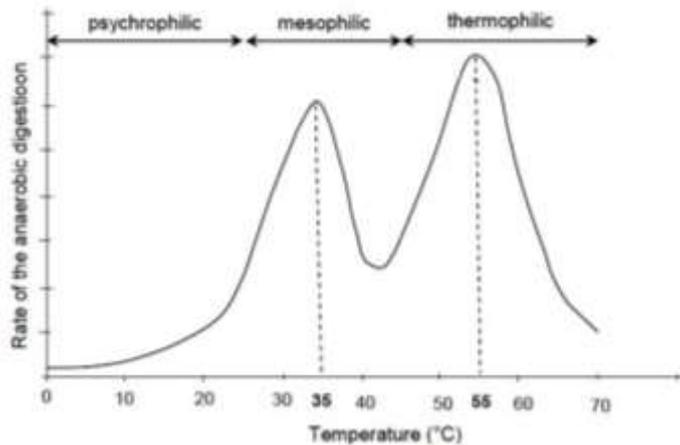


Fig.6. Influencia de la temperatura en la digestión anaerobia
Fuente: (Deepanraj et al., 2014)

- pH

La acidez del digestor debe ser monitoreado con el fin de garantizar las condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias (Nursanto, 2017). Niveles altos de pH promueven la liberación de amoníaco no ionizado tóxico para los metanógenos, mientras que en niveles bajos de pH la formación de ácido libre es significativa y las bacterias son inhibidas por la acumulación de ácidos grasos volátiles (Khedim, Benyahia, Cherki, Sari, & Harmand, 2018). El rango de pH óptimo para el proceso de digestión anaerobia es de 6,5 – 8,0 (Miah, Rahman, Akanda, Pulak, & Rouf, 2016).

- Relación C/N

La cantidad de carbono y nitrógeno presentes en los residuos son un factor crucial en la producción de biogás, debido a que los dos elementos son el alimento de las bacterias anaerobias. El carbono se utiliza como fuente de energía y el nitrógeno para construir la estructura celular (Jain, Jain, Wolf, Lee, & Tong, 2015). Por tal motivo para proporcionar una digestión óptima, concentraciones estables y bajas de NH_3 libre y NH_4 total se debe mantener una relación C/N de 20:1 y 30:1 (Böjti et al., 2017; Deepanraj et al., 2014).

- Mezcla/agitación

Mediante la mezcla en el digestor es posible mantener la homogeneidad y la estabilidad del proceso gracias a que ayuda a combinar el material nuevo entrante con los microorganismos, además proporciona una utilización eficiente de todo el volumen del digestor, previene la formación de espuma, escoria y corteza, evita gradientes de pH, y evita la estratificación térmica y la formación de residuos en el digestor (Deepanraj et al., 2014).

- Tiempo de retención

Está relacionado con el periodo de tiempo que permanece la materia orgánica en el digestor hasta conseguir su descomposición. A temperaturas mesofílicas el tiempo de retención es de 20 a 40 días mientras que a temperaturas termofílicas es mayor a 8 días (J. González & Violante, 2017).

- Tasa de carga orgánica

La tasa de carga se define como la cantidad de materia prima agregada o alimentada al digestor por día por unidad de volumen (Jain et al., 2015; Parra, 2015). A una mayor velocidad de carga orgánica el rendimiento de biogás aumenta, sin embargo, si se sobrepasa el valor de la carga el rendimiento de biogás disminuye hasta el punto de la inhibición del proceso. La tasa de carga óptima se encuentra entre 0,5 y 2 kg de sólidos volátiles totales por unidad de volumen del digestor por día (Cowley & Brorsen, 2018; Deepanraj et al., 2014),

- Tipo de sustrato

El sustrato es el alimento de las bacterias anaerobias, por tal motivo la velocidad de producción de metano está directamente relacionado con las características del sustrato (Nursanto, 2017). Los sustratos varían significativamente en composición, dinámica de fluidos, homogeneidad y biodegradabilidad (Jain et al., 2015).

1.3.3. Inhibidores de la digestión anaerobia

En la digestión anaerobia además de los parámetros de operación se deben considerar los factores que pueden producir la inhibición del proceso. La inhibición está relacionada con la reducción de la tasa de producción de metano en estado estacionario y la acumulación de ácidos orgánicos (Mariusz & Pawlowski, 2016). Los factores inhibidores a tener más en cuenta durante el proceso son el amoníaco, azufre, macroelementos, microelementos, metales pesados y ácidos grasos volátiles.

- Amoníaco

El amoníaco se produce por degradación de proteínas y es tóxico para los metanógenos donde los pequeños aumentos de nitrógeno amoniacal en los digestores aumentan la producción de hidrógeno y metano, mientras que los grandes aumentos causan su inhibición (Hoysall & Malayil, 2012). La carga orgánica, la concentración de nitrógeno y la tasa de dilución son los principales parámetros que actúan sobre la toxicidad del amoníaco. Un aumento de los dos primeros parámetros favorece una gran cantidad de nitrógeno que pueden llevar a la biestabilidad (Khedim et al., 2018).

La concentración de amoníaco es un factor clave que regula la estabilidad de la digestión anaerobia (Zhang et al., 2018). En la producción de biogás mediante residuos ganaderos se debe tomar más énfasis en mencionado factor debido a los altos contenidos de nitrógenos de los residuos (Chen, Cheng, & Creamer, 2008; Rajagopal, Massé, & Singh, 2013). En la Tabla 1.3 se presenta el efecto de los niveles de amoníaco en el proceso de la digestión anaerobia de residuos ganaderos.

TABLA 1.3. EFECTO DE LOS NIVELES DE AMONIACO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Efecto en el proceso	Amoniaco (mg/l)
Beneficioso	500-200
No tiene efecto antagónico	200-1000
Inhibición (especialmente a valores de pH más altos)	1500-3000
Inhibición completa o tóxica a cualquier pH.	>3000

Fuente: (Rajagopal et al., 2013)

- Azufre

El azufre es un elemento necesario para las bacterias metanogénicas, sin embargo el azufre en forma de sulfato o sulfuro puede provocar la inhibición del sistema (Kwietniewska & Tys, 2014). La inhibición del proceso se da como resultado de la reducción de sulfato y la toxicidad del sulfuro (Chen et al., 2008).

- Macroelementos, microelementos, metales pesados.

Kwietniewska & Tys (2014) menciona , “las altas concentraciones de metales alcalinos esenciales como el magnesio, el calcio, el sodio y el potasio pueden ser tóxicos para las bacterias anaeróbicas. Las cantidades excesivas de calcio dan como resultado la precipitación de carbonato y fosfato y causan descamación de los reactores, así como de las células bacterianas”.

- Ácidos grasos volátiles

Los ácidos grasos de cadena larga son el producto principal de la degradación de los lípidos y su acumulación en los digestores anaerobios provoca problemas de flotación de lodos, lavado e inhibición de la actividad microbiana (Zonta, Alves, Flotats, & Palatsi, 2013). Entre los ácidos grasos volátiles, el propionato es el que genera mayores problemas de inhibición, con 5000 mg/ L se desencadena la inhibición completa del proceso (Lee et al., 2014).

En la Tabla 1.4 se presentan las concentraciones inhibitoras de algunos compuestos.

TABLA 1.4. CONCENTRACIONES INHIBIDORAS

Compuesto	Concentración inhibidora
Ácidos grasos volátiles	>250 [mg/L]
Nitrógeno amoniacal	>1500 [mg/L]
Sulfatos y sulfuros	>50 [mg/L]
O ₂	>1 [μg/L]
NaCl	>40000 [ppm]
NO ₃ ⁻	>0.05 [mg/L]
Cu	>100 [mg/L]
Cr	>200 [mg/L]
Ni	>200 [mg/L]
CN ⁻	>25 [mg/L]
Na	>3500 [mg/L]
K	>2500 [mg/L]
Ca	>2500 [mg/L]
Mg	>1000 [mg/L]

Fuente: (Carrasco, 2015; Sindall, 2014)

1.3.4. Digestores anaerobios

Los biodigestores son unidades que presentan las condiciones adecuadas para que se produzca una serie de procesos biológicos físicos y químicos para la producción de metano (Chorkulak, 2016). Se pueden clasificar según el modo de alimentación (sistemas continuos y discontinuos), el contenido de humedad en el sustrato (húmedo y seco) y por la temperatura del proceso (mesofílico y termofílico) (Deepanraj et al., 2014).

En el tratamiento anaerobio de residuos avícolas los biodigestores empleados son del tipo discontinuo también conocido como tipo batch, esto por motivo del tiempo que tarda el proceso de producción de pollos de engorde. En este tipo de digestores el sustrato se alimenta una sola vez y se sella completamente durante el tiempo que tarde la descomposición de los residuos (tiempo de retención), una vez transcurrido el tiempo de retención se vacía el digestor y se vuelve a llenar para iniciar un nuevo proceso (Deepanraj et al., 2014; Merlin Christy et al., 2014). La principal desventaja de este tipo de biodigestores es la irregularidad de la producción de biogás y la falta de estabilidad de la actividad microbiana (Jain et al., 2015).

En la Tabla 1.5 se presentan las características de los digestores más comunes usados en el tratamiento de estiércol.

TABLA 1.5. CARACTERÍSTICAS DE DIGESTORES ANAEROBIOS

Tipo	Digestor	Ventajas	Desventajas	% Sólidos	RTH
Digestores de flujo continuo	Tanque rectangular en el suelo	Barato Simple de operar y realizar mantenimiento Puede tomar cultivos energéticos	Mezcla pobre Pobre rendimiento energético Difícil de eliminar sólidos	11 - 13	Mayor a 15
Laguna cubierta	Almacenaje impermeable	Se adapta fácilmente al lavado hidráulico. Construcción y gestión sencillas.	Mezcla pobre Pobre rendimiento energético El asentamiento de sólidos reduce el volumen utilizable Limitado a climas más cálidos, ya que la digestión depende de la temperatura	0,5 - 3	40 - 60
Digestor de mezcla completa	Tanque redondo o cuadrado en o sobre la tierra	Eficiente Puede digerir diferentes niveles de contenido de materia seca. Puede tomar cultivos energéticos. Buena mezcla Buena degradación de sólidos.	No se garantiza cuánto tiempo pasa el material en el tanque. Las bacterias se lavan cuando se produce un cortocircuito Relativamente caro	3 - 10	Mayor a 15
Digestor de flujo ascendente	Tanque sobre el suelo	Alta velocidad El afluente se ingresa continuamente Las bacterias se suspenden en el reactor debido al flujo del afluente	Adecuados para flujos de residuos homogéneos y consistentes.	1 - 5	5 o menor
Digestor de película fija (filtro anaerobio)	Tanque en o sobre la tierra	Eficiente Lavado bajo de bacterias Alta producción de gas	Los sólidos suspendidos deben ser removidos Costoso	1 - 5	5 o menor
Reactores por lote de secuencia	Tanque sobre el suelo	Es adecuado para el tratamiento de desechos diluidos (purines) Techo impermeable que recoge los gases	Costoso	2,5 - 8	5 o menor
Digestor de sólidos altos	Tanque encima del suelo	Puede usar materiales sólidos Trata bajo condiciones tanto anaeróbicas como aeróbicas.	Necesita material apilable con al menos 25% de sólidos Proceso complicado Costoso	18 +	2 - 3

Fuente: (Dahiya, 2015; Hamilton, 2013; Tchobanoglous et al., 2014; United States Environmental, 2011)

1.3.5. Estructura de los biodigestores

Los digestores que operan mediante estiércol animal comúnmente estas compuestos de las siguientes partes (Tauseef et al., 2013):

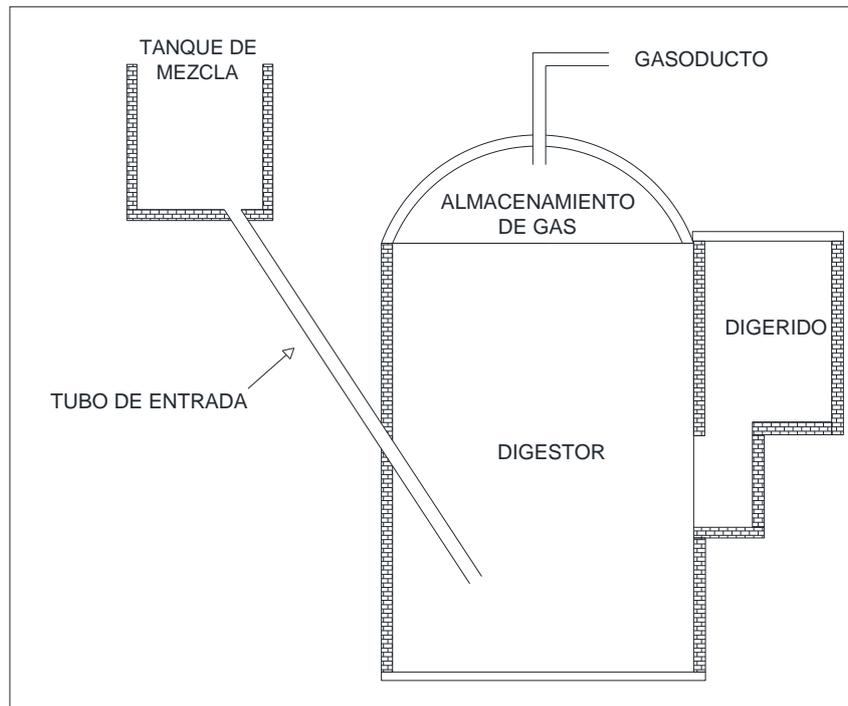


Fig.7. Estructura de un biodigestor
Fuente: (Deepanraj et al., 2014)

- Tanque de mezcla: es el espacio donde se almacena el material de alimentación, se agrega el agua y se realiza la mezcla hasta que se forma una suspensión homogénea.
- Tubo de entrada: es el lugar de ingreso del material de alimentación.
- Digestor: es el lugar donde se lleva a cabo la acción bacteriana.
- Recipiente de gas o cúpula de almacenamiento de gas: el biogás se recoge en el recipiente hasta el momento del consumo.
- Tubo de salida: es el medio de evacuación del digerido hacia el tanque de salida.
- Gasoducto: lleva el gas al punto de utilización

1.4. Generación de electricidad mediante biogás

El biogás es un gas combustible que puede ser usado desde aplicaciones muy pequeñas hasta instalaciones técnicamente sofisticadas (Deepanraj et al., 2014; Rutz, 2015). En la Figura 8 se presenta las aplicaciones del biogás.

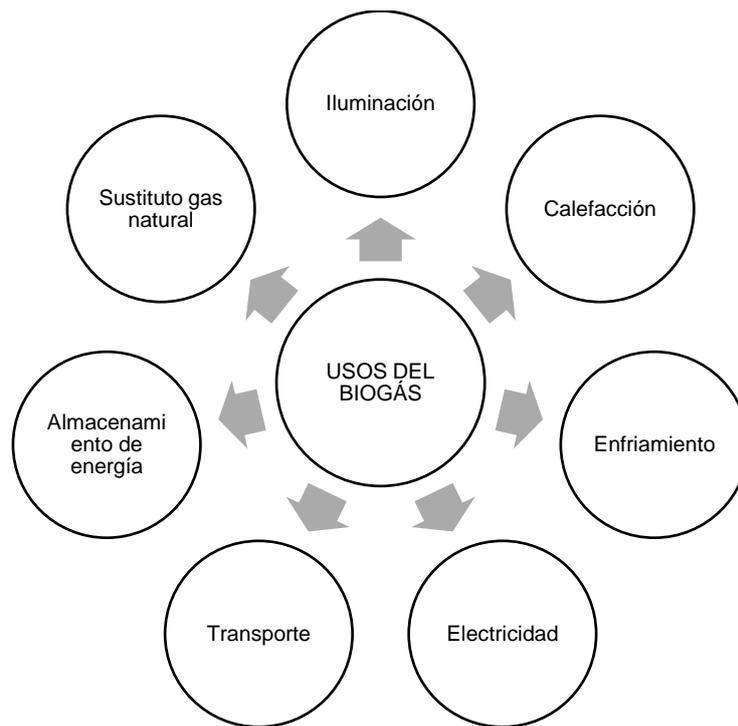


Fig.8. Usos del biogás
Fuente: Elaborado por el autor

Las aplicaciones más sencillas del biogás es el uso directo en iluminación y cocción (Saravanan et al., 2014), sin embargo, el campo de aplicación del biogás es más amplio. Tradicionalmente el biogás es usado en sistemas de calefacción mediante el uso de quemadores, calderas y estufas de gas (Rutz, 2015). En países desarrollados el biogás es mejorado mediante depuradores para la eliminación del dióxido de carbono y el sulfuro de hidrogeno para ser usados en la red de gas natural y como combustible para vehículos (Deepanraj et al., 2014), por otro lado en países en desarrollo el biogás se concentra y se comprime en cilindros para cocción industrial y doméstica (Aryal et al., 2018).

En la actualidad los digestores están conectados a sistemas combinados de gas (CHP) que permiten producir calor (satisfacer la demanda local de calor de las granjas) y energía eléctrica con capacidad desde decenas de kWe hasta unos pocos MWe (Scarlat et al., 2018). Existen diferentes sistemas que tienen la capacidad de usar el biogás producto de la digestión anaerobia de los desechos animales para generar energía eléctrica, entre los más importantes se puede mencionar a los motores de gas, turbina a gas, microturbina, motor Stirling y las pilas de combustible (Kaparaju & Rintala, 2013; Tchobanoglous et al., 2014). En la Tabla 1.6 se presenta una comparación entre las diferentes tecnologías.

TABLA 1.6. TECNOLOGÍAS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MEDIANTE BIOGÁS

Parámetro	Motores alternativos	Turbina a gas	Microturbina	Motor Stirling	Pila de combustible
Capacidad (kWe)	20-6000	3500-15000	30-300	<150	300-1500
Tamaño	Pequeña-Mediana	Grande	Pequeño	Pequeño	Pequeño
Eficiencia eléctrica (%)	30-40	25-40	25-30	30-40	40-45
Eficiencia térmica (%)	40-50	30-50	30-35	35-40	30-40
Eficiencia global del sistema (%)	70-80	70-75	55-65	65-80	75-80
Control relación potencia - calor	No es posible	Muy bien	Muy bien	Muy bien	Bien
Requisito de purificación de biogás	Medio	Medio	Medio	Medio bajo	Alto
Emisiones NOx	Alto 500-100 mg/Nm ³	Bajo de 25 - 50 mg/Nm ³	Bajo	Muy bajo	Extremadamente bajo 3 mg/Nm ³
Combustible alternativo	Gas líquido	Gas natural	Gas natural, queroseno, fueloil.	Gas natural, fueloil, biomasa.	Gas natural
Costos de inversión (\$/kWe)	450-1300	1000-1700	700-1400	1500-1700	3400-4500
Costos de operación y mantenimiento (\$/kWh)	0.01-0.02	0.005-0.010	0.008-0.015	0.003-0.005	0.003-0.010

Fuente: (Kaparaju & Rintala, 2013; Tchobanoglous et al., 2014)
Traducido por el autor

Como se muestra en la Tabla 1.6 los motores de combustión interna alternativos presentan algunas ventajas en comparación con las demás tecnologías, principalmente el bajo costo de inversión y mantenimiento y la eficiencia global del sistema del 70 - 82%, además es importante mencionar que es posible encontrar en capacidades desde los 20 kWe hasta los 6000 kWe lo cual los convierte en la tecnología más factible para ser usado en la presente investigación.

1.4.1. Motores de combustión interna alternativos

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) son motores térmicos que convierten la energía química en energía térmica para producir potencia mecánica. La energía térmica se libera al quemar la carga de aire y combustible en la cámara de combustión y luego la energía térmica se convierte en potencia mecánica mediante el movimiento del pistón (Subramanian, 2017). Se denominan motores de combustión interna porque el estado térmico se genera en el propio fluido que evoluciona en el motor (Rovira de Antonio & Muñoz, 2015).

Dado que la conversión de energía en estos motores siempre va acompañada de la producción de calor se los denomina unidades de CHP (Combined heat and power) ya sea que se utilice o no el calor. Por tal motivo se convierte en una tecnología con una elevada eficiencia global con apenas un 10 - 20 % de pérdidas, sin embargo, la eficiencia eléctrica (máximo 40%) aún sigue siendo baja (Kaparaju & Rintala, 2013; Rutz, 2015). El calor total

que proviene principalmente de los gases de escape (50 - 60%) con temperaturas entre los 460 y 550 °C y el ciclo de enfriamiento (30 - 40%) con temperaturas entre los 80 - 90 °C (Rutz, 2015) puede ser recuperado de manera eficaz al emplearse en diferentes aplicaciones como calefacción de espacios, calefacción de digestores anaerobios, procesamiento del digestato, calentamiento de agua para limpieza de equipos y precalentamiento de agua de alimentación de calderas (Kaparaju & Rintala, 2013; Thompson, Wang, & Li, 2013).

Los motores alternativos se pueden clasificar en diferentes tipos, entre los más importantes se encuentran: según el proceso de combustión (motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión) y según el modo de realizar el ciclo (motores de cuatro tiempos y motores de dos tiempos) (Rovira de Antonio & Muñoz, 2015). Actualmente los motores más usados a nivel mundial para cogeneración mediante biogás son los motores de cuatro tiempos y motores de encendido por compresión o motores diésel, aproximadamente el 50% de plantas CHP funcionan con motores de cuatro tiempos y el 50% restante con motores diésel (Kaparaju & Rintala, 2013).

1.4.1.1. Elementos principales de los motores alternativos

Los motores alternativos constan de los siguientes elementos (Rovira de Antonio & Muñoz, 2015):

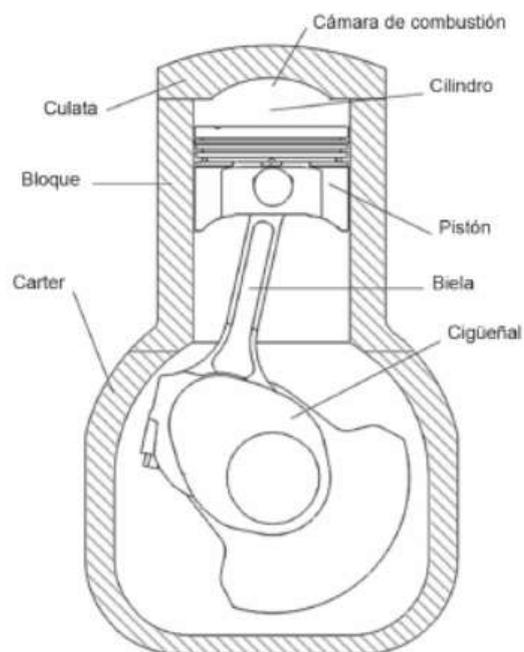


Fig.9. Elementos principales de los motores de combustión interna alternativos
Fuente: (Rovira de Antonio & Muñoz, 2015)

- Pistón: Elemento con movimiento rectilíneo alternativo. Es el émbolo del mecanismo biela-manivela y aumenta o disminuye el volumen del cilindro.
- Biela: Elemento que, junto con la manivela, convierte el movimiento lineal del pistón en el rotativo del cigüeñal.
- Cigüeñal: Elemento rotativo del motor. En él se integra la manivela del mecanismo.
- Cilindro: Es el volumen que aloja el fluido de trabajo.
- Cámara de combustión: Es el volumen que queda por encima del pistón al finalizar la compresión y donde básicamente tiene lugar la combustión de la mezcla.
- Culata: Elemento que constituye el cerramiento superior de los cilindros
- Bloque: Elemento que contiene los cilindros.
- Cárter: Cierre inferior del motor. Contiene el aceite para la lubricación.

1.4.1.2. Motor de cuatro tiempos / cuatro carreras

Los motores de biogás de cuatro tiempos se desarrollaron originalmente para operar con gas natural por tal motivo se pueden usar para biogás con poca o ninguna modificación del motor (Kaparaju & Rintala, 2013). Se encuentran en capacidades que van desde pocos kilovatios a 10 MW, una vida útil aproximada de 60000 horas y una eficiencia eléctrica de 35 a 40%, además es posible obtener eficiencias eléctricas superiores al 40% mediante la implementación de un recuperador. La cantidad de energía de combustible convertida en electricidad generalmente aumenta con el tamaño, 30% para unidades pequeñas y un 40% para motores grandes (Kaparaju & Rintala, 2013).

En estos motores se requiere de cuatro carreras de pistón para realizar el ciclo completo, la ejecución de los cuatro tiempos corresponde a un ángulo de cigüeñal de 720 grados. Los cuatro movimientos del pistón que se generan dentro del cilindro consisten en lo siguiente (Rovira de Antonio & Muñoz, 2015).

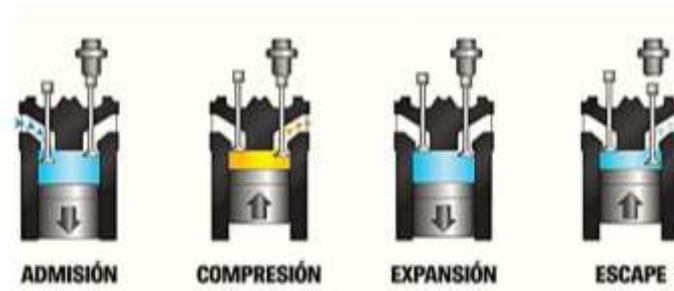


Fig.10. Proceso de funcionamiento del motor de cuatro tiempos
Fuente:(Aguilar, 2017)

- Admisión: El pistón se separa del punto muerto superior (PMS) descendiendo por el cilindro. Esto genera una depresión en el cilindro que permite su llenado con masa fresca, sin quemar. Las válvulas de admisión están abiertas y las de escape cerradas.
- Compresión: El pistón se desplaza desde el punto muerto inferior (PMI) hacia el superior (PMS), comprimiéndose la masa fresca al estar las válvulas de admisión y de escape cerradas. En las cercanías del PMS se produce la ignición de la mezcla, empezando el proceso de combustión.
- Expansión: El pistón vuelve a descender, empezando la segunda revolución del cigüeñal. Durante esta carrera finaliza el proceso de combustión y se realiza el de expansión. Las válvulas permanecen cerradas. En las proximidades del PMI, pero todavía en la carrera de expansión, se abren las válvulas de escape comenzando la evacuación de los gases a la atmósfera como consecuencia de que su presión es mayor que la atmosférica. A esta evacuación, anterior a la propia carrera de escape, se le denomina escape espontáneo.
- Escape: El pistón vuelve a desplazarse desde el PMI hacia el PMS. Las válvulas de escape continúan abiertas, por lo que el movimiento del pistón permite expulsar los gases quemados hacia la atmósfera.

Es importante mencionar que este tipo de motores además de presentar una eficiencia total elevada tiene menores emisiones de contaminantes al aire en comparación con los motores de dos tiempos esto gracias a que consume poca cantidad de combustible para realizar los cuatro procesos (Subramanian, 2017).

CAPITULO 2

Potencial de biogás en la avícola Megaves Cía.Ltda.

2.1. Descripción de la avícola

Megaves Cía. Ltda. es una empresa familiar dedicada a la crianza de pollos broiler, su oficina central se encuentra ubicada en la parroquia Ascázubi; cantón Cayambe; en las calles Guayaquil y García Moreno. El estudio se lo realizará en la granja Moquetes perteneciente a la empresa en mención y se encuentra ubicada a pocos metros de la oficina central como se muestra en la Figura 11.

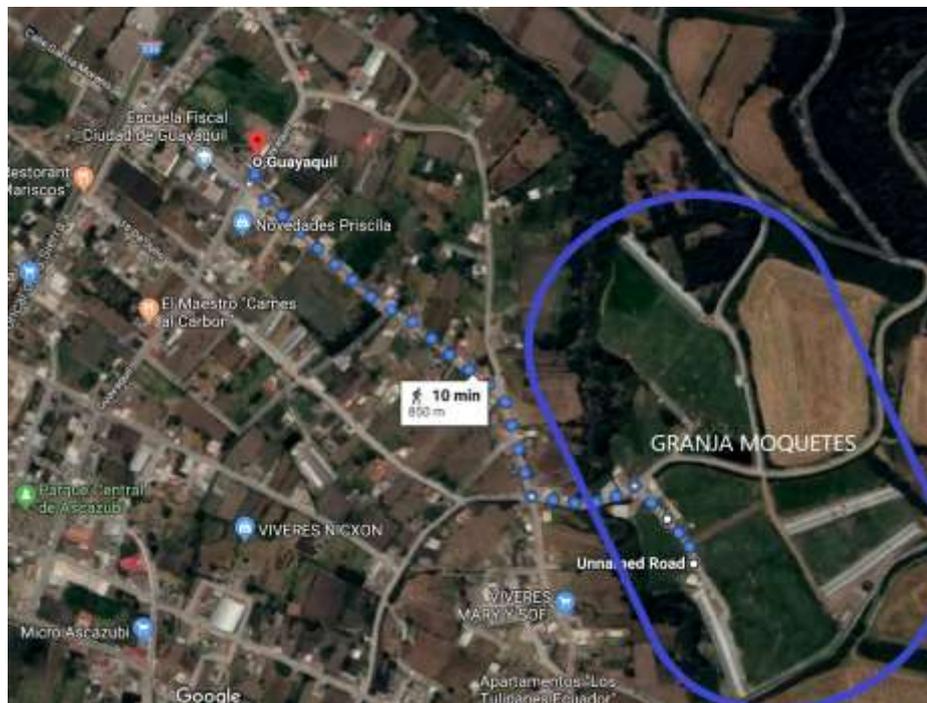


Fig.11. Ubicación de la granja Moquetes
Fuente: Google Maps

En la granja existen 4 galpones (Moquetes Alto, Moquetes Bajo, San Antonio Alto y San Antonio bajo), cada uno tiene un área de 1500 m^2 (150 metros de largo por 10 metros de ancho), con una capacidad de producción de 24000 pollos en un lapso de 55 días. Además de los galpones para la crianza de broiler la granja cuenta con potreros para la crianza de ganado bobino lechero, con un total de 70 cabezas de ganado. También es importante mencionar que la granja está atravesada por el canal de agua El Pisque, lo cual permite que

la granja disponga de un almacenamiento de agua (reservorio) para el riego de los campos y un sistema de purificación de agua para el consumo interno de la granja.

Como se mencionó en el capítulo I, la producción de pollos de engorde genera grandes cantidades de pollinaza. En la granja Moquetes la pollinaza es retirada de las naves al final de cada ciclo de producción y es destinada para dos propósitos: ser usada como abono orgánico en los potreros aledaños sin previo proceso de compostaje y para su venta.

En el aspecto constructivo, cada nave de broiler cuenta con equipamiento de suministro de agua, sistema de comederos, silos de pienso, transporte de pienso y sistemas de calefacción e iluminación. Para el proceso de suministro de agua se emplean bombas de agua de 2 Hp, para el llenado de los silos se emplean motorreductores de $\frac{3}{4}$ Hp mientras que para el proceso de transporte de pienso se emplean motorreductores de $\frac{1}{4}$ Hp. Por otra parte, para la calefacción de las naves se lo realiza mediante tres formas: criadoras a base de gas licuado de petróleo, generadores de aire caliente a base de diésel con una potencia térmica de 31000 Kcal/h y calderas de biomasa con una potencia térmica de 8000 Kcal/h.

2.2. Producción de pollinaza

La cantidad y disponibilidad de biomasa son factores cruciales en el momento de determinar la producción de biogás. La estimación de pollinaza se torna más complicado en comparación con otros tipos de residuos ganaderos, esto debido al rápido crecimiento de los broiler. La American Society of Agricultural and Biological Engineers, sociedad profesional internacional dedicada a la ingeniería agrícola y biológica, menciona que las estimaciones típicas de estiércol son obsoletas debido a los cambios en la genética animal, estrategias de alimentación, alimentos disponibles y el rendimiento de producción, por tal motivo se ha desarrollado ecuaciones que consideran diferentes variables del proceso productivo de tal manera que se facilite la estimación de la cantidad de residuos avícolas (American Society of Agricultural Engineers, 2005).

Las Ecuaciones 1 y 2 permiten determinar la cantidad de excreciones de materia seca basándose en la ingesta de alimento, sin embargo, en la Ecuación 2 se consideran dos parámetros adicionales como son la mortalidad y retirada de pollos (American Society of Agricultural Engineers, 2005; Castelló, 2018).

$$DM_E = FI * 0.88 * (1 - DM_{RF}) \quad (1)$$

Donde: DM_E → Excreción de materia seca

FI → Ingesta de alimento

0.88 → Conversión ingesta – excreción

DM_{RF} → Factor de retención para la materia seca

$$E = \frac{(CIP-M)*IA*K}{2} + \sum_{X=1}^n \frac{(CAP_X-RP_X-M_X)*IA_X*K}{2} \quad (2)$$

Donde: E → Excreciones de materia seca

CIP → Cantidad ingreso de pollos

M → Mortalidad

IA → Ingesta de alimento

K → Conversión ingesta – excreción

CAP_X → Cantidad actual de pollos

RP_X → Retirada de pollos

En la presente investigación se aplicó la Ecuación 2, ya que al considerarse un mayor número de variables los resultados son más acordes al valor real. A la vez es importante mencionar que para determinar la cantidad total de pollinaza es necesario adicionar el valor correspondiente a la cantidad de material de cama (Yacija). Para determinar la cantidad de material de cama se empleó la Ecuación 3.

$$YF = YI * AN + YI * (\%h_f - \%h_i) \quad (3)$$

Donde: YF → Yacija final

YI → Yacija inicial

AN → Área de la nave

$\%h_f$ → Humedad final de la yacija

$\%h_i$ → Humedad inial de la yacija

La yacija inicial consiste en la cantidad de yacija por m² la cual varía de acuerdo con el tipo de material que se emplee. En el caso de la avícola en estudio se emplea cáscara de arroz, cuyo valor por m² es de 3Kg, además presenta una humedad inicial baja, en el orden del 5% (Garcés, 2017). En la Tabla 2.1 se presentan los valores calculados de pollinaza total y pollinaza por ave de las 4 naves de pollos de la granja Moquetes. Los galpones Moquetes Alto, Moquetes Bajo, San Antonio Alto y San Antonio bajo son nombrados nave 1, nave 2, nave 3 y nave 4 respectivamente.

TABLA 2.1. PRODUCCIÓN DE POLLINAZA EN LA GRANJA MOQUETES

Variabes	Unidades	Nave 1	Nave 2	Nave 3	Nave 4
Cantidad de pollos	24716	24000	24000	21000
Mortalidad	%	4,47	6,69	6,96	7,75
Excreciones	Kg materia seca	61583,61	55962,37	61442,36	48885,13
Cama	Kg	5535,00	5535,00	5535,00	5535,00
Pollinaza total	Kg	67118,61	61497,37	66977,36	54420,13
	Tm	67,12	61,50	66,98	54,42
Pollinaza por ave	Kg/pollo	2,72	2,56	2,79	2,59

Fuente: Elaborador por el autor

Los valores de pollinaza por ave obtenidos se asemejan a los valores descritos en las investigaciones realizadas por (Dalkılıç & Ugurlu, 2015; Deepanraj et al., 2014; Santos Dalólio et al., 2017; Tauseef et al., 2013).

2.3. Análisis proximal y elemental de pollinaza

El análisis proximal y elemental de la pollinaza se lo realizó en el laboratorio de biomasa del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), para lo cual se tomó una muestra de 150 gr de cada nave. En las Tablas 2.2 y 2.3 se muestran los valores obtenidos del análisis elemental y proximal.

TABLA 2.2. ANÁLISIS ELEMENTAL DE POLLINAZA

Muestras	C (% p/p)	H (% p/p)	O (% p/p)	N (% p/p)	S (% p/p)
Nave 1	35,73	10,09	30,92	4,32	0,04
Nave 2	34,06	11,44	33,32	3,32	0,34
Nave 3	27,16	14,8	37,03	4,61	0,56
Nave 4	28,48	14,9	34,34	4,09	0,32
Promedio	31,35	12,80	33,90	4,08	0,31

Fuente: Elaborado por el autor

TABLA 2.3. ANÁLISIS PROXIMAL DE POLLINAZA

Muestras	Humedad (%)	Cenizas (%)	ST (%)	SV/ST (%)
Nave 1	30,39	18,90	69,61	81,10
Nave 2	22,90	17,52	77,10	82,48
Nave 3	27,62	15,84	72,38	84,16
Nave 4	30,53	17,87	69,47	82,13
Promedio	27,86	17,53	72,14	82,46

Fuente: Elaborado por el autor

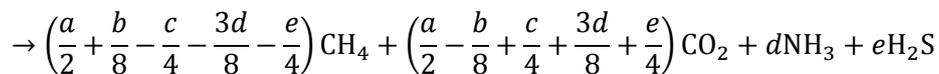
2.4. Estimación teórica de producción de biogás

Los modelos teóricos son alternativas para estimar la producción de biogás especialmente en los casos que no se tiene acceso a instalaciones de laboratorio. Los modelos teóricos se caracterizan por ser rápidos, sin embargo, no pueden representar una imagen realista del PBM ya que a menudo es más alto que el valor de metano medido (Jingura & Kamusoko, 2017), esto debido principalmente a que los modelos teóricos consideran que todo el contenido de materia es biodegradable y que el uso de los microorganismos como fuente de energía es insignificante (Cardenas, Parra, Torres, & Vázquez, 2016).

La estimación teórica de metano se puede realizar mediante tres métodos, en base a la composición elemental, composición química y demanda química de oxígeno (Jingura & Kamusoko, 2017). En el presente trabajo se consideró el método basado en la composición elemental del sustrato, ya que se cuenta con los resultados del análisis de laboratorio mencionados en la sección anterior.

Con los valores de la composición de la pollinaza obtenidos mediante el análisis elemental es posible obtener la fracción de los elementos que componen el biogás y predecir la cantidad de metano a partir de la fórmula estequiométrica desarrollada por Buswell y Hatfield en 1936 y posteriormente modificada por Boyle en 1952 el cual incluye los valores de nitrógeno y azufre (Achinas & Euverink, 2016; Tchobanoglous et al., 2014).

La fracción de metano, dióxido de carbono, amoníaco y sulfuro de hidrogeno en el biogás se determina a partir de la Ecuación 4, mientras que el potencial teórico bioquímico de metano (TBMP) del material se calcula a partir de la Ecuación 5.



$$TBMP \left(\frac{mlCH_4}{gVS}\right) = \frac{22.4 \times 1000 \times \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}\right)}{12.017a + 1.0079b + 15.999c + 14.0067d + 32.065e} \quad (5)$$

Donde: 22.4 → Volumen (L) ocupado por un gas ideal a condiciones estándar de temperatura (273K) y presión (1atm)

1000 → Factor de conversión del volumen de l a ml

a, b, c, d, e → Numero de moles de del carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre,

respectivamente

12.017, 1.0079, 5.999, 14.0067, 32.065 → Peso molar del carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, respectivamente

Los valores calculados de TBMP de la nave 1, nave 2, nave 3 y nave 4 fueron de 590,93; 604,08; 601,39; 650,40 mlCH₄/gSV respectivamente, lo que da como resultado un valor promedio de 611,70 mlCH₄/gSV, mientras que la fracción de metano, dióxido de carbono, amoniaco y sulfuro de hidrogeno en el biogás se muestran en la Tabla 2.4.

TABLA 2.4. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

Compuesto	Nave 1	Nave 2	Nave 3	Nave 4	Promedio
CO ₂	40,55	33,10	0,13	0,00	18,45
CH ₄	51,94	60,21	86,57	89,64	72,09
NH ₃	7,48	6,41	12,62	10,98	9,37
H ₂ S	0,03	0,28	0,67	0,40	0,34
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaborado por el autor

La producción teórica bioquímica de metano es un factor indispensable para calcular el volumen de metano producido por una determinada cantidad de pollinaza. Como menciona Sánchez, Laines, Sosa, & Montero (2015), el volumen de biogás puede ser determinado mediante la Ecuación 6.

$$V_{CH_4} = BO * SVT * \left(1 - \frac{K}{U * (RTH - 1 + K)}\right) \quad (6)$$

Donde: V_{CH_4} → Volumen de metano producido m³/día

SVT → Contenido de sólidos volátiles totales (Kg)

BO → Potencial de producción de metano (m³CH₄/Kg SVT)

K → Descomposición de los sólidos volátiles en el tiempo (adimensional)

U → Crecimiento de la producción de metano con el cambio de temperatura por día

TRH → Tiempo de retención (días)

Los factores K y U se obtienen de las ecuaciones 7 y 8 respectivamente.

$$K = 0.6 + 0.0006 * e^{(0.1185*VS)} \quad (7)$$

$$U = 0.013 * TC - 0.129 \quad (8)$$

Donde: TC → Temperatura de operación del digestor (°C)

En la Tabla 2.5 se presentan los resultados obtenidos, para lo cual se consideró una temperatura de 35 °C (mesofílico) y un tiempo de retención de 65 días.

TABLA 2.5. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Muestra	PTBM (m ³ CH ₄ /KgSV)	SV (Kg)	K	U	V CH ₄ (m ³ /h)	Biogás (m ³ /h)
Nave 1	0,59	688,92	9,55	0,32	10,20	19,65
Nave 2	0,60	711,04	11,14	0,32	9,75	16,20
Nave 3	0,60	741,80	13,46	0,32	8,67	10,02
Nave 4	0,65	564,54	10,71	0,32	8,56	9,55
Total	0,61	2706,31	11,21	0,32	37,62	52,18

Fuente: Elaborado por el autor

2.5. Producción de biogás en digestor

Para determinar la producción del biogás se construyó un biodigestor experimental, el cual consiste en un contenedor cerrado herméticamente con una capacidad de 10 litros, una llave para la salida del sustrato y un ducto con una llave de paso para la salida del biogás, tal como se muestra en la Figura 12.



Fig.12. Biodigestor experimental
Fuente: Elaborado por el autor

El digester fue alimentado con una mezcla de 1,5 Kg de pollinaza y 6 litros de agua, el tiempo de retención hidráulica fue de 32 días durante los cuales se realizó dos mediciones diarias de pH (8 AM – 7 PM). Además, se realizó mediciones del contenido de metano, dióxido de carbono, oxígeno, y ácido sulfhídrico en el biogás mediante un medidor de biogás portátil IRCD4. El digester operó a temperatura ambiente. En la Figura 13 se presentan las mediciones de pH realizadas durante los 32 días.

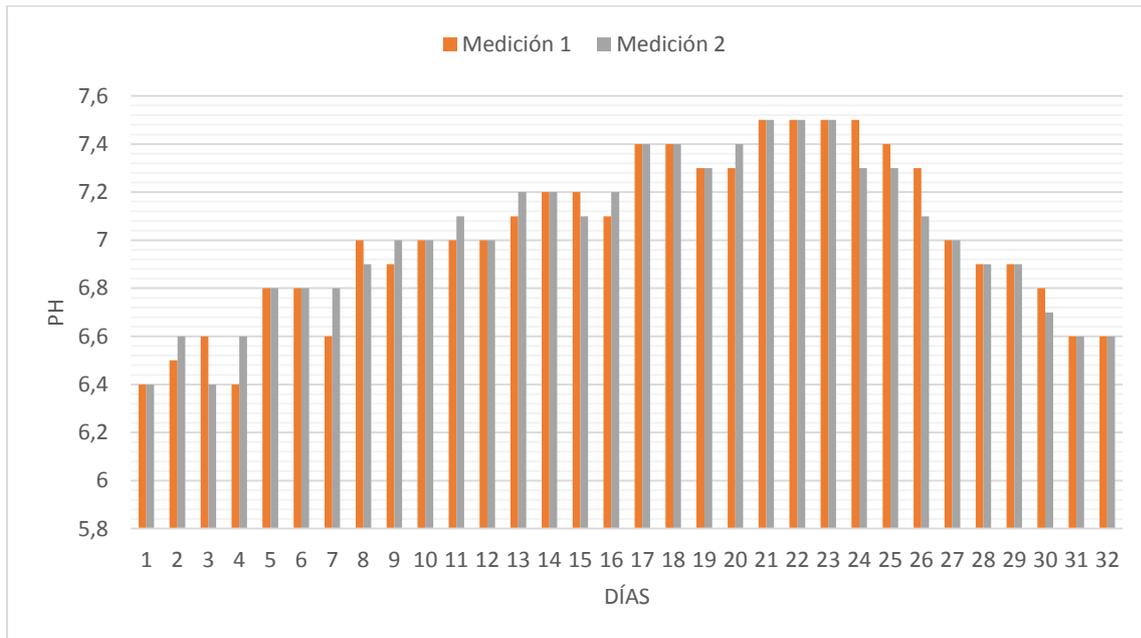


Fig.13. pH del sustrato
Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 12 se observa que durante los primeros 7 días el valor de pH oscila entre 6.4 y 7.0, rango en el cual se lleva a cabo el inicio de la acción microbiana. Durante este periodo la producción de biogás fue baja. A partir del octavo día hasta el día 27 el valor de pH toma valores entre 7.0 y 7.5, dicho rango es el óptimo para la acción metanogénica. Durante este periodo la producción de biogás aumento hasta alcanzar valores máximos. En los últimos 5 días el valor de pH disminuyó lo que se ve representado en la disminución de biogás y con ello en la finalización del proceso anaerobio.

Los valores correspondientes a la composición del biogás obtenidos con el medidor IRCD4 se presentan en la Tabla 2.6.

TABLA 2.6. CONTENIDO DE METANO

Día	Parámetro		
	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	H ₂ S (ppm)
Día 6	52	48	1130
Día 10	49	51	1323
Día 13	50	50	1310
Día 16	48	52	950
Día 19	46	54	1006
Día 22	44	56	1017
Día 25	43	57	2120
Día 29	60	40	1983

Fuente: Elaborado por el autor

En la Tabla 2.6 se observa que en el día 6 el contenido de metano es inferior al 50 %, esto se debe principalmente a que durante los primeros días la acción metanogénica es baja. Las mediciones realizadas entre los días 10 al 25 presentaron un mayor contenido de metano en el biogás, obteniéndose valores sobre el 50%, el valor máximo obtenido fue del 57% de metano. El día 29 el contenido de metano rebajo al 40% debido a que el proceso anaerobio se encontraba en la etapa final.

CAPITULO 3

Factibilidad técnica-económica

El proyecto planteado consiste en la generación de energía eléctrica y térmica a partir del biogás proveniente del proceso anaerobio de pollinaza. El análisis técnico de la planta comprende tres etapas principales: Sustrato, producción de biogás y generación de energía eléctrica y térmica. En la Figura 14 se muestra un esquema de las tres etapas.

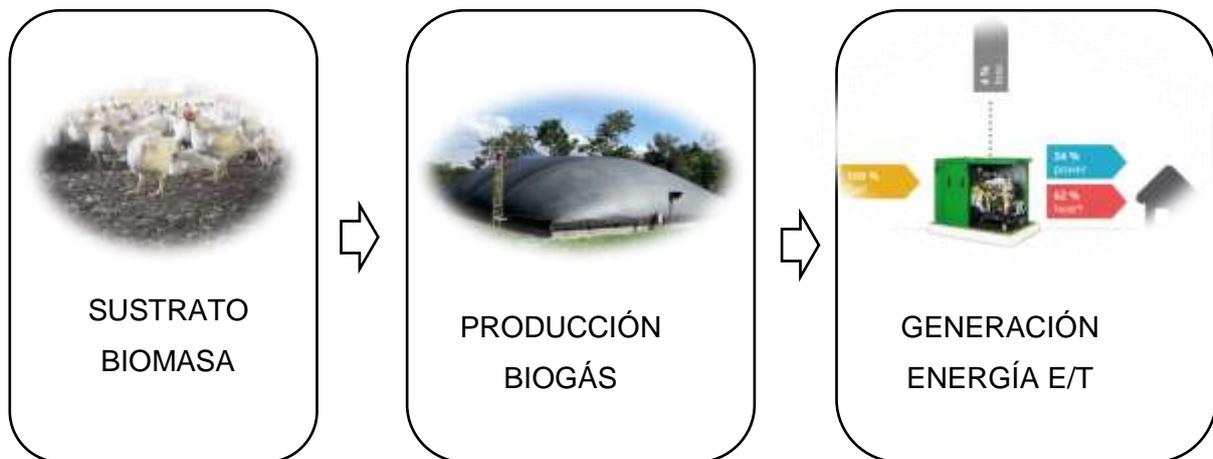


Fig.14. Etapas generación de energía eléctrica y térmica
Fuente: Elaborado por el autor

A continuación, se describe a detalle las tres etapas.

3.1. Sustrato

El sustrato es la materia prima de los digestores para la producción de biogás, el cual es usado como combustible para la operación del grupo electrógeno para generar energía eléctrica y térmica. Por tal motivo esta etapa se considera la más importante dentro del análisis técnico.

El sustrato es la base para el diseño de la planta de biogás, en el capítulo II se describió la producción, características físicas y químicas y producción de biogás de la pollinaza.

3.2. Producción de biogás

Una vez definido las características del sustrato se dimensiona la planta de biogás. El dimensionamiento de la planta consiste en la determinación de los volúmenes de las siguientes estructuras.

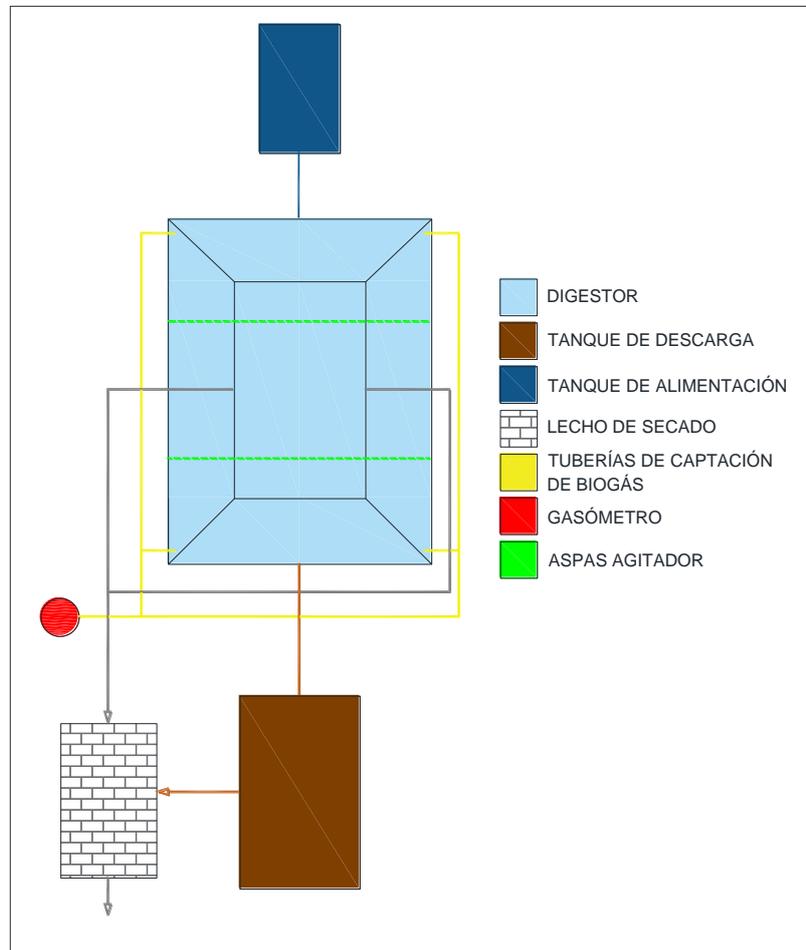


Fig.15. Planta de producción de biogás
Fuente: Elaborado por el autor

- Digestor
- Tanque de alimentación
- Sistema de alimentación
- Tanque de descarga
- Sistema de agitación
- Tuberías de captación y conducción de biogás
- Tanques de almacenamiento de biogás

A continuación, se describe cada una de las partes que conforman la planta.

3.2.1. Digestor

El biodigestor es la parte principal de la planta por lo que el correcto dimensionamiento del digestor es la clave para el diseño de las demás partes que conforman la planta. Para el dimensionamiento del biodigestor se considera el flujograma propuesto por la empresa alemana Aqualimpia Engineering (Figura 16).

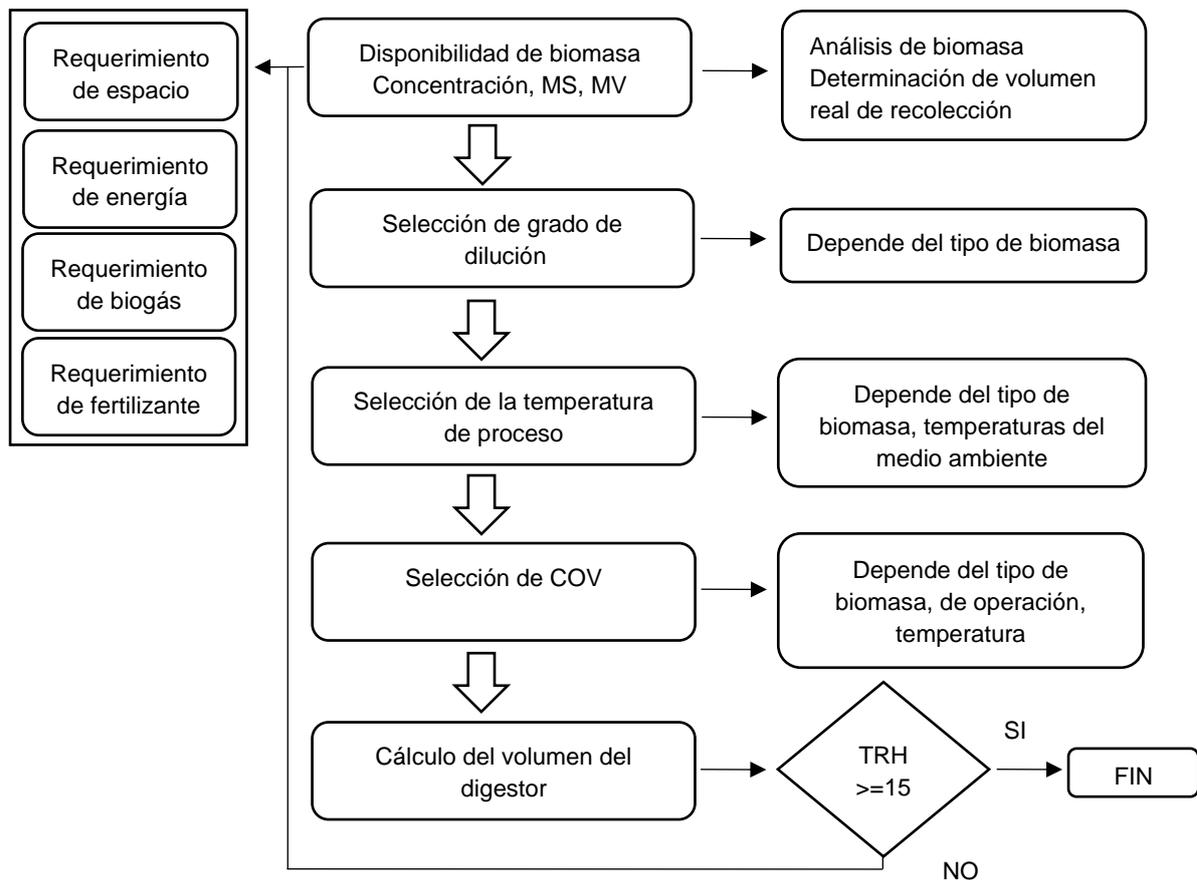


Fig.16. Flujograma para dimensionamiento de biodigestores
Fuente: Elaborado por el autor

A continuación, se describen los parámetros a considerar para el diseño del biodigestor.

3.2.1.1. Disponibilidad de biomasa

En la avícola Megaves el proceso productivo de pollos de engorde tiene una duración de 55 días, considerando desde el día de ingreso hasta el día que se vacía el galpón completamente. Una vez transcurrido el proceso de crianza se vacía la pollinaza en su totalidad, esta actividad tarda 5 días. Además de los periodos mencionados hay que considerar el tiempo que tarda en iniciar el siguiente ciclo (8 días) y la diferencia de tiempo

entre naves (5 días). Mediante los datos descritos se determina que en el año se tiene 5 ciclos productivos, con una producción de 1250 toneladas de pollinaza.

Una vez obtenido el volumen real de recolección se determina la cantidad de sólidos totales y sólidos volátiles contenidos en la materia prima. La cantidad de sólidos totales y sólidos volátiles se determina mediante la Ecuación 9 y 10 respectivamente.

$$ST = \frac{\%ST * M}{100} \quad (9)$$

$$SV = \frac{\%SV * M}{100} \quad (10)$$

Donde: %ST → Porcentaje de sólidos totales en la carga o materia prima

%SV → Porcentaje de sólidos volátiles en la carga o materia prima

M → Materia prima para la alimentación del biodigestor Kg/d

3.2.1.2. Grado de dilución

La pollinaza se caracteriza por contener elevadas cantidades de amoníaco y como se mencionó en el capítulo I es un factor crítico que puede llevar a la inhibición del proceso por tal motivo se debe buscar alternativas para reducir el nivel de amoníaco para que este no actúe como resistencia para la producción de biogás. El amoníaco puede ser reducido mediante tres métodos: un proceso de reciclaje de biogás, que consiste en un lavado o filtro con diferentes compuestos químicos a base de nitrógeno; mediante co-digestión que consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con el fin de aprovechar la complementariedad de las composiciones (J. González & Violante, 2017) y mediante la mezcla de la excreta con agua donde la pollinaza debe estar entre el 5 al 20% del total del recipiente (Aguilar, 2017).

La co-digestión es la técnica más empleada a nivel mundial gracias a las múltiples ventajas que presenta, permite optimizar los parámetros de operación (temperatura, pH, velocidad de carga, etc.), mantener la estabilidad de la digestión anaerobia y por ende aumentar el rendimiento de producción de biogás (Böjti et al., 2017; Hagos et al., 2017; Kwietniewska & Tys, 2014; Miah et al., 2016), sin embargo en el estudio se consideró la mezcla de la pollinaza con agua ya que en comparación con el filtro de amoníaco resulta más económico y para la co-digestión no se dispone de la cantidad de residuos necesarios para mezclar con la pollinaza producida.

La mezcla del agua con la materia prima debe generar una suspensión con la consistencia requerida. La producción de biogás es ineficiente si la suspensión es demasiado diluida o demasiado espesa. La concentración óptima de sólidos puede variar de 7 a 25% dependiendo

de la materia prima (Cowley & Brorsen, 2018; Deepanraj et al., 2014; Kwietniewska & Tys, 2014), para el caso de la pollinaza el porcentaje adecuado es del 10%.

La masa de agua requerida para disolver la materia prima se obtiene mediante la Ecuación 11.

$$M_{H_2O} = \frac{M_i \times \%ST_i}{\%ST} - M_i \quad (11)$$

Donde: $\%ST$ → Porcentaje de sólidos totales

M_i → Masa de la materia prima i

$\%ST_i$ → Porcentaje de sólidos totales de la materia prima i

M_{H_2O} → Masa de agua agregada i

Al momento de determinar la proporción de agua se debe considerar que el valor de la tasa de carga orgánica se encuentre dentro de los rangos mencionados en la sección 1.3.2.

3.2.1.3. Temperatura del proceso

Como se mencionó en el Capítulo I, la digestión anaerobia puede llevarse a cabo en tres rangos, psicrófilico, mesófilico y termófilico. En el presente estudio se considera una temperatura de 35 °C, para lo cual será necesario la incorporación de un sistema de calefacción debido a que la temperatura ambiente de la parroquia Ascázubi es de 15 °C.

Los sistemas de calefacción están compuestos por una red de tuberías a través de las cuales circula agua caliente en el interior del digester. Como norma general se tiene que el sistema de calefacción debe cubrir 1/3 del digester (Estella, 2016). Para determinar el calor requerido para mantener una temperatura establecida en el interior del digester se emplea la Ecuación 12.

$$Q = \dot{m} \times C_{P_{\text{estiercol}}} \times (T_{\text{requerida}} - T_{\text{inicial}}) \quad (12)$$

Donde: Q → Calor requerido J/d

\dot{m} → Flujo de alimentación Kg/d

$C_{P_{\text{estiercol}}}$ → Calor específico del estiércol J/Kg

$T_{\text{requerida}}$ → Temperatura requerida de operación

T_{inicial} → Temperatura inicial del estiércol

3.2.1.4. Carga orgánica volumétrica (COV)

El valor de COV depende de la temperatura interna del biodigestor y del tiempo de retención hidráulica. El COV es el factor que determina la carga del digestor, si el sustrato está muy diluido las bacterias no tienen suficiente alimento para vivir y si el sustrato presenta exceso de sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos (Deepanraj et al., 2014; Jain et al., 2015). El COV se determina mediante la Ecuación 13.

$$\text{COV} = \text{SV}_i / V_d \quad (13)$$

Donde: $\text{SV}_i \rightarrow$ Sólidos volátiles en el efluente (Kg/d)

$V_d \rightarrow$ Volumen del digestor m^3

El tiempo de retención hidráulico (TRH) viene dado por la Ecuación 14.

$$\text{HRT} = V_d / \text{COV} \quad (14)$$

Donde: $V \rightarrow$ Volumen del digestor

3.2.1.5. Volumen del digestor

Una vez establecidos los parámetros anteriores se determina el volumen del digestor mediante la fórmula 16.

$$C = M + M_{\text{H}_2\text{O}} \quad (15)$$

$$V_d = C \times \text{TRH} \quad (16)$$

Donde: $C \rightarrow$ Carga para alimentar el biodigestor

En la granja Moquetes se tiene una producción de pollinaza de 250.000 Kg / ciclo, en la Tabla 2.1 se mostraron los datos a detalle. Aplicando las fórmulas descritas se tiene que el volumen requerido del biodigestor considerando un margen de seguridad del 2% es de 2.174,16 m^3 . En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros calculados para el diseño del biodigestor.

TABLA 3.1. PARÁMETROS DISEÑO BIODIGESTOR

Parámetros	Unidades	Valor
Producción total de pollinaza	Kg / d	4.545,70
Contenido de sólidos totales	Kg / d	3.279,26
Contenido de sólidos volátiles	Kg / d	2.704,11
Volumen de agua adicional	m^3	28,24
Volumen total de afluente	m^3 / d	32,79
Carga orgánica volumétrica	Kg / $\text{m}^3 \cdot \text{d}$	1,24
Volumen requerido de biodigestor	m^3	2.131,53
Volumen seleccionado de biodigestor	m^3	2.174,16

Fuente: Elaborado por el autor

En el Capítulo I se describió los tipos de biodigestores empleados para el tratamiento de estiércol, para el caso de estudio se seleccionó un biodigestor tipo laguna bajo tierra. El dimensionamiento de las estructuras que conforman la planta de biogás se realizó en el software Biodigestor Pro desarrollado por la empresa alemana Aqualimpia Engineering. Las dimensiones de las estructuras que se detallan a continuación se presentan en metros. En la Figura 17 se presenta la implantación de la planta de biogás.

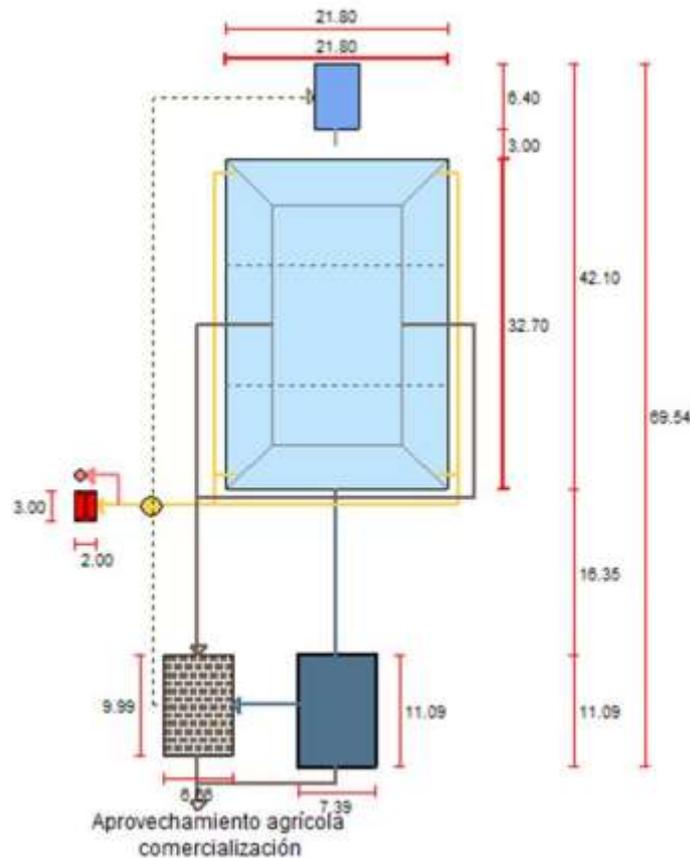


Fig.17. Implantación planta biogás

3.2.2. Tanque y sistema de alimentación

Los tanques de alimentación se dimensionan para el volumen diario de alimentación al digestor, en nuestro caso será de 32,79 m³ por día. Con el fin de reducir costos de construcción el tanque de alimentación estará ubicado en una parte más elevada que el digestor para que la alimentación sea por gravedad, tal como se muestra en la Figura 18.

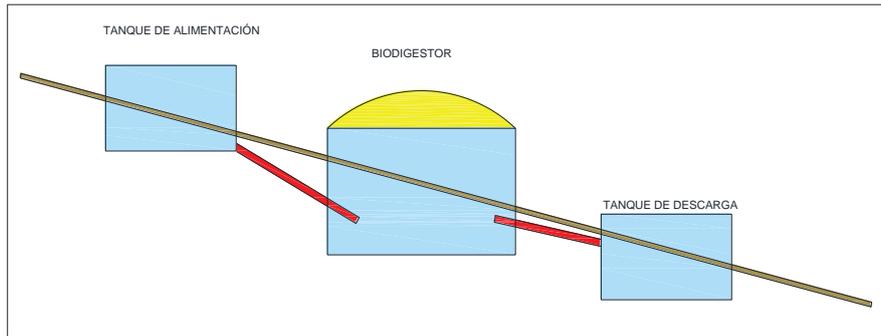


Fig.18. Esquema topográfico para la construcción del biodigestor

3.2.3. Tanque de descarga

El tanque de descarga se dimensiona para que almacene el biol o fertilizante que se descarga del digester. Para su dimensionamiento es necesario conocer el balance de masas en el proceso anaerobio, como es conocido la mayor parte de sólidos volátiles se degrada para la producción de biogás por lo que se obtiene una reducción del volumen de carga (Corporación Alemana en Chile, 2012), sin embargo, es recomendable que para el cálculo del tanque de descarga y por razones de seguridad no se considere esta reducción.

En las Figuras 19 y 20 se presenta el dimensionamiento de las tuberías y los tanques de alimentación y descarga.

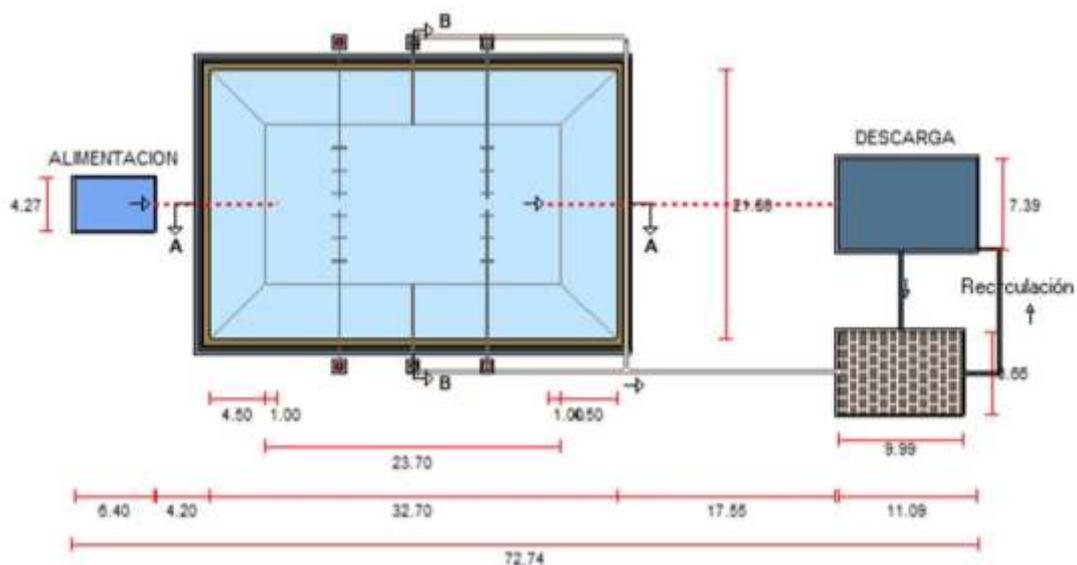


Fig.19. Esquema de alimentación y descarga

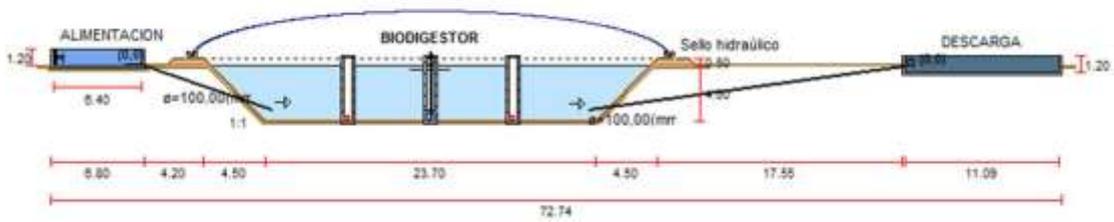


Fig.20. Tuberías de alimentación y descarga (Corte A-A)

3.2.4. Lecho de secado de lodos

En el trabajo realizado por Moncayo (2013) menciona que:

El dimensionamiento del lecho de secado de lodos se lo realiza en base a la cantidad de lodos que se extraen del digestor y a la tasa de aplicación de lodos (TAL) que se aplica al lecho en Kg/m² de área. La tasa de aplicación de lodos depende de la temperatura del medio ambiente y de la evaporación. Para climas fríos con temperaturas ambientales promedio a 21°C la TAL es de aproximadamente 25 Kg/m². Para temperaturas ambientales mayores a 21 °C y que alcanzan picos de hasta 30 °C la TAL puede llegar hasta 50-100 Kg/m².

En la Figura 21 se muestra la disposición del sistema para la extracción de lodos hacia el lecho de secado de lodos.

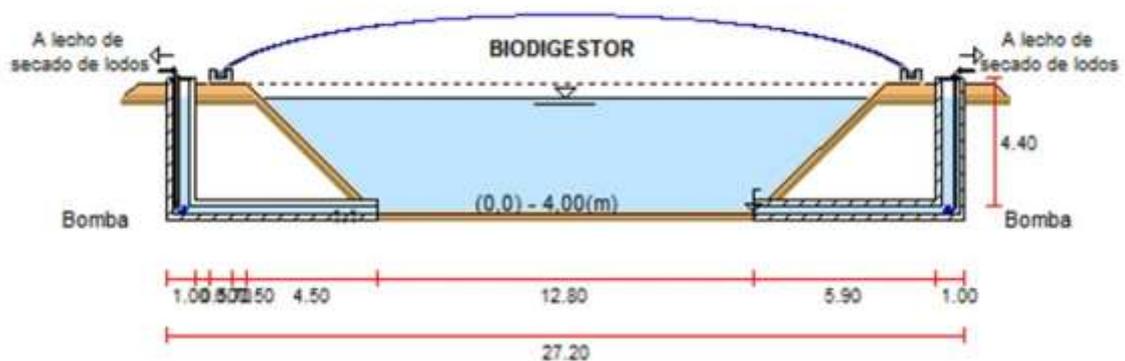


Fig.21. Descarga de lodos

En la Tabla 3.2 se presenta un resumen del dimensionamiento de las estructuras descritas anteriormente.

TABLA 3.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAS

Estructura	Cantidad	Volumen (m ³)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)
Biodigestor	1	2174	32,70	21,80	4,50
Tanque de alimentación	1	32,79	6,40	4,27	1,20
Tanque de descarga	1	98,37	11,09	7,39	1,20
Lecho de secado de lodos	1	33,26	9,99	6,66	0,50

Fuente: Elaborado por el autor

3.2.5. Sistema de agitación

En la sección 1.3.2. se mencionó los parámetros que influyen en la digestión anaerobia, entre los cuales se encuentra el proceso de agitación o mezclado, el cual tiene como principal función optimizar la producción de biogás, sin embargo, a pesar de ser uno de los factores claves para obtener una mayor producción de biogás existe poca información disponible para la elección óptima de los agitadores y su configuración en los digestores, los intervalos de mezcla y el tiempo requerido para una homogeneización óptima (Low, 2014).

La agitación en el digestor se puede llevar a cabo mediante mezcla por recirculación, mezcla por gases y mezcla mecánica. Los sistemas de mezcla de recirculación utilizan bombas mecánicas montadas en el exterior del digestor para eliminar los sedimentos del digestor y volver a inyectarlo en otro punto del digestor; los sistemas de mezcla por gases recolectan el biogás generado en la parte superior de los digestores, lo comprimen y luego se vuelve a introducir en la parte inferior de digestor ya sea a través de difusores (sistemas no confinados) o tubos confinados (Sindall, 2014) y por último se tiene los sistemas de mezcla mecánicos los cuales consisten en uno o más impulsores giratorios montados en un eje que permiten generar el flujo en el interior del digestor (Dahiya, 2015).

De los tres sistemas de agitación mencionados el mecánico presenta un mejor rendimiento de producción de biogás y un menor requerimiento de potencia para generar el flujo en el interior del digestor. El sistema mecánico aumenta en un 30% el rendimiento de biogás en comparación con el 22% y 15% que presentan los sistemas de mezcla por recirculación y mezcla por gases respectivamente (Lemmer, Naegele, & Sondermann, 2013). La desventaja que presenta este técnica es que al tratarse de un sistema mecánico cuenta con piezas móviles susceptibles a daños por lo que es necesario realizar acciones de mantenimiento más frecuentes (Low, 2014).

Es importante mencionar que el sistema de agitación mejora el rendimiento del biogás cuando se opera con valores entre 10 y 15% de sólidos, en valores inferiores al 5% no se tiene mejoras en el rendimiento de biogás por lo tanto la producción es similar a la obtenida en biodigestores sin mezcla (Lemmer et al., 2013).

En el presente estudio se considera un sistema de mezcla mecánico mediante agitadores de flujo axial con impulsores propela bipala de 2500 mm de diámetro. Para la correcta operación del proceso es necesario determinar la potencia, intensidad (velocidad) y la duración de la mezcla. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. UU recomienda un rango de entrada de alimentación específico de 5 a 8 W / m³ (Low, 2014; Moreno et al., 2014). La selección de la velocidad de la mezcla es un factor crucial en el proceso de agitación, la inadecuada selección de velocidad puede perturbar los procesos biológicos provocando la falla en la operación del biodigestor. Se tiene como regla general que la agitación se debe realizar tanto como sea necesario pero lo menos posible (Dahiya, 2015).

La velocidad de rotación y los requisitos de potencia eléctrica varían en un amplio rango, con el aumento del diámetro del impulsor, las velocidades de rotación disminuyen con una tendencia hacia un menor requerimiento de potencia (Lemmer et al., 2013). En la Figura 22 se presenta los rangos de velocidad en función de la potencia y el diámetro del impulsor.

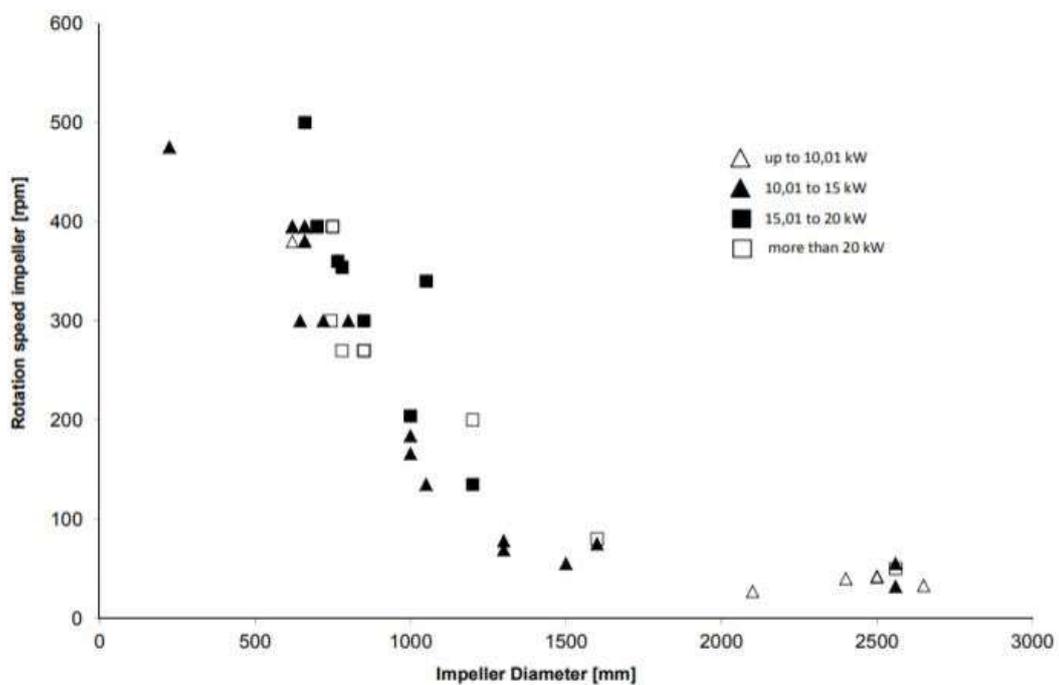


Fig.22. Velocidad del agitador a diferentes potencias y diámetro del impulsor
Fuente: (Lemmer et al., 2013)

Además de los parámetros a considerarse para determinar la velocidad del agitador es necesario considerar que la velocidad no produzca la inestabilidad del sistema. La relación FOS/TAC (conocido también como Ripley's ratio) es el principal indicador de la estabilidad del digestor, cuando el RR está por debajo de 0,3 se considera que el proceso de digestión es estable y cuando se encuentra sobre 0,8 se considera que el proceso es inestable. Cuando

más alto es el RR el digester es más inestable y presenta mayor riesgo de inhibición del proceso. El proceso es irreversible cuando RR supera los 3 (Sindall, 2014) .

En la investigación realizada por Sindall (2014) menciona: a velocidades entre 50 y 100 RPM durante la primer etapa del proceso el valor RR se encuentra entre 0,2 y 2,48; en la etapa media el valor de RR reduce a valores menores a 0,2 y en la etapa final a 50 RPM el valor de RR sube a 1 mientras que a 100 RPM el valor de RR sube sobre los 3 lo que representa la inhibición del proceso.

En la Figura 22 se observa que para un impulsor de 2500 mm de diámetro y una potencia de 5,42 kW la velocidad de rotación es de 50 rpm, cuya velocidad se encuentra dentro de los rangos para no provocar la inestabilidad del sistema.

Por último, es necesario determinar el tiempo de agitación. El agitador seleccionado se caracteriza por operar de manera intermitente a diferencia de otros tipos de agitadores como los sumergibles o de carrete que operan de manera continua. El tiempo de operación del agitador es de 8 y 28 minutos por hora (Lemmer et al., 2013).

En la Figura 23 se muestra la disposición de los agitadores en el biodigestor.

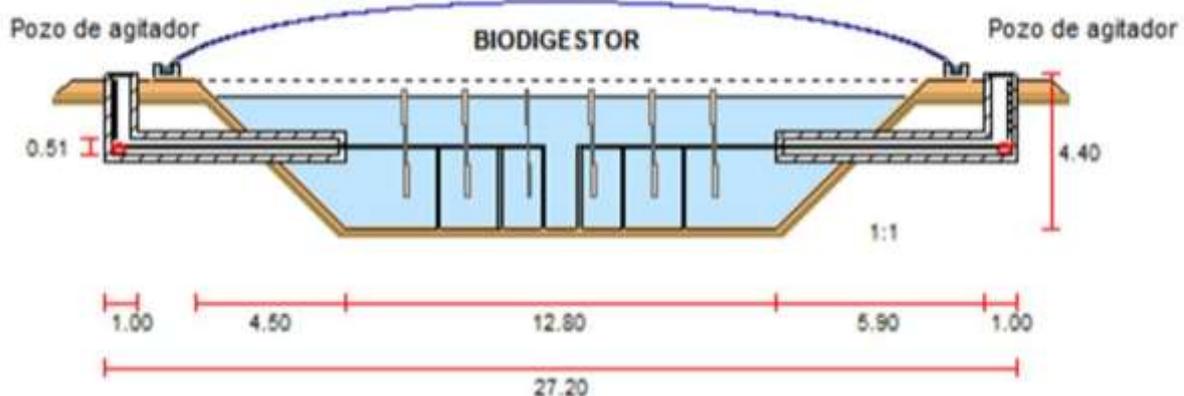


Fig.23. Sistema de agitación (Corte B-B)

3.2.6. Tuberías de captación y conducción de biogás

El número de tuberías a instalarse en el biodigestor para la captación y conducción del biogás se determina en base al volumen de producción de biogás mientras que el diámetro se determina en base a las velocidades máximas de conducción de cada tubería y al volumen de biogás que debe captar cada tubería (Moncayo, 2013). El dimensionamiento de las tuberías se presenta en la Figura 24.

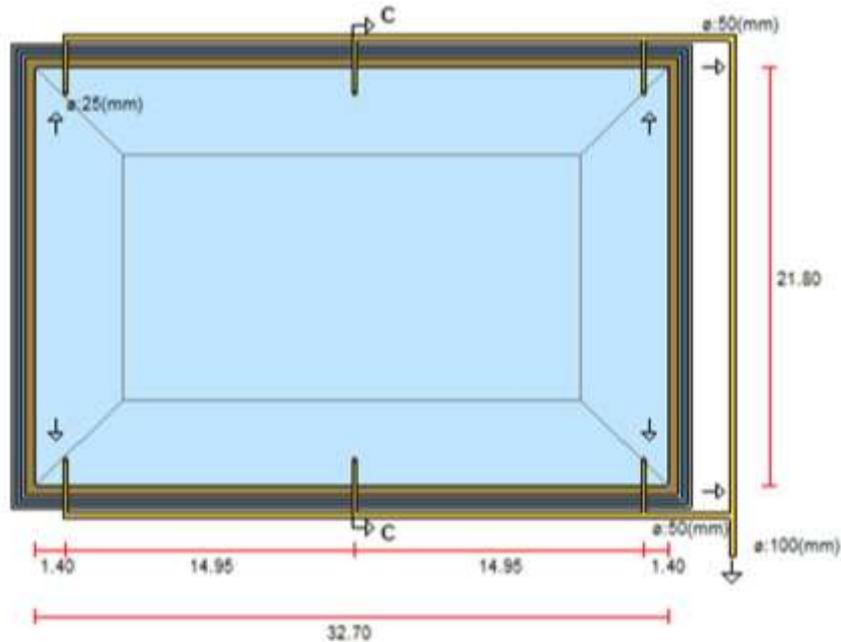


Fig.24. Captación y conducción del biogás

3.2.7. Tanques de almacenamiento de biogás

El volumen de almacenamiento de biogás se calcula en base a la producción de biogás y el consumo del grupo electrógeno. El digestor tipo laguna dispone de una cubierta para la producción diaria de biogás, para su dimensionamiento se considerará que la membrana debe cubrir por lo menos la producción de biogás de 4 horas. Para almacenar el biogás que no se consume en el día es necesario la incorporación de gasómetros externos.

Los gasómetros externos son depósitos fabricados en PVC, goma sintética, polietileno, acero fino y fibra de vidrio que están destinados para el almacenamiento del biogás remanente con el fin de brindar el respaldo suficiente para la operación del cogenerador (Labiano, 2014). El gas puede ser almacenado a baja, media y alta presión, para reducir el almacenaje se comprime a altas presiones (Chorkulak, 2016). El dimensionamiento del gasómetro viene dado por la Ecuación 17.

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (17)$$

Donde: V_1 → Volumen inicial del biogás

p_1 → Presión a la que sale el biogás del digestor

p_2 → Presión de almacenamiento

3.3. Generación de energía eléctrica y térmica

El biogás debe recibir un tratamiento previo antes de ser empleado en los sistemas de cogeneración, además debe disponerse de sistemas de control, monitoreo y seguridad. En la Figura 25 se muestra el proceso que se lleva a cabo para la generación de energía eléctrica y térmica.

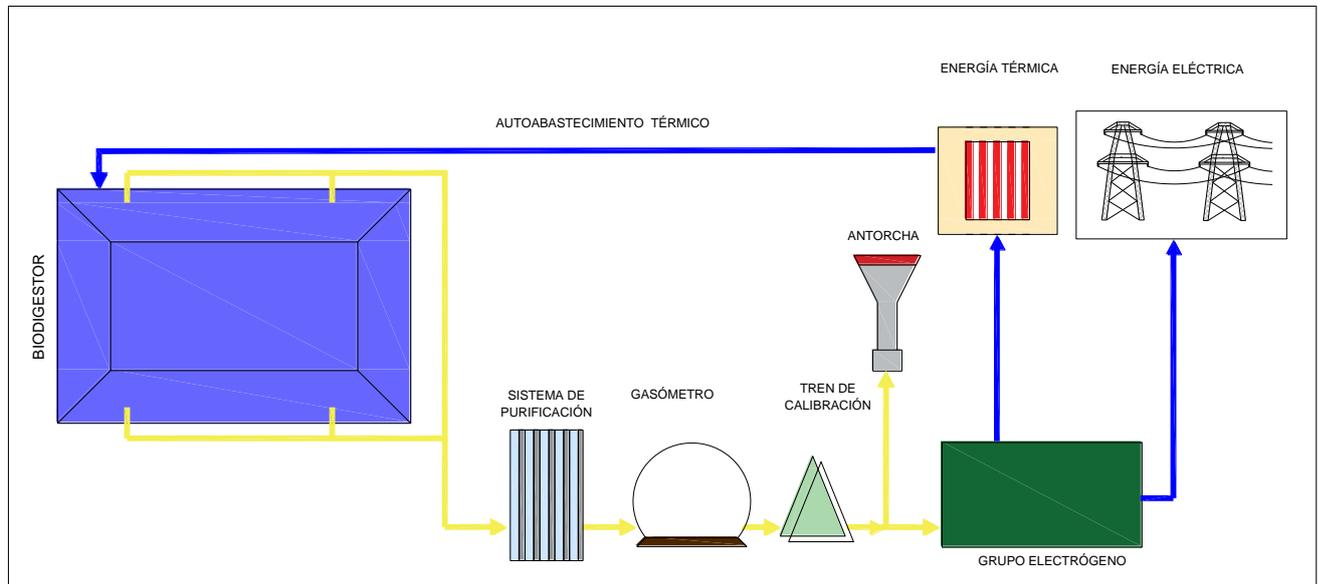


Fig.25. Proceso de cogeneración
Fuente: Elaborado por el autor

A continuación, se describen las etapas por las que debe pasar el biogás previo a su aplicación en el grupo electrógeno.

3.3.1. Purificación del biogás

La purificación de biogás es fundamental para el correcto funcionamiento de los equipos que conforman la planta de cogeneración, además permite aumentar la eficiencia y vida útil de los equipos. También es importante mencionar que la purificación del biogás es trascendental desde el punto de vista de la salud y del impacto ambiental. Los parámetros que deben acondicionarse son: remoción de CO₂, H₂O y H₂S

3.3.1.1. Remoción de dióxido de carbono (CO₂)

La remoción de CO₂ para aplicaciones en sistemas de cogeneración no es necesaria, sin embargo, favorece para aumentar la densidad y el valor calorífico del gas para cumplir con la calidad y especificaciones del Índice Wobbe. Las tecnologías actuales son: adsorción por oscilación de presión, absorción física (lavado con agua y disolventes orgánicos), absorción

química, separación criogénica, separación con membrana y enriquecimiento biológico de metano (Awe, Zhao, Nzihou, Minh, & Lyczko, 2017; Kaparaju & Rintala, 2013).

3.3.1.2. Remoción de agua (H₂O)

La presencia de agua en el biogás genera varios inconvenientes: reduce el valor calorífico, problemas al condensarse en gasoductos, motores, tuberías y al mezclarse con H₂S forma ácido sulfúrico (H₂SO₄) generando una corrosión severa del acero (Kaparaju & Rintala, 2013). El contenido absoluto de agua en el biogás depende de la temperatura (a 35 °C, el contenido de agua del biogás suele ser del 5%). Como norma general se tiene que cuanto más baja sea la temperatura menor será el contenido de agua en el biogás (Awe et al., 2017).

El vapor de agua puede ser eliminado a través de la correcta disposición de las tuberías, mediante condensación, adsorción en gel de sílice y Al₂O₃ a bajos puntos de rocío o por adsorción con glicol (Kaparaju & Rintala, 2013).

3.3.1.3. Remoción de sulfuro de hidrogeno / ácido sulfhídrico (H₂S)

El ácido sulfhídrico es un gas incoloro altamente tóxico, que al combinarse con el aire forma mezclas explosivas. Este gas posee un olor característico a huevos podridos y se percibe a baja concentración (0,05 hasta 500 ppm) (Reyes, 2018). Se produce a partir de la degradación de proteínas y otros compuestos que contienen azufre y las concentraciones varían entre 0,1 y 2% (Kaparaju & Rintala, 2013).

El H₂S es altamente corrosivo para los elementos de la planta (compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores) por lo que se torna necesario aplicar técnicas de remoción para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogás. (Moreno et al., 2014; Reyes, 2018) . El lavado de H₂S es imprescindible si la concentración es superior a 1000 ppm y debe ser eliminado del biogás o al menos reducido al 1% por volumen (Kaparaju & Rintala, 2013).

El H₂S puede ser eliminado mediante adsorción sobre carbones impregnados de KOH o KI (Aguilar, 2017). El carbón activado tiene una estructura y un área de superficie interna muy porosa, operan a temperatura ambiente y presión atmosférica, y convierten el H₂S en azufre elemental y agua mediante la reacción de Claus (Aguilar, 2017; Awe et al., 2017). También se utiliza para la remoción de otros contaminantes como siloxanos, terpenos o malos olores.

El filtro de biogás se dimensiona en base a la producción de biogás con lo que se tiene que la capacidad del filtro es de 56 m³/h.

3.3.2. Tren de calibración

Para aprovechar el biogás en cogeneradores se debe cumplir ciertas condiciones técnicas relacionados al volumen, contenido y calidad del CH₄, presión de servicio, seguridad y control. Si los parámetros no se cumplen los cogeneradores no operan de manera óptima o en el peor de los casos dejan de funcionar. Por lo tanto, para el aprovechamiento del biogás en cogeneradores es necesario instalar un tren de calibración de biogás para controlar la presión, medir el caudal del biogás, medir la concentración de CH₄, calibrar la presión de servicio, controlar el apagado del generador, cierre automático del paso del biogás, corta llamas, etc. (Moncayo, 2013). De manera general el tren de calibración debe cumplir con los siguientes requerimientos (Véase Figura 26):

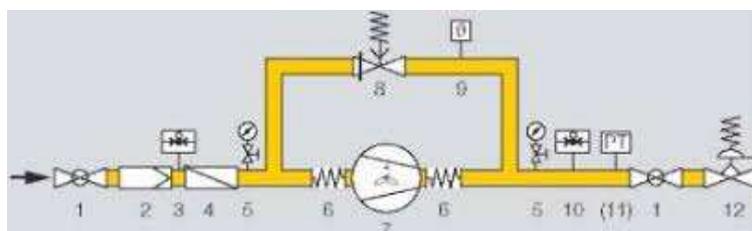


Fig.26. Elementos tren de calibración de biogás
Fuente: Aqualimpia

1. Válvula de cierre
2. Filtro de biogás
3. Sensor de presiones mínimas (vacío)
4. Manómetro
5. Válvula check (para biogás-bajas presiones)
6. Compensadores
7. Soplador ATEX (antideflagrante- anti chispa)
8. Reguladora de recirculación y descarga
9. Control de temperatura
10. Sensor de presiones máximas
11. Medición de presiones máximas y mínimas
12. Control de presión máxima de operación generador
13. Válvula anti-explosión

El soplador ATEX cumple un papel fundamental en el tren de calibración, ya que es el encargado de aumentar o disminuir la presión del biogás para el consumo del grupo electrógeno o para almacenar en los gasómetros. Para la selección del soplador se debe

conocer las especificaciones técnicas que debe cumplir el combustible para la operación óptima del motor de combustión interna y mediante estos datos seleccionar el equipo basándose en el diagrama caudal-presión (Ver anexo C).



Fig.27. Sopladores ATEX
Fuente: Aqualimpia

3.3.3. Aprovechamiento energético del biogás

El biogás tiene un alto poder calorífico para la generación de energía eléctrica y térmica en los grupos electrógenos. El poder calorífico del biogás varía en función al contenido de metano. Conociendo que 1 m³ de metano equivale a 34 MJ (9,44 kWh) se determina el poder calorífico del biogás (Chorkulak, 2016). Con el poder calorífico del biogás se calcula la producción de energía mediante la Ecuación 17.

$$E_{total}[\text{kWh}] = Q_{biogás} \times m \times PC \quad (17)$$

$$P_{nom}[\text{kWh}] = E_{total}/24 \quad (18)$$

Donde: E_{total} → Energía disponible por día

$Q_{biogás}$ → Cantidad diaria de biogás en m³

m → Fracción de metano en el biogas en %

PC → Poder calorífico

P_{nom} → Potencia nominal disponible

La potencia nominal es la base para determinar la capacidad eléctrica y térmica de la planta CHP. Previo a realizar los cálculos se debe tener en cuenta el balance energético del grupo electrógeno. En la Figura 28 se presenta el diagrama Sankey del balance energético propuesto por Hofmann (2016). El biogás alimentado al MCI es convertido en energía mecánica y térmica, la energía mecánica es transmitida a través del eje a un generador para para la generación de energía eléctrica. Por otro lado, gran parte de la energía térmica generada durante la operación del MCI puede ser recupera a través de intercambiadores de

calor para aplicaciones de calefacción con lo que se obtiene una mayor eficiencia global del grupo electrógeno.

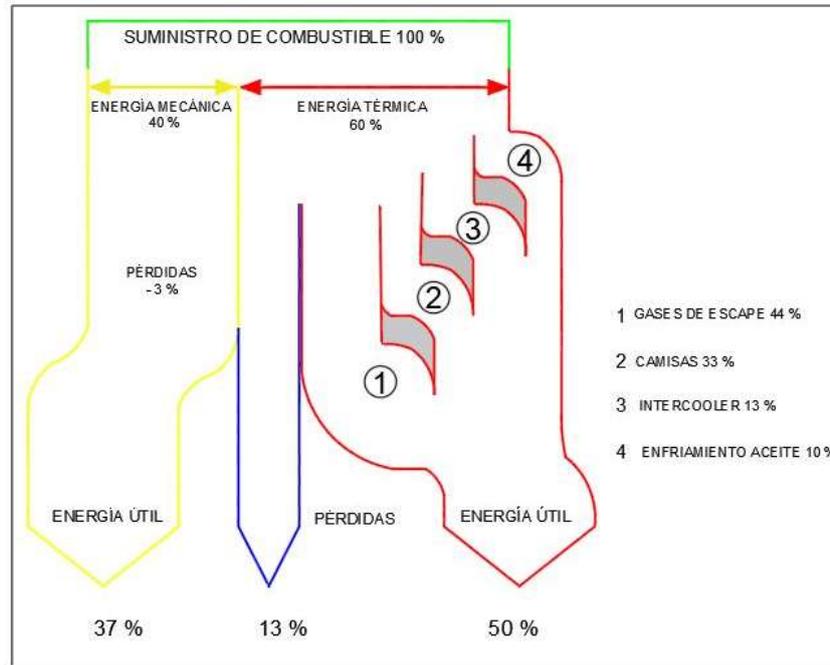


Fig.28. Balance energético CHP.
Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 28 se observa que la energía calorífica se obtiene de diferentes puntos del MCI. A continuación, se detalla cada punto de recuperación de calor (Hofmann, 2016; Mills, Pearce, Farrow, Thorpe, & Kirkby, 2011; Rutz, 2015).

Gases de escape: presentan una temperatura promedio de 400 °C y son el medio de mayor producción de energía térmica. Para su aprovechamiento se emplea un intercambiador de calor de gases de escape.

Calor de las camisas de agua: consiste en un circuito de refrigeración del bloque principal del motor, presenta temperaturas inferiores a 100 °C, sin embargo, algunos fabricantes operan a límites cercanos a 110 °C para evitar algunos efectos indeseables al quemar biogás.

Enfriador de aceite: mantiene la temperatura del aceite dentro de los límites operativos, generalmente opera en serie con el circuito de las camisas de agua. Presenta temperaturas entre 60 y 90 °C.

Intercooler: consiste en un intercambiador de calor que se asemeja a un radiador aire-aire o aire-agua que tiene como función enfriar el aire cargado antes de la combustión de tal manera que se reduzca la densidad del aire permitiendo que se queme más combustible. Presenta temperaturas entre 50 y 70 °C.

Con la recuperación de calor se tiene que el grupo electrógeno presenta una eficiencia global del 87%. El porcentaje restante corresponde a pérdidas que se generan por la interacción del motor-generador (3 %) y pérdidas de energía térmica que se atribuye al calor irradiado del motor y generador (10 %).

Una vez definido el balance energético del grupo electrógeno se determina la generación de energía eléctrica y térmica mediante las ecuaciones 19 y 20.

$$P_e[\text{kW}] = P_{\text{nom}} \times \eta_e \quad (19)$$

Donde: $P_e \rightarrow$ Potencia eléctrica

$\eta_e \rightarrow$ Eficiencia eléctrica (%)

$$P_t[\text{kW}] = P_{\text{nom}} \times \eta_t \quad (20)$$

Donde: $P_t \rightarrow$ Potencia térmica

$\eta_t \rightarrow$ Eficiencia térmica (%)

La producción de energía eléctrica y térmica anual se determina mediante las ecuaciones 21 y 22.

$$E_e[\text{kWh}] = P_e \times 0,85 \times 8760 \quad (21)$$

$$E_t[\text{kWh}] = P_t \times 0,85 \times 8760 \quad (22)$$

Donde: $E_e \rightarrow$ Energía eléctrica anual generada

$E_t \rightarrow$ Energía térmica anual generada

0,85 \rightarrow Disponibilidad de la planta

Aplicando las ecuaciones descritas se obtiene los valores que se muestran en la Tabla 3.3.

TABLA 3.3. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA

Parámetros	Unidades	Valor
Producción de biogás	m ³ / d	1.252,51
Contenido de gas metano	%	72,09
Potencial calorífico del biogás	kWh / m ³	6,8
Eficiencia total unidad de generación	%	80,6
Producción de energía total	kWh	6.139,95
Potencia nominal disponible	kW	255,83
Energía eléctrica		
Eficiencia eléctrica sistema generación	%	37
Generación de energía eléctrica	kWh	94
Energía calorífica		
Eficiencia calorífica	%	50
Generación de energía calorífica	kWh	128

Fuente: Elaborado por el autor

En la tabla 3.3 se presenta la generación de energía eléctrica y térmica utilizando el 100% de biogás generado, sin embargo, hay que considerar que la producción máxima de biogás inicia a partir del décimo día y decrece en los últimos 10 días, de esta manera se tiene que la producción máxima de biogás tiene una duración de 45 días, por tal motivo es indispensable almacenar el biogás necesario para abastecer los tiempos muertos, además hay que considerar el lapso entre proceso (Véase Figura 29).

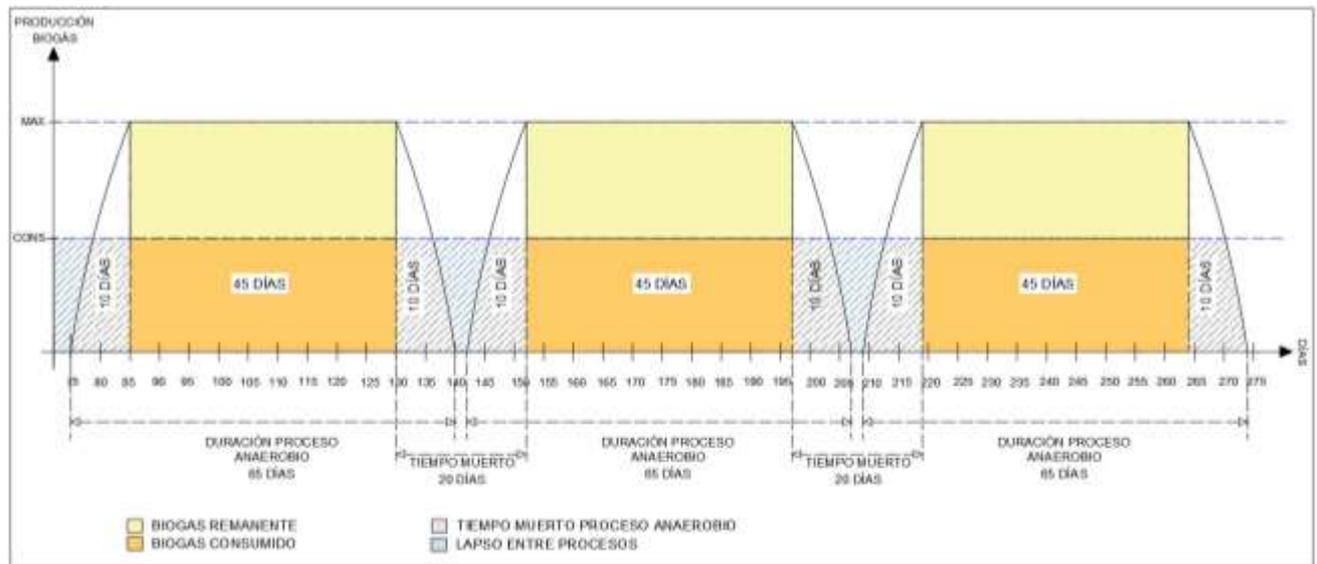


Fig.29 Ciclos de producción de biogás en el año.
Fuente: Elaborado por el autor

Durante el año se tiene cinco ciclos de producción de biogás. En la Figura 27 se observa que el TRH en el biodigestor es de 65 días, el lapso entre procesos es de 2 días con lo que se tiene que el biogás almacenado debe cubrir la demanda de planta de cogeneración durante 22 días.

3.3.4. Selección grupo electrógeno

Los grupos electrógenos están diseñados para operar dentro de unos rangos de potencia, para garantizar la correcta operación y evitar sobrecalentamiento y por ende la disminución del tiempo de operación los fabricantes recomiendan que se dimensione sobre el 30% de la potencia requerida. Considerando la producción de biogás y con el fin de garantizar la operación continua de la planta se seleccionó el grupo electrógeno AQL99 de 80 kW. El grupo electrógeno seleccionado incluye un interruptor de red, sistema de recuperación de calor, cubierta de insonorización y sistema de sincronización a la red.

En la Tabla 3.4 se presentan las características del grupo electrógeno para la generación de 60 kW.

TABLA 3.4. CARACTERÍSTICAS CHP AQL99

Parámetro	Unidades	Valor
Potencia eléctrica	kVA / kW	77,5 / 62
Potencia térmica útil	MBTU / h	275,97
	kW	80,88
Consumo de combustible	m ³ / h	34,1
Eficiencia eléctrica	%	37
Eficiencia térmica	%	50
Eficiencia total	%	87

Fuente: Elaborado por el autor

La planta CHP seleccionada cumple con los requisitos necesarios para suministrar energía eléctrica permanentemente. Por otra parte, la energía térmica útil es empleada para la calefacción del biodigestor, teniendo que la potencia requerida para el calentamiento del digestor es de 40,6 kW se tiene un calor residual de 40,28 kW que puede ser destinado para aplicaciones secundarias.

En la Tabla 3.5 se presenta el balance de energía para satisfacer la demanda del generador durante el tiempo muerto.

TABLA 3.5. CONSUMO ENERGÍA MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Parámetros	kWh / día	kWh / Ciclo
Energía total biodigestor	6.139,96	276.298,38
Consumo energía	4.011,89	180.535,27
Energía remante	2.128,07	95.763,15
Energía requerida tiempo muerto	4.011,89	88.261,58

Fuente: Elaborado por el autor

Además del consumo de biogás se debe tomar en cuenta la presión de entrada de gas al MCI. El grupo electrógeno AQL99 requiere una presión de entrada de gas de 1,5 – 5 Kpas, para la selección del soplador se considera la presión máxima. El soplador seleccionado para cumplir con los requisitos del MCI es un CL 20 HS de 75 mbar, con un motor de 0,28 kW; 60Hz; 3500 RPM.

Para almacenar el volumen de biogás que permita satisfacer los tiempos muertos es necesario la implementación de un recipiente de almacenamiento de gas externo. De la Tabla 3.5 se tiene que el requerimiento de energía para abastecer el tiempo muerto es de 88.261,58 kWh, sin embargo, para el dimensionamiento se considera la energía remanente 95.763,15 kWh,

kWh que equivale a 21.144 m³ de biogás. Mediante la Ecuación 17 se determina el volumen del gasómetro. Considerando que la presión del biogás a la salida del digestor es de 1,5 Kpa, la presión de almacenamiento es de 7,5 Kpa y las pérdidas son del 5% se tiene que el volumen del gasómetro es de 4000 m³.

3.3.5. Antorcha

Las antorchas se emplean para quemar el excedente de gas en casos de emergencias. Son construidas de acero inoxidable e incorporan en la misma unidad un medidor de caudal y un sistema corta llamas. El dimensionamiento de la antorcha se lo realiza en base a la producción de biogás con un coeficiente mínimo de 20% (Moncayo, 2013). La capacidad de la antorcha seleccionada es de 56 m³/h.

3.3.6. Localización de la planta

La ubicación de la planta se muestra en el Anexo D.

3.3.7. Acoplamiento de la planta a la red eléctrica de la granja

El presente estudio tiene como finalidad generar energía eléctrica para abastecer el consumo interno de la granja. Para la conexión del sistema eléctrico del generador al sistema eléctrico de la granja es necesario que los parámetros de salida del generador sean los mismos a los que opera la red privada de la granja. En la Tabla 3.6 se presentan los parámetros de operación del generador.

TABLA 3.6. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL GENERADOR

Parámetro	Valor	Unidades
Voltaje	480	V
Corriente	93	A
Velocidad	1800	RPM
Frecuencia	60	Hz
Factor de potencia	0,8	Cos φ
Fases	3P4W	

Fuente: Elaborado por el autor

La red eléctrica de la granja consiste en un sistema monofásico (120 V) de dos hilos más neutro, por tal motivo es necesario la implementación de un transformador reductor para que los parámetros del generador sean los mismos que los de la red. Para cumplir con los parámetros de la red se seleccionó un transformador reductor tipo seco E2H112S trifásico de

112,5 KVA, 60 Hz, 480 V primario, 120 V secundario, además cuenta con un TAP de 7 posiciones para la regulación de nivel de voltaje en el lado primario del transformador. A continuación, se presenta la configuración de la conexión eléctrica del transformador (Figura 30).

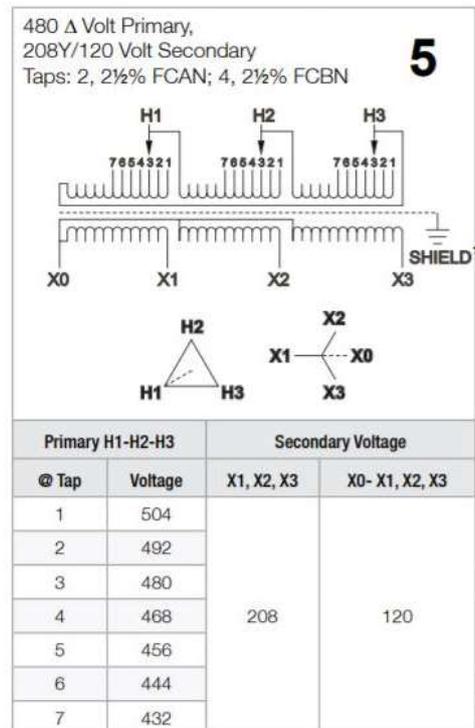


Fig.30. Diagrama de conexión del transformador
Fuente: <https://bit.ly/30EPUt2>

La granja Moquetes se abastece de energía eléctrica durante las 24 horas del día los 365 días del año por lo que el servicio de energía debe ser constante. Como ya es conocido la planta dispone de equipos mecánicos (grupo electrógeno, agitadores, sopladores, bombas) lo que conlleva a considerar tiempos de mantenimiento para la planta, sin embargo, para definir con exactitud los tiempos de mantenimiento se torna complicado ya que depende de las características técnicas de cada equipo, además, se debe realizar tareas de limpieza de la laguna una vez al año (Corporación Alemana en Chile, 2012), por lo cual se considera que la disponibilidad de la planta es del 85%.

Con el fin de garantizar la continuidad del servicio eléctrico la red interna de la granja estará conectada al grupo electrógeno y a la red pública, de tal manera que en los lapsos de mantenimiento o posibles fallas ingrese automáticamente la red pública para satisfacer la demanda interna, para esto es necesario la implementación de un tablero de transferencia automática. El grupo electrógeno AQL99 es una planta sofisticada que dispone de un

gabinete de control 9902 con un controlador DSE7320 para la transferencia automática / manual de cargas, control y monitoreo de los parámetros de operación del motor y generador.



Fig.31. Grupo electrógeno AQL con tablero de transferencia
Fuente: Aqualimpia

Para la transferencia de carga es necesario realizar el rediseño de la red eléctrica. El rediseño consiste en alargar la línea de media tensión hasta el lugar donde estará ubicada la planta, además se debe agregar un tramo de baja tensión para conectarse a la red privada de la granja (Véase Anexo E).

3.3.7.1. Descripción tablero de transferencia

El tablero de transferencia está compuesto por dos partes principales: parte de fuerza y parte de control (MODASA, 2015).

La parte de fuerza es la encargada de controlar el paso de la energía de la red comercial o la generada por el grupo electrógeno hacia las cargas. En la parte de fuerza del TTA se encuentra las siguientes partes: mando motor, mecanismo de enclavamiento, conmutador motorizado, transformador de corriente de medición, transformador de voltaje, supresor de picos, aisladores y platinas de cobre (fases, neutro, tierra). El módulo de control es el encargado de monitorear el suministro de red normal y transferir a la carga hacia el generador o desde el generador hacia la red. En la Figura 30 se presenta los controles que se dispone el en módulo DSE7320.



Fig.32. Módulo de control DSE 7320
Fuente: Elaborado por el autor

En el Anexo F se presenta el diagrama de conexión del tablero de transferencia.

3.3.8. Demanda de energía eléctrica

Para determinar si la planta se encuentra en la capacidad de abastecer el consumo de energía eléctrica se debe en primer lugar establecer cuál es la demanda propia de la misma, en la Tabla 3.7 se detalla el requerimiento de energía de la planta.

TABLA 3.7. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA DE LA PLANTA

Equipos	Unidades	Potencia total (kW)
Agitadores	4	21,7
Bombeo de lodos	2	4
Sopladores	1	0,28
Mezclador tanque alimentación	1	0,5
Otros	Global	1
Total		27,48

Fuente: Elaborado por el autor

En la Tabla 3.5 se observa que la demanda propia de la planta es de 27,48 kW, con lo que se tiene que la potencia disponible para la red de la granja es de 34,52 kW. Para determinar si el generador abastece la demanda se tomó el consumo de energía de los últimos 17 meses (Véase Figura 32).

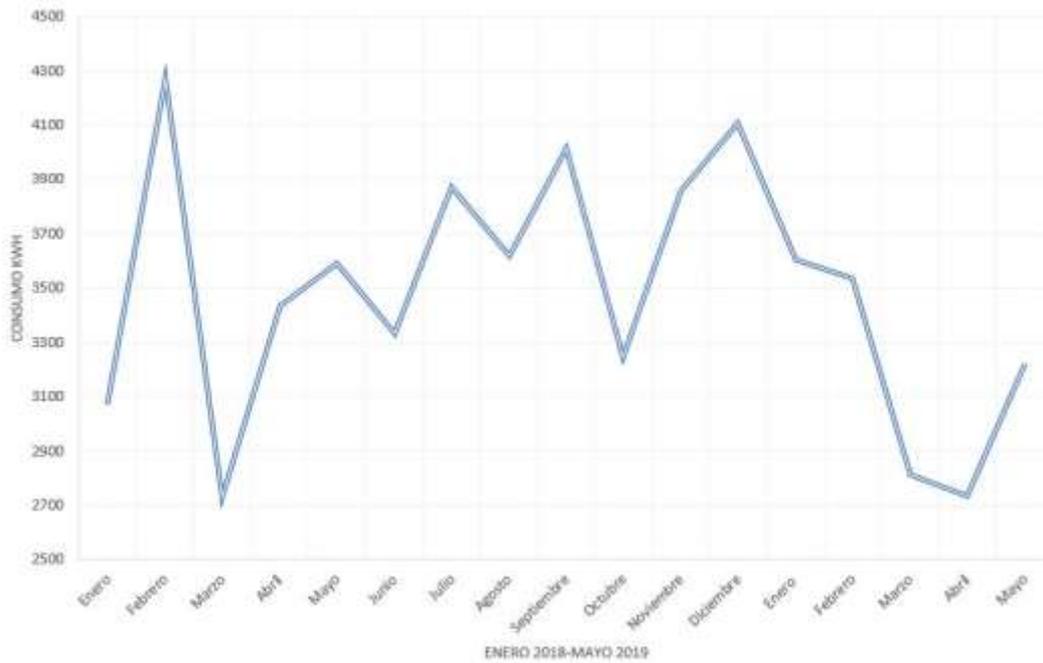


Fig.33. Demanda energética granja Moquetes
Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 31 se observa que la demanda máxima esta sobre los 4.300 kWh/mes y la demanda promedio es 3.500 kWh/mes. Para determinar si el generador abastece el consumo interno de la granja se considera la demanda máxima. Aplicando la ecuación 23 se tiene que la planta genera 24.854,4 kWh/mes.

$$E_{DG} = P_D \times 24 \times 30 \quad (23)$$

Dónde: E_{DG} → Energía disponible para la red electrica de la granja

P_D → Potencia disponible

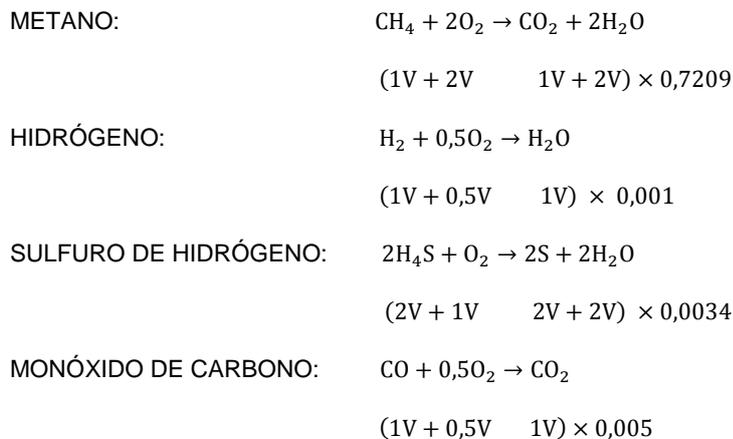
Mediante este análisis se tiene que la energía disponible es de 24.854,4 kWh/mes y el consumo de la granja es de 4.300 kWh/mes con lo que se tiene que la planta abastece la demanda total de la granja y se tiene un excedente de 20.554,4 kWh/mes.

3.4. Análisis ambiental

En los capítulos anteriores se describió sobre el aprovechamiento del biogás generado a través del tratamiento anaerobio de pollinaza para la generación de energía eléctrica y térmica. En esta sección se realiza el análisis ambiental de la aplicación de la pollinaza con fines energéticos.

Para determinar la reducción de emisiones y la reducción del impacto ambiental se debe definir las características de los gases de escape. En la investigación realizada por Estella (2016), describe que para calcular la composición volumétrica de los gases de combustión resultantes, o humos, en base húmeda y en base seca, por m³ de combustible se determina mediante el balance de masas volumétricas.

Para el análisis se considera como base de cálculo 1 m³ de combustible, los porcentajes de la composición de biogás se detallaron en la Tabla 2.5. El balance de masa volumétrico es el siguiente:



El volumen de oxígeno y de nitrógeno estequiométrico es el siguiente:

$$V_{O_2,e} = (2 \times 0,7209) + (0,5 \times 0,001) + (1 \times 0,0034) + (0,5 \times 0,005) = 1,4482 \text{ m}^3$$

Para el cálculo del volumen del nitrógeno se considera una composición del aire del 21% de O₂ y del 79% de N₂

$$V_{N_2,e} = \frac{X_{N_2}}{X_{O_2}} \times V_{O_2,e} = \frac{0,72}{0,21} \times 1,4482 \text{ m}^3 = 4,9652 \text{ m}^3$$

La composición volumétrica de los gases de combustión es la siguiente:

$$V_{H_2O} = (2 \times 0,7209) + (1 \times 0,001) + (2 \times 0,0034) = 1,4496$$

$$V_{CO_2} = (1 \times 0,7209) + (1 \times 0,005) + 0,3 = 0,7235$$

$$V_S = (2 \times 0,034) = 0,068$$

$$V_{N_2} = V_{N_2,e} \times (1 + e) + 0,01 = 4,9752$$

$$V_{O_2} = V_{O_{2,e}} \times (1 + e) - V_{O_{2,e}} + 0,01 = 0,01$$

$$V_T = 7,2263 \text{ m}^3$$

Donde: $e \rightarrow$ Exceso de aire, es decir 0

La fracción volumétrica de los gases de escape se determina mediante la Ecuación 24.

$$X_{V,H_2O} = \frac{V_{Gases}}{V_T} \times 100 \quad (24)$$

En la tabla 3.8 se presentan los resultados obtenidos.

TABLA 3.8. COMPOSICIÓN GASES DE ESCAPE

Composición	Volumen gases de escape m ³	% en base húmeda	% en base seca
CO ₂	0,72	10,01	12,52
S	0,07	0,95	1,18
N ₂	4,97	68,85	86,13
O ₂	0,01	0,15	0,12

Fuente: Elaborado por el autor

Una vez conocido el volumen de los gases de escape se determina la emisión de CO₂ a la atmosfera mediante la ecuación 25.

$$CO_{2\text{emitido}} = B_c \times V_{C_2O} \quad (25)$$

Donde: $B_c \rightarrow$ Biogás consumido

$V_{C_2O} \rightarrow$ Volumen del dióxido de carbono

El biogás generado en el año es de 281.815,2 m³. Basándose en los datos del consumo de combustible del grupo electrógeno seleccionado y considerando una disponibilidad del 0,85 se tiene que 253.908,9 m³ de biogás se destinan para su alimentación mientras que el biogás remanente es quemado en las chimeneas (27.906,3 m³). De esta manera se tiene que el total de biogás quemado emite 203.752,38 m³ de dióxido de carbono. Para obtener la cantidad de emisiones de C₂O en toneladas se considera que su densidad es de 1,1325 kg/m³ (Tablas y diagramas termodinámicos) con lo que se obtiene un total de 230,74 Tn CO₂/año.

En la sección 1.4.2 se mencionó que la inadecuada aplicación de la pollinaza produce emisiones de gases de efecto invernadero. La generación de biogás en biodigestores consiste en la descomposición natural del sustrato, por lo que se infiere que la pollinaza sin un tratamiento previo produce la mitad del biogás generada en el digestor. Las emisiones de CO₂ y CH₄ se determinan mediante las Ecuaciones 26 y 27 respectivamente.

$$CO_{2\text{emitido}} = B_g \times f_{CO_2} \times \rho_{CO_2} \quad (26)$$

$$CH_{4\text{emitido}} = B_g \times f_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \quad (27)$$

Donde: B_g → Biogas generado por la descomposición de la pollinaza

f_{CO_2}, f_{CH_4} → Fracción de dióxido de carbono y metano

ρ_{CO_2}, ρ_{CH_4} → Densidad del dióxido de carbono y metano

La densidad del dióxido de carbono y metano a temperatura ambiente es de 1,8417 y 0,6673 kg/m³ respectivamente (Tablas y diagramas termodinámicos). Aplicando las fórmulas se tiene que las emisiones de CO₂ y CH₄ son de 47,87 y 67,78 toneladas al año respectivamente. Una tonelada de metano equivale a 21 toneladas de dióxido de carbono (Gerber et al., 2013) con lo que se tiene que el total de CO₂ emitidas por la pollinaza es de 1471,25 toneladas al año.

Una vez definido las emisiones CO₂ del grupo electrógeno y de la pollinaza se obtiene que mediante el tratamiento anaerobio de la pollinaza se reducen 1.240,71 Tn CO₂/año que representa una reducción del 84,3%.

3.5. Análisis económico

En este apartado se aborda un breve análisis económico para determinar la factibilidad económica de la implementación del sistema de generación. Se consideran como gastos la inversión inicial, costos de depreciación, costos de operación y mantenimiento mientras que como ingresos se consideran el ahorro conseguido por facturación eléctrica, venta de energía y comercialización de bioabono.

3.5.1. Presupuesto estimado de la construcción de la planta

La implementación del sistema de generación de energía eléctrica y térmica mediante el biogás producido en el digestor conlleva una alta inversión. A continuación, se detalla el costo de cada estructura y equipo que conforma la planta.

- Biodigestor

El digestor consiste en una laguna tipo geomembrana enterrada con una profundidad de 4.50 m, en la sección 3.2 se presentó el diseño. El costo de los materiales, sistemas y elementos necesarios para su construcción y operación se detallan en la Tabla 3.9.

TABLA 3.9. COSTO BIODIGESTOR

Descripción	Unidades	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Excavación y construcción de rasante	m ³	2.475	10,00	24.750,00
Hormigón armado	m ³	52	250,00	13.000,00
Acero de refuerzo para hormigón	Kg	3.120	1,57	4.898,40
Encofrado	m ²	218	9,30	2.027,40
Enlucido	m ²	254	7,32	1.859,20
Membrana EPDM para cubierta	m ²	891	20,00	17.820,00
Geomembrana HDPE para fondo de laguna	m ²	803	15,00	12.045,00
Tuberías de PE alimentación y descarga	m	36	32,00	1.152,00
Tuberías de acero captación biogás	m	218	35,00	7.630,00
Accesorios para tuberías (incluye válvula de cierre)	Global	18	35,00	630,00
Bombas de succión de lodos	Unidad	2	3.000,00	6.000,00
Agitadores biodigestor	Unidad	4	12.000,00	48.000,00
Pernos y anclajes para sujetar la membrana	Global	109	15,00	1.635,00
Válvulas de seguridad y control	Global	1	1.500,00	1.500,00
Sistema de calefacción (40,6 kW)	Global	1	8.000,00	8.000,00
Sistema de control de procesos	Global	1	5.000,00	5.000,00
Instalaciones eléctricas y tableros	Global	1	9.000,00	9.000,00
Costo aproximado de construcción			\$	164.947,00
Costo de biodigestor por m ³ de volumen			\$/m ³	75,87

Fuente: Elaborado por el autor

En las Tablas 3.10 – 3.12 se presentan a detalle los costos de las estructuras para la alimentación del digestor, descarga y tratamiento del sustrato.

- Tanque de alimentación

TABLA 3.10. COSTO TANQUE DE ALIMENTACIÓN

Descripción	Unidades	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Excavación	m ³	16	10,00	160,00
Hormigón armado	m ³	13	250,00	3.250,00
Acero de refuerzo para hormigón	Kg	780	1,57	1.224,60
Encofrado	m ²	58	9,30	539,40
Enlucido	m ²	79	7,32	578,28
Mezclador tanque de alimentación	unidad	1	4.000,00	4.000,00
Costo aproximado de construcción			\$	9.752,28

Fuente: Elaborado por el autor

- Tanque de descarga

TABLA 3.11. COSTO TANQUE DE DESCARGA

Descripción	Unidades	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Excavación	m ³	108	10,00	1.080,00
Geomembrana HDPE	m ²	189	15,00	2.835,00
Bomba extracción lodos del fondo	Kg	1	3.000,00	3.000,00
Costo aproximado de construcción			\$	6.915,00

Fuente: Elaborado por el autor

- Lecho de secado de lodos

TABLA 3.12. COSTO LECHO DE SECADO DE LODOS

Descripción	Unidades	Cantidad	Precio unitario (\$)	Total (\$)
Excavación	m ³	40	10,00	400,00
Ladrillo muros	m ³	3	35,00	105,00
Tubería de drenaje	m ³	11	15,00	165,00
Grava para filtro	m ³	20	50,00	1.000,00
Arena para filtro	m ³	7	45,00	315,00
Ladrillo sobrepuesto filtro	m ³	7	35,00	245,00
Tuberías de alimentación	M	20	32,00	640,00
Sistema de recirculación	Unidad	1	3.000,00	3.000,00
Costo aproximado de construcción			\$	5.870,00

Fuente: Elaborado por el autor

Para determinar el costo estimado de la planta se debe adicionar los valores correspondientes al sistema de purificación, quemador de biogás, gasómetro externo, grupo electrógeno, tren de calibración y transformador. En la Tabla 3.13 se muestra el costo total.

TABLA 3.13. PRESUPUESTO DE LA PLANTA

Descripción	Cantidad	Total (\$)
Tanque de alimentación	1	9.752,28
Biodigestor	1	164.047,00
Tanque de descarga	1	6.915,00
Lecho de secado de lodos	1	5.870,00
Filtro de remoción de H ₂ S (56 m ³ /h)	1	32.267,00
Quemador de biogás (56 m ³ /h)	1	8.733,00
Gasómetro externo	1	12.000,00
Grupo electrógeno	1	60.000,00
Tren de calibración	1	8.500,00
Transformador tipo seco E2H75S	1	5.860,73
TOTAL		314.845,01

Fuente: Elaborado por el autor

3.5.2. Presupuesto rediseño red eléctrica

Cómo se mencionó en la sección 3.3.6 para acoplar la generación eléctrica de la planta a la red eléctrica interna es necesario realizar un rediseño de la red de BT y MT, para ello es necesario la adquisición de determinados materiales. En la Tabla 3.14 se detallan las características y costes.

TABLA 3.14. PRESUPUESTO REDISEÑO RED ELÉCTRICA

Descripción	Unidades	Cantidad	Total (\$)
Poste de hormigón armado circular 400 Kg, 12 M	Unidad	1	232,50
Conductor de Al acero desnudo cableado ASC 2 AWG	m	264	187,44
Conductor de Al acero desnudo cableado ACSR 1/0 AWG	m	455	354,90
Estructuras	Unidad	3	150,00
Otros	Global	500,00
Mano de obra			400,00
Costo estimado de construcción			1.824,84

Fuente: Elaborado por el autor

Una vez establecidos los precios unitarios de cada estructura que conforman la planta de cogeneración y el costo del rediseño de la red eléctrica se tiene que el presupuesto total para la implementación de la planta en la granja Moquetes es de \$316.669,85 por consiguiente el costo del kilovatio de energía eléctrica mediante biogás es de \$5.107,57.

Cabe destacar que en el precio de los equipos que no se encuentran en el mercado local no se considera valores por concepto de exportación.

3.5.3. Viabilidad económica

Para determinar si la implementación de la planta es viable económicamente se deben establecer los egresos e ingresos anuales además de la inversión inicial que se detalló anteriormente.

3.5.3.1. Resumen de egresos

En las Tablas 3.15 – 3.16 se presentan los gastos por concepto de depreciación de los componentes de la planta y costos que implica el mantenimiento de esta.

TABLA 3.15. COSTOS DE DEPRECIACIÓN

Descripción	\$	Depr. %	\$/año
Digestor, tanque de alimentación y descarga	99.984,28	5,00	4.999,21
Equipo electromecánico	113.860,73	15,00	17.079,10
Filtro de remoción H ₂ S	32.267,00	10,00	3.226,70
Generador	60.000,00	15,00	9.000,00
Quemador de biogás	8.733,00	10,00	873,30
Rediseño red	1.824,84	15,00	273,72
Total	\$		35.452,04

Fuente: Elaborado por el autor

TABLA 3.16. COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Descripción	\$	O&M %	\$/año
Digestor, tanque de alimentación y descarga	99.984,28	3,00	2.999,53
Equipo electromecánico	113.860,73	6,00	6.831,64
Filtro de remoción H2S	32.267,00	5,00	1.613,35
Generador	60.000,00	10,00	6.000,00
Quemador de biogás	8.733,00	5,00	436,65
Total	\$		17.881,17

Fuente: Elaborado por el autor

Además de los egresos por concepto de mantenimiento, operación y mantenimiento se debe considerar los costos referentes al operario de la planta. El costo de operario se fija en 14.800 \$/año. En resumen, se tiene que el monto total de egresos al año es de \$68.133,21.

3.5.3.2. Resumen de ingresos

Una vez determinado el costo total de la implementación de la planta y los egresos anuales se establece los ingresos que se tendrán durante el año.

Como se describió anteriormente la planta de cogeneración permite abastecer la demanda de energía eléctrica de la granja y disponer de un excedente de 20.554,4 kWh/mes lo que representa un ahorro por consumo eléctrico y un ingreso por concepto de venta de energía. Además, como se ha mencionado durante el desarrollo de la investigación el tratamiento anaerobio de la pollinaza permite la obtención de biogás y a la vez fertilizante rico en nutrientes con lo que se obtiene un ingreso adicional por venta de bioabono (Véase Tabla 17)

TABLA 3.17. INGRESOS ANUALES

Ingresos anuales			
Consumo interno	kWh/año	\$/kWh	\$/año
Ahorro planilla eléctrica	38.160,54	0,11	4.197,65
Energía eléctrica	kWh/año	\$/kWh	\$/año
Venta de energía eléctrica	212.532,49	0,1023	21.742,07
Fertilizante	t/año	\$/t	\$/año
Comercialización bioabono	5000	20,00	100.000,00
Total	\$		125.981,47

Fuente: Elaborado por el autor

Para determinar la viabilidad económica del proyecto se analizan los siguientes parámetros: Pay-back, VAN y TIR. Para el análisis se considera un periodo de 10 años considerando que los precios de ingresos se mantendrán durante este periodo.

- Pay-back

Representa los años que serán necesarios para recuperar la inversión inicial. Viene dado por la Ecuación 28.

$$\text{Pay - Back} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ingresos anuales} - \text{Costes anuales}} = \frac{316.669,85}{125.981,47 - 68.133,21} = 5,47 \text{ años} \quad (28)$$

Considerando que el sistema de cogeneración está en funcionamiento 7.446 horas anuales se tiene que el periodo de recuperación de la inversión es de 5,47 años. En la Figura 34 se presenta el diagrama del flujo de caja durante los 7 primeros años.

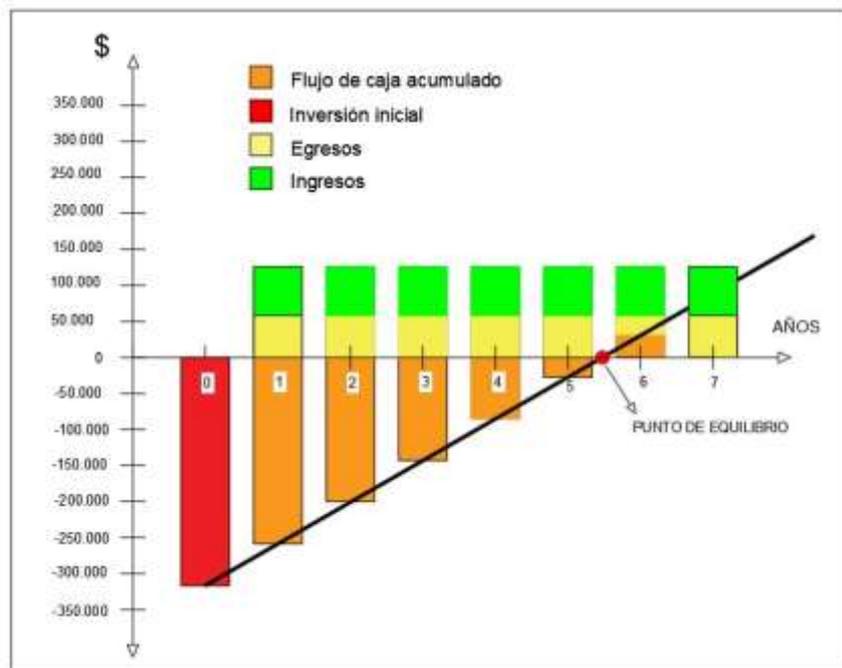


Fig.34. Plazo de recuperación de la inversión
Fuente: Elaborado por el autor

- VAN (Valor actual neto)

Es un parámetro que permite valorar la rentabilidad de un proyecto actualizando a valor de hoy los flujos de caja futuros generados por una inversión. Viene dado por la ecuación 29.

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+r)^i} \quad (29)$$

Donde: I_0 → Inversión inicial

n → numero de periodos

Q_i → Flujo de caja en el periodo i

r → Tipo de interés o tasa de descuento

Considerando un tipo de interés del 10% se obtiene un VAN de 74.327,91. El valor actual neto obtenido es mayor que cero lo que representa que la rentabilidad del proyecto es superior al tipo de interés, por lo que se puede aceptar la realización del proyecto.

- TIR (Tasa interna de retorno)

Se define como la tasa de descuento a la que el proyecto posee un VAN igual a cero. Por lo tanto, la TIR se puede calcular igualando a cero la ecuación anterior

$$0 = -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+TIR)^i} \quad (30)$$

A mayor TIR, mayor rentabilidad tiene el proyecto por ende si la TIR es superior a la tasa de interés aplicada en el cálculo de VAN el proyecto es viable y puede ser aceptado. La tasa interna de retorno obtenida es de 12,78 % que representa un aumento en relación con el tipo de interés empleado en el cálculo del VAN (10%). Por tanto, la inversión en este proyecto es favorable, ya que su rentabilidad es mayor que la rentabilidad mínima requerida.

Los valores calculados de los indicadores de rentabilidad del proyecto arrojaron valores positivos lo que demuestra que la implementación de la planta en la granja es viable económicamente.

Conclusiones

El aumento de la demanda de carne de pollo ha significado la producción de elevadas cantidades de pollinaza que al ser empleada como abono orgánico sin un tratamiento previo representa una fuente de emisiones de gases contaminantes además de producir malos olores. La digestión anaerobia es una técnica ecológica para el tratamiento de residuos animales de gran aplicación en países industrializados por tal motivo se ha considerado el tratamiento anaerobio de la pollinaza para la producción de biogás el cual puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica en motores de combustión interna alternativos que además permiten obtener energía térmica lo que los convierte en una tecnología con una elevada eficiencia global con apenas 10 – 20 % de pérdidas.

El potencial de biogás de la pollinaza producida en la granja Moquetes se determinó mediante la ejecución de tres etapas: la primera consistió en cuantificar la producción de pollinaza durante un ciclo de producción en base a la ingesta de alimento; la segunda etapa radicó en la estimación del potencial bioquímico del metano y la composición del biogás en base a los resultados de la composición elemental y proximal del sustrato realizados en el laboratorio del IIGE y por último se determinó el volumen de biogás. Mediante la aplicación de estas etapas se obtuvo que el TBMP de la pollinaza es de 611,70 mlCH₄/gSV mientras que el volumen de biogás fue de 52,18 m³/h con un contenido de metano del 72,09 %, lo cual es un indicador de que el biogás contiene un poder calorífico alto y es ideal para ser empleado en los grupos electrógenos.

La planta de biogás está en la capacidad de abastecer el consumo de un grupo electrógeno de 62 kW. Mediante las características de los equipos que conforman la planta se estableció que el consumo propio de la planta es de 27,48 kW con lo que se tiene que la potencia disponible es de 34,52 kW lo que representa una producción de 24.854,4 kWh/mes de los cuales 4.700 kWh/mes son destinados para el consumo interno de la granja y los 20.554,4 kWh/mes excedentes son destinados para la venta. Por otra parte, la implementación de la planta tiene un costo \$316.669, considerando egresos e ingresos anuales se tiene que la inversión inicial será recuperada en un plazo de 5,47 años y mediante los análisis de VAN y TIR se estableció que la inversión en este proyecto es viable. De esta manera se concluye que la planta de cogeneración es factible técnica y económicamente además de presentar una reducción del 84,3 % de emisiones de dióxido de carbono equivalente a la atmosfera.

Recomendaciones

En la presente investigación se ha tratado sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia de pollinaza, sin embargo, se pueden considerar alternativas con el fin de mejorar los parámetros de operación y obtener una mayor producción de biogás. La co-digestión es la técnica más empleada a nivel mundial gracias a las múltiples ventajas que presenta, permite optimizar los parámetros de operación (temperatura, pH, velocidad de carga, etc.) y por ende mantener la estabilidad del proceso anaerobio. En base a lo mencionado la investigación puede ser ampliada considerando la co-digestión de pollinaza con estiércol de ganado bobino y porcino, suero de leche, residuos vegetales y de maíz

La selección de parámetros de operación de los agitadores: velocidad de agitación, intervalos de agitación, potencia requerida y configuración en el interior del digestor deben ser investigados a mayor profundidad para garantizar el correcto funcionamiento de los biodigestores y evitar la inhibición del proceso anaerobio.

El potencial de biogás ha sido obtenido mediante la aplicación de modelos teóricos, que a pesar de ser un método rápido no representa una imagen realista por tal motivo para obtener valores más acordes a la realidad es necesario comprobar la producción de biogás mediante métodos experimentales.

Bibliografía

- Achinas, S., & Euverink, G. J. W. (2016). Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*, 2(3), 143-147.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001>
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2019). Balance Nacional de Energía Eléctrica Enero 2019. Retrieved from <https://bit.ly/2QVOyWh>
- Aguilar, J. (2017). *Estimación del potencial de energía eléctrica a partir de una unidad de volumen de excretas de gallina provenientes de granjas avícolas*. (Trabajo de grado). Universidad del Valle, Retrieved from <http://hdl.handle.net/10893/10061>
- American Society of Agricultural Engineers. (2005). Manure Production and Characteristics. Retrieved from <https://goo.gl/aE979A>
- Aranda, C. (2016). *La planificación tributaria como un instrumento idóneo para maximizar los beneficios económicos: caso del subsector avícola*. (Tesis de maestría). Universidad Andina Simón Bolívar, Quito. Retrieved from <http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5679/1/T2319-MPTFI-Aranda.pdf>
- Arenas, D. (2009). *PROPUESTA DE DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ*. (Trabajo de grado). Bogotá. Retrieved from <https://goo.gl/QYRpFU>
- Aryal, N., Kvist, T., Ammam, F., Pant, D., & Ottosen, L. D. M. (2018). An overview of microbial biogas enrichment. *Bioresourcetechnology*, 264, 359-369.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.013>
- Arévalo, W. (2015). La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. *Las energías sustentables y sostenibles en el departamento de Nariño*, 81-90.
- Awe, O. W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D. P., & Lyczko, N. (2017). A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), 267-283.
doi:10.1007/s12649-016-9826-4
- Borja, M. (2017). La biomasa como fuente de energía renovable. In *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético* (pp. 1-19).
- Böjti, T., Kovács, K. L., Kakuk, B., Wirth, R., Rákhely, G., & Bagi, Z. (2017). Pretreatment of poultry manure for efficient biogas production as monosubstrate or co-fermentation with maize silage and corn stover. *Anaerobe*, 46, 138-145.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.03.017>
- Cabrera, A., Rentería, I., Martínez, C., Alarcón, S., Rojas, R., & Velázquez, S. (2018). Aprovechamiento de subproductos avícolas como fuente proteica en la elaboración de dietas para rumiantes. *Abanico veterinario*, 8, 59-67.
- Cardenas, L., Parra, B., Torres, P., & Vázquez, C. (2016). Perspectivas de ensayo de Potencial Bioquímico de Metano-BPM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 95-108.
- Carrasco, J. (2015). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO: UNA ESTRATEGIA PARA DIFERENTES CONTEXTOS*. (Trabajo de grado). Universidad de Chile, Chile. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133520>
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., Castro, M., & Collado, E. (2013.). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energía renovable* (S. A. PEARSON EDUCACIÓN Ed. 2a ed.).
- Casanova, M. (2017). *Evaluación de un digestor anaerobio de fases separadas para el tratamiento de lactosuero de la microempresa "Lácteos La Delicia La Frontera"*. (Tesis de maestría). Universidad de Valle, Colombia. Retrieved from <https://goo.gl/YZX9uy>
- Castelló, J. (2018). CUANTA GALLINAZA PRODUCEN LAS GRANJAS DE POLLOS. Retrieved from <https://goo.gl/HF2kYn>

- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE(83)*, 117-140. Retrieved from <https://goo.gl/5N7CLC>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource technology*, 99(10), 4044-4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057
- Chorkulak, V. (2016). *Análisis de la capacidad de generación de biogás en Argentina a partir de residuos orgánicos producidos en granjas con sistemas de confinamiento*. (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Buenos Aires. "Universidad Privada", Argentina. Retrieved from <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/279>
- Constitución de la República del Ecuador (2008). Título II. In.
- Corporación Alemana en Chile. (2012). Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. Retrieved from <https://bit.ly/2K7cDFU>
- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. (2015). Anaerobic bacteria: processes they perform and their contribution to life sustainability on the planet. *13*, 55-81.
- Cowley, C., & Brorsen, B. W. (2018). Anaerobic Digester Production and Cost Functions. *Ecological Economics*, 152, 347-357. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.013>
- Cáceres, R. (2015). *Energías renovables no convencionales: factibilidad de la energía oceánica en Chile*. (Trabajo de grado). Universidad de Chile, Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132181>
- Dahiya, A. (2015). *Bioenergy. Biomass to biofuels* (Elsevier Inc. ed.). Jamestown Road, London.
- Dalkılıç, K., & Ugurlu, A. (2015). Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic-thermophilic two stage anaerobic system. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 120(3), 315-322. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.01.021>
- Deepanraj, B., Sivasubramanian, V., & Jayaraj, S. (2014). Biogas Generation through Anaerobic Digestion Process An Overview. *Research Journal of Chemistry and Environment.*, 18, 80-93.
- El Sitio Avícola. (2016). Tendencias Avícolas Mundiales 2016: América representa el 44 por ciento de la producción mundial de pollo. Retrieved from <https://goo.gl/UHvsiw>
- Elasri, O., & El amin Afilal, M. (2016). Potential for biogas production from the anaerobic digestion of chicken droppings in Morocco. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 5(3), 195-204. doi:10.1007/s40093-016-0128-4
- Energy Efficiency and Renewable Energy. (s.f.). Bioenergy basic. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-basics>
- ERENOVABLE. Energía de biomasa: Qué es, ventajas y desventajas. Retrieved from <https://erenovable.com/energia-de-biomasa/>
- Ericsson, K., & Werner, S. (2016). The introduction and expansion of biomass use in Swedish district heating systems. *Biomass and Bioenergy*, 94, 57-65. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.011>
- Estella, P. (2016). *ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DEL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN UNA GRANJA DE GANADO BOVINO*. (Trabajo de grado). UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, Retrieved from https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26877/TFG_Paula_Estella_Bases.pdf
- European Bank for Reconstruction and Development. (2016). Sub-sectoral Environmental and Social Guideline: Poultry Farming. Retrieved from <https://goo.gl/SZzVw3>
- Fernández, G. (2015). *Valorización energética del residuo avícola. Impacto económico -ambiental y análisis experimental, en Europa, de la reducción de amoníaco en explotaciones avícolas, mediante compuesto enzimático*. (Tesis Doctoral). Universidad de Oviedo, Retrieved from <https://goo.gl/8S7ur7>
- Fernández, J., Gutierrez, F., Del Río, P., San Miguel, G., Bahillo, A., Sánchez, J., . . . Aracil, J. (2015). Introducción a la biomasa energética. In *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética* (pp. 3). España: Mundi-Prensa.
- Food and Agriculture Organization. (2013). MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA PRODUCCIÓN GANADERA. Una revisión de las opciones técnicas para

- la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO₂. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3288s.pdf>
- Garcés, C. (2017). BASES ZOOTÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE ALIMENTARIO DE NITRÓGENO Y DE FÓSFORO. Retrieved from <https://goo.gl/RKcLK4>
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., . . . & Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.
- González, J., & Violante, A. (2017). PROTOTIPO DE DIGESTOR ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 3. Retrieved from <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/>
- González, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañe, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485-1496. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>
- Hamilton, D. (2013). Anaerobic Digestion of Animal Manures: Types of Digesters.
- Hofmann, U. (2016). Heat recovery and gas treatment for co generation. Retrieved from <https://bit.ly/2WdulqB>
- Hoysall, C., & Malayil, S. (2012). *Anaerobic digestion for bioenergy from agro-residues and other solid wastes - An overview of science, technology and sustainability* (Vol. 92).
- Hu, Y., Cheng, H., & Tao, S. (2017). Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation. *Environment International*, 107, 111-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.003>
- Huang, Y., Anderson, M., McIlveen-Wright, D., Lyons, G. A., McRoberts, W. C., Wang, Y. D., . . . Hewitt, N. J. (2015). Biochar and renewable energy generation from poultry litter waste: A technical and economic analysis based on computational simulations. *Applied Energy*, 160, 656-663. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.029>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2017). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2017 Retrieved from <https://goo.gl/gz5rGH>
- International Energy Agency. (2017). *World Energy Balances* Retrieved from www.iea.org/statistics/topics/energybalances/
- International Renewable Energy Agency. (s.f.). Bioenergy. In.
- Jain, S., Jain, S., Wolf, I. T., Lee, J., & Tong, Y. W. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 142-154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091>
- Jingura, R. M., & Kamasoko, R. (2017). Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: a review. *Biofuel Research Journal*, 4(2), 573-586. doi:10.18331/BRJ2017.4.2.3
- Kaparaju, P., & Rintala, J. (2013). 17 - Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. In A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter (Eds.), *The Biogas Handbook* (pp. 404-427): Woodhead Publishing.
- Khedim, Z., Benyahia, B., Cherki, B., Sari, T., & Harmand, J. (2018). Effect of control parameters on biogas production during the anaerobic digestion of protein-rich substrates. *Applied Mathematical Modelling*, 61, 351-376. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.04.020>
- Kleyn, R. (2015). Producción avícola sostenible y cambio climático. Retrieved from <https://goo.gl/DVNAfS>
- Kostadinova, G., Petkov, G., Denev, S., Miteva, C., Stefanova, R., & Penev, T. (2013). Microbial Pollution of Manure, Litter, Air and Soil in a Poultry Farm. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20, 56-65.

- Kwietniewska, E., & Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491-500. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.041>
- Labiano, I. (2014). *ESTUDIO DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EMPLEANDO BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE EN EL MATADERO MUNICIPAL DE COCHABAMBA (BOLIVIA)*. (Trabajo de grado). ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN, Bolivia. Retrieved from <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/10405>
- Lee, W. S., Chua, A. S. M., Yeoh, H. K., & Ngoh, G. C. (2014). A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chemical Engineering Journal*, 235, 83-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.002>
- Lemmer, A., Naegele, H.-J., & Sondermann, J. (2013). How Efficient are Agitators in Biogas Digesters? Determination of the Efficiency of Submersible Motor Mixers and Incline Agitators by Measuring Nutrient Distribution in Full-Scale Agricultural Biogas Digesters. *Energies*, 6(12). doi:10.3390/en6126255
- León, E., & Martín, M. (2016). Optimal production of power in a combined cycle from manure based biogas. *Energy Conversion and Management*, 114, 89-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.002>
- Lin, Q., De Vrieze, J., He, G., Li, X., & Li, J. (2016). Temperature regulates methane production through the function centralization of microbial community in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 216, 150-158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.046>
- Low, S. (2014). *Mixing characteristics of a model anaerobic digester*. (Trabajo doctoral). RMIT University, Australia. Retrieved from <https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:161770/Low.pdf>
- Mani, S. (2016). Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter. *Biomass and bioenergy*, v. 93, pp. 10-167-2016 v.2093. doi:10.1016/j.biombioe.2016.07.018
- Mariusz, Z., & Pawlowski, A. (2016). Biomass for fuels-classification and composition. In K. Bulkowska, Z. Mariusz, E. Klimiuk, A. Pawlowski, & T. Pokój (Eds.), *Biomass for biofuels* (Taylor & Francis Group ed., pp. 15-28).
- Merlin Christy, P., Gopinath, L. R., & Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 167-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010>
- Miah, M. R., Rahman, A. K. M. L., Akanda, M. R., Pulak, A., & Rouf, M. A. (2016). Production of biogas from poultry litter mixed with the co-substrate cow dung. *Journal of Taibah University for Science*, 10(4), 497-504. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtusc.2015.07.007>
- Mills, N., Pearce, P., Farrow, J., Thorpe, R., & Kirkby, N. (2011). THE INFLUENCE OF HEAT BALANCE ON THE ECONOMICS OF ADVANCED ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES.
- Ministerio del Ambiente. (2016). Primer Informe Bienal de Actualización del Ecuador. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/natc/ecubur1.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2016). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador. Serie Temporal 1994-2012. Retrieved from <https://goo.gl/FoiDvr>
- MODASA. (2015). MANUAL DE TABLERO TRANSFERENCIA AUTOMÁTICA CON MÓDULO ELECTRÓNICO DSE7320. Retrieved from http://modasa.com.pe/pdf/TTA_DSE7320.pdf
- Moncayo, G. (2013). *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás*(Aqualimpia Engineering e.k. ed.).
- Montenegro, K., Rojas, A., Cabeza, I., & Hernández, M. (2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. [Biogas potential of agro-industrial residues generated in the department of Cundinamarca]
- Potencial do biogás dos resíduos agro-industriais gerados no departamento de Cundinamarca]. *Revista ION*, 29(2), 23-37. doi:10.18273/revion.v29n2-2016002

- Moreno, J., Moral, R., García, J., Pascual, J., & Bernal, M. (2014). *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II.2*. Madrid, UNKNOWN: Mundi-Prensa.
- Morocho, M. (2014). *Diseño de un plan de administración ambiental para la granja avícola NUTRIVIT*. (Trabajo de grado). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Retrieved from <https://goo.gl/dhvR7S>
- Nan, D., Chenjun, P., & Will, S. (2015). Poultry Quarterly Q3 2015. Retrieved from <https://goo.gl/RNZM9J>
- Nasimba, M. (2017). *Estudio de factibilidad para la creación de una empresa dedicada a la importación de equipos automáticos para la industria avícola en el Ecuador*. (Trabajo de grado). Universidad Internacional del Ecuador, Quito. Retrieved from <http://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/1926>
- Nursanto, A. (2017). *DESIGN AND COST EVALUATION OF ANAEROBIC BIOREACTOR FOR INDUSTRIAL WASTE*. (Tesis de maestría). Universitetet i Stavanger, Retrieved from <https://goo.gl/zt2jWB>
- Pap, B., Györkei, Á., Boboescu, I. Z., Nagy, I. K., Bíró, T., Kondorosi, É., & Maróti, G. (2015). Temperature-dependent transformation of biogas-producing microbial communities points to the increased importance of hydrogenotrophic methanogenesis under thermophilic operation. *Bioresource Technology*, 177, 375-380. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.021>
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.
- Paterlini, H., González, M. V., & Picone, L. I. (2017). Calidad de la cama de pollo fresca y compostada. *Ciencia del suelo*, 35(1), 69-78.
- Patiño, P. (2014). Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. *INNOVACIENCIA*, 45-52.
- PLAN NACIONAL DE DESARROLLO. (2017). Plan Nacional del Buen Vivir. Retrieved from <https://goo.gl/LYUubA>
- Rajagopal, R., Massé, D. I., & Singh, G. (2013). A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresource Technology*, 143, 632-641. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.030>
- Rajin, M. (2018). A Current Review on the Application of Enzymes in Anaerobic Digestion. In N. Horan, A. Z. Yaser, & N. Wid (Eds.), *Anaerobic Digestion Processes: Applications and Effluent Treatment* (pp. 55-70). Singapore: Springer Singapore.
- Red Española de, C. (2016). *Residuos ganaderos I.2*. Madrid, UNKNOWN: Mundi-Prensa.
- Renewable Energy Policy Network. (2018). RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT. Retrieved from <https://goo.gl/bPbUva>
- Reyes, E. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Esteli; Núm. 24* (2017). doi:<http://dx.doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Riera, N. I., Della Torre, V., Rizzo, P. F., Butti, M., Bressan, F. M., Zarate, N., . . . Crespo, D. E. C. (2014). Evaluación del proceso de compostaje de dos mezclas de residuos avícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 46(1), 195-203.
- Romanelli, G., Ruiz, D., & Pasquale, G. (2017). *Química de la biomasa y los biocombustibles*(Editorial de la Universidad de La Plata ed.).
- Romero, S. (2016). *PROPUESTA DE UN MODELO DE COSTOS PARA FAENAMIENTO, CONSERVACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CARNE DE POLLO: CASO ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES PECUARIOS "EL ORO"*. (Trabajo de pregrado.). PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, Quito. Retrieved from <https://goo.gl/c6fwUd>
- Rovira de Antonio, A., & Muñoz, M. (2015). *Motores de combustión interna*. Madrid, SPAIN: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- Rueda, R. (2016). *Impactos ambientales de la producción de huevos: Análisis de ciclo de vida y huella de carbono*. (Tesis de maestría.). Universidad de Oviedo, España. Retrieved from <https://goo.gl/K1iAUe>
- Rufete, A. (2015). *Caracterización de residuos ganaderos del sureste español: Implicaciones agronómicas y medioambientales*. (Tesis doctoral). Universidad Miguel Hernandez de Elche, Retrieved from <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2099/1/TD%20Rufete%20S%C3%A1ez%2C%20Ana%20B.pdf>
- Rutz, D. (2015). Sustainable Heat Use of Biogas Plants. In (2da ed.). Alemania.
- Santos Dalólio, F., da Silva, J. N., Carneiro de Oliveira, A. C., Ferreira Tinôco, I. d. F., Christiam Barbosa, R., Resende, M. d. O., . . . Teixeira Coelho, S. (2017). Poultry litter as biomass energy: A review and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 941-949. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.104>
- Saravanan, K., Suganthi, R., & Chinnaiyan, V. K. (2014, 6-8 March 2014). *Review on biogas from organic waste*. Paper presented at the 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCCE).
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Sindall, R. (2014). *Increasing the efficiency of anaerobic waste digesters by optimising flow patterns to enhance biogas production*. (Tesis doctoral). The University of Birmingham, Birmingham. Retrieved from <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/5636/1/Sindall15PhD.pdf>
- Subramanian, K. (2017). *Biofueled Reciprocating Internal Combustion Engine*. (1ra ed.).
- Sánchez, L., Laines, J., Sosa, J., & Montero, S. (2015). DETERMINACIÓN TEÓRICA DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN UNA GRANJA LECHERA, TABASCO, MÉXICO. Tablas y diagramas termodinámicos. Retrieved from <http://www.ehu.es/mmtde/materiala/tablas%20y%20diagramas.pdf>
- Tauseef, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of Environmental Management*, 117, 187-207. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.022>
- Tchobanoglous, G., Stensel, D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- Thompson, E., Wang, Q., & Li, M. (2013). Anaerobic digester systems (ADS) for multiple dairy farms: A GIS analysis for optimal site selection. *Energy Policy*, 61, 114-124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.035>
- Trninić, M., Stojiljković, D., Jovović, A., & Janke, G. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 1-8. doi:10.1109/EFEA.2016.7748797
- TULAS. (2003). *TITULO PRELIMINAR DE LAS POLITICAS BASICAS AMBIENTALES DEL ECUADOR* Retrieved from <https://goo.gl/tgA29b>
- Ulusoy, Y., Ulukardesler, A. H., Arslan, R., & Tekin, Y. (2017, 5-8 Nov. 2017). *Energy and emission benefits of chicken manure biogas production — A case study*. Paper presented at the 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA).
- United States Department of Agriculture. (2018). *Livestock and Poultry: World Markets and Trade*. Retrieved from https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf
- United States Environmental. (2011). *Recovering Value from Waste. Anaerobic Digester System Basics*. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/recovering_value_from_waste.pdf
- Vargas, O. (2016). *Avicultura*(Ediciones UTMACH ed.).
- Vignote, S. (2016). *La biomasa: Importancia, tipos y características y formas de preparación*.

- Washington State University. (2015). ANAEROBIC DIGESTION EFFLUENTS AND PROCESSES: Anaerobic Digestion Systems Series. Retrieved from <http://cru.cahe.wsu.edu/CEPublications/FS171E/FS171E.pdf>
- Zhang, N., Peng, H., Li, Y., Yang, W., Zou, Y., & Duan, H. (2018). Ammonia determines transcriptional profile of microorganisms in anaerobic digestion. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(4), 770-776. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.04.008>
- Ziganshina, E. E., Belostotskiy, D. E., Ilinskaya, O. N., Boulygina, E. A., Grigoryeva, T. V., & Ziganshin, A. M. (2015). Effect of the Organic Loading Rate Increase and the Presence of Zeolite on Microbial Community Composition and Process Stability During Anaerobic Digestion of Chicken Wastes. *Microbial Ecology*, 70(4), 948-960. doi:10.1007/s00248-015-0635-2
- Zonta, Ž., Alves, M. M., Flotats, X., & Palatsi, J. (2013). Modelling inhibitory effects of long chain fatty acids in the anaerobic digestion process. *Water Research*, 47(3), 1369-1380. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.12.007>

ANEXOS

Anexo A: Calculo de producción de pollinaza

MOQUETES BAJO

INGRESO 24716						
EDAD	# AVES	MD	MA	% MD	% MA	CON. ALIM
1	24707	9	9	0,036	0,036	12
2	24697	10	19	0,040	0,077	12
3	24685	12	31	0,049	0,125	12
4	24666	19	50	0,077	0,202	14
5	24621	45	95	0,182	0,384	15
6	24554	67	162	0,271	0,655	16
7	24486	68	230	0,275	0,931	16
8	24454	32	262	0,129	1,060	16
9	24435	19	281	0,077	1,137	19
10	24425	10	291	0,040	1,177	20
11	24414	11	302	0,045	1,222	18
12	24404	10	312	0,040	1,262	22
13	24394	10	322	0,040	1,303	24
14	24386	8	330	0,032	1,335	25
15	24377	9	339	0,036	1,372	26
16	24370	7	346	0,028	1,400	32
17	24360	10	356	0,040	1,440	40
18	24349	11	367	0,045	1,485	45
19	24331	18	385	0,073	1,558	50
20	24314	17	402	0,069	1,626	50
21	24300	14	416	0,057	1,683	50
22	24285	15	431	0,061	1,744	50
23	24267	18	449	0,073	1,817	58
24	24256	11	460	0,045	1,861	60
25	24244	12	472	0,049	1,910	64
26	24222	22	494	0,089	1,999	65
27	24204	18	512	0,073	2,072	65
28	24179	25	537	0,101	2,173	65
29	24159	20	557	0,081	2,254	68
30	24140	19	576	0,077	2,330	70
31	24122	18	594	0,073	2,403	70
32	24111	11	605	0,045	2,448	70
33	24102	9	614	0,036	2,484	70
34	24094	8	622	0,032	2,517	75
35	24086	8	630	0,032	2,549	73
36	24081	5	635	0,020	2,569	77
37	24069	12	647	0,049	2,618	80
38	24063	6	653	0,024	2,642	88
39	24049	14	667	0,057	2,699	90
40	24027	22	689	0,089	2,788	100
41	24011	16	705	0,065	2,852	100
42	23991	20	725	0,081	2,933	100
43	23979	12	737	0,049	2,982	100
44	23966	13	750	0,053	3,034	120
45	23948	18	768	0,073	3,107	110
46	23934	14	782	0,057	3,164	110

47	23921	13	795	0,053	3,217	110		
48	23904	17	812	0,069	3,285	110		
49	23886	18	830	0,073	3,358	90	VENTA	TOTAL
50	23850	36	866	0,146	3,504	60	2080	21806
51	23819	31	897	0,125	3,629	60	3100	18670
52	23797	22	919	0,089	3,718	60	2500	16139
53	23752	45	964	0,182	3,900	60	5300	10817
54	23713	39	1003	0,158	4,058	70	1700	9072
52	23680	33	1036	0,134	4,192	80	2600	6433
53	23660	20	1056	0,081	4,273	76	2800	3600
54	23635	25	1081	0,101	4,374	37	1200	2380
55	23611	24	1105	0,097	4,471	15	1200	1155
							1095	36
							36	0

YACIJA INICIAL		DIMENSION GALPON		HUMEDAD
3	Kg/m2	1500	m2	23

Y1	4500	CONSUMO TOTAL		CONVERSION
Y2	1035	2.753	Quintales	1,15
YT	5535	CONSUMO DIARIO		
		4,455	KG	
# AVES	23904,00	0,0041	KG	
D1	122467,30	0,0032	KG	
D2	103,79	0,0037	KG	
D3	69,00	0,0055	KG	
D4	69,00	0,0066	KG	
D5	69,00	0,0109	KG	
D6	69,00	0,0223	KG	
D7	80,50	0,0321	KG	
D8	92,12	0,0320	KG	
D9	87,72	0,4167	KG	
D10	42,55			
D11	17,25			
Dt	123167,23			
DT	61583,61			
TOTAL	67118,61			

PRODUCCION POLLINAZA
2,72 Kg/ave

MD: mortalidad diaria; MA: mortalidad acumulada

Y1: yacuja inicial; Y2: aumento de yacuja por factor de humedad; YT: yacuja total

D_n: producción de estiércol; Dt: estiércol total en base seca y húmeda; DT: estiércol total en base seca

Anexo B: Análisis de pollinaza



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
GEOLÓGICO Y ENERGÉTICO

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN GEOLÓGICO Y ENERGÉTICO
LABORATORIO DE BIOMASA

Av. Giovanni Calles s/n y Av. Padre Luis Vaccari

INFORME DE ENSAYOS N° LB-1-2019

SOLICITANTE	Gerardo Collaguazo	FECHA DE RECEPCIÓN	2018-12-14
		FECHA DE INFORME	2019-01-18
MUESTRA	Pollinaza	ENVASE	Envase aprox. 150 g
NÚMERO	LB-646-2018 y LB-649-2018	MUESTREO	Solicitante
ENSAYO REQUERIDO	Humedad, cenizas, Análisis Elemental		
DOCUMENTO	Oficio SN 10 de octubre de 2018		
TÉCNICO ASIGNADO	P. Cují, O. Estévez		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Juan Lara Muestra 1 (LB-646-2018)	Humedad, % (p/p)	BS EN 14774-3:2009	a	a	30,39
	Cenizas, % (p/p)	BS EN 14775:2009	a	a	18,90*
	Carbono, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	35,73
	Nitrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	4,32
	Hidrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	10,09
	Azufre, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,04
Juan Lara Muestra 2 (LB-647-2018)	Humedad, % (p/p)	BS EN 14774-3:2009	a	a	22,90
	Cenizas, % (p/p)	BS EN 14775:2009	a	a	17,52*
	Carbono, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	34,06
	Nitrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	3,32
	Hidrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	11,44
	Azufre, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,34
Juan Lara Muestra 3 (LB-648-2018)	Humedad, % (p/p)	BS EN 14774-3:2009	a	a	27,62
	Cenizas, % (p/p)	BS EN 14775:2009	a	a	15,84*

Juan Lara Muestra 4 (LB-649-2018)	Carbono, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	27,16
	Nitrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	4,61
	Hidrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	14,8
	Azufre, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,56
	Humedad, % (p/p)	BS EN 14774- 3:2009	a	a	30,53
	Cenizas, % (p/p)	BS EN 14775:2009	a	a	17,87*
	Carbono, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	28,48
	Nitrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	4,09
	Hidrógeno, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	14,9
	Azufre, % (p/p)	BS EN 15104:2011	a	a	0,32

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

* Resultados calculados en base seca


 Ricardo Narváez
 Responsable Técnico

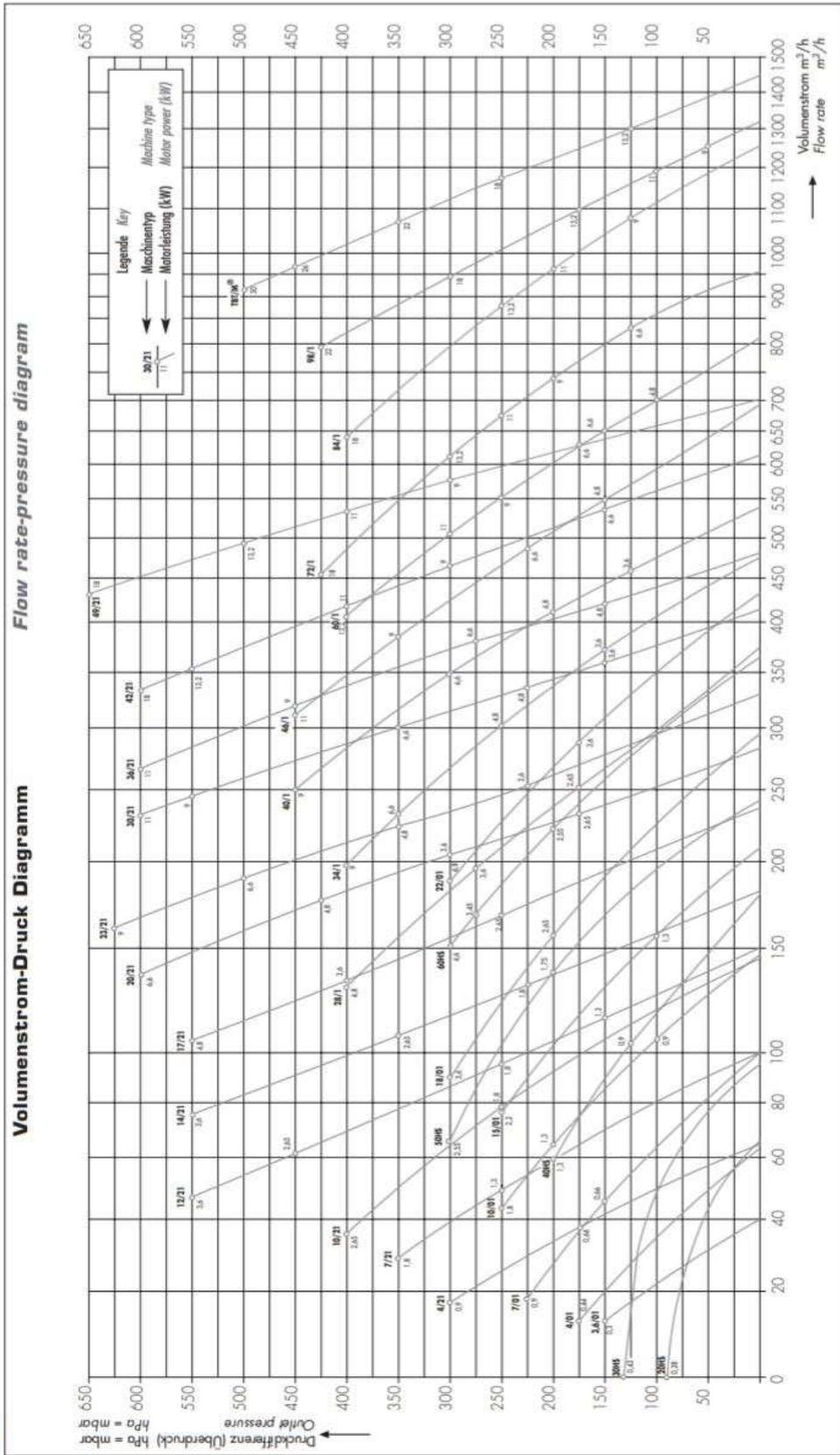



 Paola Cuji
 Analista Técnico

Anexo C: Diagrama caudal-presión

Druckbetrieb 60Hz-Motoren (3500 U/min)
Blowers with 60 Hz motors (3500 rpm)

60 Hz



Anexo D: Ubicación de la planta de cogeneración

Anexo E: Rediseño red eléctrica

Anexo F: Diagrama de conexión del tablero de transferencia

