

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO**



**PROPUESTA TÉCNICA DE UNA PLANTA PILOTO PARA
COGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA
APROVECHANDO LA BIOMASA DE GRANJAS AVÍCOLA**

**PRESENTADO POR:
ING. JOSÉ JÓVITO TORRES AMAYA**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2024

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
MAESTRO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE

Título:

**PROPUESTA TÉCNICA DE UNA PLANTA PILOTO PARA
COGENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA
APROVECHANDO LA BIOMASA DE GRANJAS AVÍCOLA**

Presentado por:

ING. JOSÉ JÓVITO TORRES AMAYA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M. Sc. e Ing. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE DE 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M. Sc. e Ing. ÁLVARO RENÉ FLAMENCO RAMOS

Contenido

RESUMEN.....	i
INTRODUCCIÓN.....	ii
JUSTIFICACIÓN.....	iii
OBJETIVOS.....	iv
GENERAL.....	iv
ESPECÍFICOS:.....	iv
CAPITULO 1 - BIOMASA RESIDUAL HÚMEDA EN EL SALVADOR.....	1
Antecedentes en El Salvador:.....	1
1.1. Beneficios en el País por Uso de Biomasa Residual (BR).....	3
1.2. Futuro del Biogás en El Salvador.....	4
1.3. Casos Ejemplos de Plantas de Biogás.....	5
1.4. Biodigestor Industrias La Constancia.....	5
1.4.1. Etapa Anaerobia.....	6
1.4.2. Biodigestor Tiro Ascendente.....	7
1.4.3. Diagrama de procesos para la producción de biogás en Industria La Constancia.....	8
1.5. Biodigestor de Grupo Campestre.....	9
1.5.1. Caracterización del Biogás.....	12
1.5.2. Aspectos Ambientales.....	13
1.5.3. Esquema de la planta de biodigestion.....	14
1.6. Biodigestor Hacienda San Ramón.....	15
1.6.1. Uso Potencial del Estiércol Bovino.....	16
1.6.2. Diseño conceptual de la planta de biodigestión.....	18
CAPITULO 2 - LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	19
Características del Proceso Anaeróbico.....	19
Hidrolisis.....	21
2.1. Parámetros Principales que Inciden en la Producción de Biogás.....	24
2.1.1. Ausencia de Oxígeno.....	25
2.1.2. Tipo y Calidad de Biomasa Empleada en el Biodigestor.....	26

2.1.3.	La Co digestión.....	27
2.1.4.	Higienización.....	28
2.1.5.	Mezcla y Homogenización.....	28
2.1.6.	Alimentación al Digestor	29
2.1.7.	Masa Seca (MS).....	29
2.1.8.	Masa Volátil (MV)	30
2.1.9.	Carga Orgánica Volumétrica (COV)	30
2.1.10.	Temperatura de Proceso	32
2.1.12.	Tiempo de Retención.....	33
2.1.13.	El pH de la Mezcla Cargada	33
2.1.14.	Producción de Gallinaza.....	34
2.1.15.	Proceso de Biometanización con Gallinaza.....	37
2.1.16.	Procesamiento y uso de la Gallinaza para Producir Biogás	37
2.1.17.	Beneficios Aportados por el Biodigestor	38
2.1.18.	Aprovechamiento del Biogás.....	38
2.2.	El Gas Metano	38
CAPÍTULO 3 – DIMENSIONAMIENTO DEL DIGESTOR.....		40
Dimensionamiento de Biodigestor.....		40
3.1.	Etapas y Tipos de Biodigestores.....	40
3.1.1.	La Producción de Biogás en el Biodigestor	41
3.1.2.	Tipos de Biodigestores.....	41
3.1.3.	Biodigestor de Flujo Discontinuo.....	42
3.1.4.	Biodigestor de Flujo Semi Continuo	42
3.1.5.	Biodigestor de Flujo Continuo	42
3.1.6.	Biodigestor con Geomembrana	43
3.1.7.	Biodigestor Prefabricado.....	44
3.2.	Dimensionamiento del Volumen del Biodigestor	45
3.3.	Cantidad de Materia Prima.....	45
3.4.	Dimensionamiento de la Planta de Biogás.....	48
Dimensionamiento de Biodigestor con Biomasa Avícola.....		48
3.4.1.	Método de diseño 1.....	48

3.4.2.	Método de diseño 2 Para Dimensionar el Biodigestor	51
	Dimensionamiento del Biodigestor con Biomasa Bovina.....	61
3.4.3.	Método de diseño 2.....	61
3.5.	Sistema de calefacción en los biodigestores	71
3.5.1.	Pérdidas por transferencia de calor en primer digestor.....	72
3.3.1.	Pérdidas por transferencia de calor en segundo digestor.....	75
3.3.2.	Energía térmica para el proceso de digestión.....	76
3.5.2.	Dimensionamiento de la Unidad de Cogeneración	77
3.5.3.	Selección de la unidad de cogeneración y el consumo de biogás	80
3.5.4.	Consumo de Biogás en la Cogeneración.....	82
3.5.5.	Excedente de biogás.....	83
3.6.	Antorcha de Biogás.....	85
3.7.	Generación de electricidad.....	85
CAPÍTULO 4 – EVALUACIÓN ECONÓMICA		87
4.	Desarrollo de la Propuesta Económica.....	87
4.1.	Alcance del Proyecto	87
4.2.	Descripción del proyecto.....	87
4.3.	Evaluación Económica del Proyecto	88
4.3.1.	Análisis Financiero	90
4.3.2.	Detalles de las inversiones	91
4.3.3.	Fuentes de Financiamiento.....	94
4.3.4.	Apalancamiento financiero	96
4.3.5.	Egresos económicos de la planta.....	97
4.3.6.	Ingresos económicos de la planta.....	98
4.3.7.	Ahorros Económicos en el Consumo de Electricidad	106
4.4.	Análisis Técnica Económica del Proyecto.....	107
4.4.1.	Ventajas Convincentes Con la Planta de Biogás.....	109
4.4.2.	Generación de Energía Térmica	110
4.4.3.	Inversión Rentable	111
4.4.4.	Beneficios Económicos de la Planta Avícola.....	111
4.4.5.	PAYBACK.....	112

4.4.6.	VAN (Valor Actual Neto).....	112
4.4.7.	TIR (Tasa Interna de Retorno)	112
4.4.8.	Relación Beneficio Costo.....	113
4.4.9.	Análisis de Sensibilidad Financiera.....	114
4.4.10.	Sensibilidad Financiera con Capital Propio.....	117
4.5.	Propuesta de Sistema Fotovoltaico SFV	120
4.5.1.	Normas y Estándares de Instalación	123
4.5.2.	Configuración de la instalación	123
4.5.3.	Generación de energía eléctrica.....	124
4.6.	Propuesta técnica del biodigestor	126
4.6.1.	Evaluación del lugar para llevar a cabo la propuesta de proyecto piloto de biodigestores	127
CONCLUSIONES		131
RECOMENDACIONES		134
BIBLIOGRAFÍA		135

Índice de Figuras

Figura 1. 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas	17
Figura 2. El estiércol de las vacas es el componente más potente para alimentar un biodigestor, debido a que genera más cantidad de metano que contribuye a una producción fácil y mayor de energía.	3
Figura 3. Proyecto Grupo Campestre produce energía eléctrica con biogás, cortesía del Grupo Campestre.	3
Figura 4. CEL realizo monitoreo de la calidad del agua y aire en la zona donde se	4
Figura 5. Aguas contienen ciertos porcentajes de levaduras, polvos e inclusive materia orgánica vegetal el agua proveniente de los procesos llega a la planta de tratamiento por tuberías de acero inoxidable. (Fuente: https://es.slideshare.net/GenMen/biogas-usos-en-el-salvador)	6
Figura 6. El reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA o UASB por sus siglas en inglés) es un proceso de un solo tanque. Las aguas residuales entran al reactor desde el fondo y fluyen hacia arriba. Un manto de lodo suspendido filtra y trata las aguas residuales conforme pasan a través del manto.	7
Figura 7. Diagrama de procesos de Biogás en Industria La Constancia.	8
Figura 8. Dos enormes biodigestores procesan anualmente alrededor de 40 000 toneladas de desechos orgánicos en Grupo Campestre, en El Salvador. (“Granjas avícolas salvadoreñas producen biogás y alivian conflictos socioambientales”, 2024)	9
Figura 9. Diagrama de procesos para la producción de biogás en Grupo Campestre.	14
Figura 10. Planta arquitectónica del biodigestor en Hacienda San Ramón.	15
Figura 11. Hacienda San Ramón tiene un hato de ganado lechero de 1,200 unidades.	16
Figura 12. En esta figura se observa el ganado en los estables y el estiércol generador por las mismas la cual es Aprovechado para la producción de biogás y energía eléctrica. (fuente: fotografía de fuente propia).	17
Figura 13. Diseño conceptual del proyecto en Hacienda San Ramón.	18
Figura 14. Proceso de la digestión anaerobia en un biodigestor para la obtención de biogás (Elaboración propia)	19
Figura 15. Ciclo anaeróbico (Elaboración propia)	21
Figura 16. Tanque de higienización para desechos de restaurantes	28

Figura 17. Diamante del metano, NFPA 704	39
Figura 18. Materia orgánica para la producción de biogás	41
Figura 19. Visión general de los tipos de biodigestores.	42
Figura 20. Biodigestor con geomembrana.	43
Figura 21. Biodigestor vertical prefabricado.....	44
Figura 22. Tanque de alimentación al biodigestor.....	54
Figura 23. Balance de masa global (Elaboración propia)	57
Figura 24. Dimensiones de biodigestores y cúpula del BD 2.	60
Figura 25. Tanque de alimentación al bio digestor con excretas de ganado.	63
Figura 26. Balance de masa global con excreta bovina (fuente propia).	65
Figura 27. Dimensiones de biodigestores y cúpula del BD 2.	69
Figura 28. Dimensiones Tanque de alimentación con sustrato de gallinaza y excretas de bovino.....	70
Figura 29. Dimensiones Biodigestor 1 con sustrato de gallinaza y excretas de bovino.	70
Figura 30. Dimensiones Biodigestor 2 y cúpula con sustrato de gallinaza y excretas de bovino.	71
Figura 31. Temperatura promedio en Ciudad Arce. La temporada calurosa dura 2,1 meses, del 1 de marzo al 5 de mayo, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 30 °C. fuente: https://es.weatherspark.com/y/12271/Clima-promedio-en-Ciudad-Arce-El-Salvador-durante-todo-el-a%C3%B1o	73
Figura 32. Generador de biogás y serie CHP ECB- Cummins EC-250B6.	84
Figura 33. Generador de biogás ECOMAX® Biogás – Ecomax 1.5 Bio.....	84
Figura 34. Antorcha HE y HTE de llama baja, cámara de combustión con aislamiento multicapa, encendedor de electrodo y sensor UV para detección de llama continua. Fuente: https://www.progecosrl.com/es/antorcha-de-llama-oculta.html	85
Figura 35. Distribución de las etapas de una planta de biogás (elaboración propia).....	107
Figura 36. Parámetros estimados para cogeneración considerando la eficiencia en la transformación del biogás (Elaboración propia)	108
Figura 37. Aprovechamiento de los gases de escape y sistemas auxiliares para producir energía térmica (Elaboración propia).....	108
Figura 38. Representación gráfica del VAN y TIR del proyecto.	113

Figura 39. Análisis de Sensibilidad Financiera	115
Figura 40. Detalla el comportamiento de acuerdo al incremento en capital propio y en el financiamiento	118
Figura 41. Detalla el comportamiento de gastos financieros acuerdo al incremento en capital.	118
Figura 42. Análisis de Sensibilidad Financiera ante el incremento en capital propio.	119
Figura 43. Distribución de los techos con potencia de instalación en la planta (Elaboración propia).	120
Figura 44. Proporción de rendimiento del sistema fotovoltaico.....	121
Figura 45. Producciones normalizadas (por kWp instalado)	122
Figura 46. Balances y resultados principales	122
Figura 47. Esquemas de los procesos para el tratamiento biológico de la biomasa residual de la planta (Elaboración propia).	127
Figura 48. Diagrama de procesos de la planta avícola (Elaboración propia).....	128
Figura 49. Diagrama del sistema de tratamiento anaerobio de la biomasa residual de la planta avícola (Elaboración propia)	129

Índice de tablas

Tabla 1. Cargas y cantidades de biomasa al biodigestor.....	10
Tabla 2. Caracterización de sustratos del biodigestor.....	10
Tabla 3. Parámetros de monitoreo del biodigestor.	11
Tabla 4. Porcentaje de elemento en la composición del biogás.	12
Tabla 5. Caracterización del Digestato Solido	12
Tabla 6. Caracterización del Digestato Liquido	12
Tabla 7. Aplicaciones y eficiencia del biogás resultante.	13
Tabla 8. Monitoreo de parámetros ambientales.....	13
Tabla 9. Parámetros físicos y químicos para la digestión anaeróbica.....	25
Tabla 10. Contenido de agua de diferentes sustratos.	30
Tabla 11. Cálculo de COV por medio MS y MV	31
Tabla 12. Estimación de la producción de deyecciones de las ponedoras	34
Tabla 13. Valor como abono de la gallinaza de ponedoras de jaula.....	34
Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos de la gallinaza.....	35
Tabla 15. Composición y rendimiento de biogás de diferentes materias primas.	35
Tabla 16. Clasificación de porcentaje de sólidos en la excreta animal.....	36
Tabla 17. Valores específicos para estimar la producción de biogás.	36
Tabla 18. Parámetros de dimensionamiento 1.....	48
Tabla 19. Parámetros de dimensionamiento 2.....	52
Tabla 20. Tabla comparativa de parámetros de los biodigestores	60
<i>Tabla 21. Parámetros de dimensionamiento con biomasa bovina.</i>	<i>61</i>
Tabla 22. Tabla comparativa de parámetros de los biodigestores con excretas bovinas.	68
Tabla 23. Dimensiones del tanque de alimentación con excretas de gallinaza y bovino.	70
Tabla 24. Dimensiones del biodigestor 1 con excretas de gallinaza y bovino.	70
Tabla 25. Dimensiones del biodigestor 2 y cúpula, excretas de gallinaza y bovina.....	71
Tabla 26. Energía térmica requerida por el sistema de calefacción y es suministrar la unidad de cogeneración.....	77
Tabla 27. Cuadro de parámetros en el diseño de la planta.	79
Tabla 28. Cuadro comparativo para selección de equipos de cogeneración.	79
Tabla 29. Generación de biogás con excretas de gallinaza y bovino en ambos digestores.	83

Tabla 30. Distribución de áreas generales y consumo de energía eléctrica del proyecto.	88
Tabla 31. Rendimientos de productos producidos por la planta.....	90
Tabla 32. Detalle de costos preliminares para adecuar la infraestructura del terreno	91
Tabla 33. Detalle de costos para el apartado de los biodigestores.....	91
Tabla 34. Listado de costos del equipamiento en los biodigestores.	92
Tabla 35. Costos de la subestación de energía eléctrica.	93
Tabla 36. Costos por consultorías de prefactibilidad de los biodigestores.	93
Tabla 37. Distribución para el financiamiento de la construcción de los biodigestores.	94
Tabla 38. Depreciación estimada de equipos y maquinaria	95
Tabla 39. Monto para financiar y sus condiciones de pago.	96
Tabla 40. Amortizaciones del financiamiento en un lazo de diez años.	97
Tabla 41. Detalle de gastos administrativos.....	97
Tabla 42. Detalle de operación y mantenimientos.....	98
Tabla 43. Detalle de costos externos.....	98
Tabla 44. Producción y venta de huevos en el primer año.....	99
Tabla 45. Producción y venta de huevos en el segundo año.	99
Tabla 46. Producción y venta de Bio Abonos en el primer año.	100
Tabla 47. Producción y venta de Bio Abonos en el segundo año.....	101
Tabla 48. Consumos de energía eléctrica en la planta de forma mensual.....	102
Tabla 49. Costos de la energía eléctrica en la planta.	103
Tabla 50. Detalle de estimación por ingresos económicos de la generación de energía a través de biogás.....	104
Tabla 51. Cuadro resumen de estimaciones por ingresos económicos anuales de la planta en el 2do año	104
Tabla 52. Flujo de caja estimado para la planta de biogás	105
Tabla 53. Ingresos estimados de la planta en actividades principales en el 2do año.....	111
Tabla 54. Análisis de Sensibilidad Financiera	114
Tabla 55. VAN con mínimos y máximos en montos a financiar y tasa de interés.....	115
Tabla 56. Beneficio/Costo con mínimos y máximos en montos a financiar y tasa de interés.	116
Tabla 57. Periodo de Recuperación con mínimos y máximos en montos a financiar y tasa de interés.	116

Tabla 58. Análisis del incremento en capital propio y del financiamiento del proyecto.....	117
Tabla 59. Análisis de los gastos económicos con el aumento del capital propio vs el financiamiento.	117
Tabla 60. Análisis de los indicadores económicos con el aumento del capital propio.	119
Tabla 61. Parámetros primarios del sistema fotovoltaico en la planta avícola.	121
Tabla 62. Resultados principales en la producción del sistema.	121
Tabla 63. Distribución para el financiamiento de la construcción del sistema híbrido (Biogás/SFV).....	125
Tabla 64. Variación de los indicadores económicos con un sistema híbrido de generación eléctrica.	126
Tabla 65. Flujo de caja estimado para la planta híbrida (Biogás y SFV)	130

DEFINICIONES

Energías Renovables: De acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española (RAE), se consideran energías renovables las energías cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable.

Bacterias Anaeróbicas: son microorganismos que son capaces de sobrevivir y multiplicarse en ambientes que no tienen oxígeno.

Megavatios: Representado como MW, es una unidad de potencia equivalente a un millón de vatios.

AMSS: Área Metropolitana de San Salvador.

Hato: El concepto de hato hace referencia a una porción de ganado mayor (vacas, toros, bueyes, búfalos, caballos, etc.) y a las fincas destinadas a la crianza de estos animales. Así tenemos que el hato ganadero de un país se conforma por todos los tipos de ganado que se explotan en esa región.

CH₄: El metano es un gas natural, incoloro e inodoro que se produce debido a la digestión de materia orgánica, como las plantas. Su fórmula química es CH₄ (un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno).

CO₂: El **dióxido de carbono** (fórmula química CO₂) es un compuesto de carbono y oxígeno que existe como gas incoloro en condiciones de temperatura y presión estándar.

Biol: Resultado de la fermentación de estiércol y agua a través de la descomposición y transformaciones químicas de residuos orgánicos en un ambiente anaerobio.

NH₃: Amoníaco.

H₂S: Ácido sulfhídrico.

N₂: Nitrógeno en su forma molecular

Bacterias metanogénicas: Bacterias productoras de gas metano.

Hidrogeno H₂: Forma de molécula diatómica del hidrogeno.

Oxigeno molecular: O₂, forma parte de la atmósfera y que hace posible nuestra respiración y la vida.

DQO: Demanda Química de Oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte.

Grupo acéticos CH₃-COOH: Es un compuesto cristalino que pertenece al grupo de los ácidos carboxílicos, su fórmula química es CH₃ COOH; es un líquido cristalino, con olor peculiar, con

propiedades corrosivas e irritantes, es una sustancia higroscópica, que absorbe el agua de diversas fuentes.

Ácidos propanoico: El ácido propanoico (también llamado ácido propiónico) es un ácido carboxílico monoprótico que puede encontrarse naturalmente, de fórmula molecular $C_3H_6O_2$

Bacterias metanogénicas acetoclasticas: Bacterias acetoclasticas utilizan ácido acético, metanol y algunas aminas presentes antes de la digestión.

Bacterias metanogénicas hidrogenófilas: Bacterias hidrogenófilas cuya finalidad es romper los enlaces complejos de proteínas, celulosa, lignina o lípidos en monómeros o moléculas como aminoácidos, glucosa, ácidos grasos y glicerol.

Medios anóxicos: La condición de un ambiente en el que el oxígeno libre es escaso o inexistente.

Metalogénesis: Proceso de alteración hidrotermal al intercambio químico ocurrido durante una interacción fluido hidrotermal-roca.

Fermentación de un polisacárido: Carbohidratos complejos formados por un gran número de azúcares simples, los cuales se unen entre sí mediante los enlaces glucosídicos

Bacterias procariotas: Los procariotas no tienen núcleo definido y ni organelos rodeados por membrana.

Bacterias celulolíticas: La celobiosa es un inhibidor de la hidrólisis enzimática llevada a cabo por endoglucanasas y exoglucanasa, reduciendo su eficacia. Finalmente, en la última etapa, se produce la degradación de la celobiosa a glucosa por la acción de la β -1,4-glucosidasa.

Potencial Redox: es una reacción de transferencia de electrones. La especie que pierde los electrones se oxida y la que los gana se reduce. Se llama reductor a la especie que cede los electrones y oxidante a la que los capta.

El pH: es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14.

Ambientes anóxicos: condición de un ambiente en el que el oxígeno libre es escaso o inexistente.

Relación C:N:P: relación Carbono, nitrógeno, fósforo

Minerales Na, K, Mg, Mn: Sodio, potasio, magnesio y manganeso, respectivamente.

Biomasa con biol: es el resultado de la fermentación de estiércol y agua a través de la descomposición y transformaciones químicas de residuos orgánicos en un ambiente anaerobio. Tras salir del biodigestor, este material ya no huele y no atrae insectos una vez utilizado en los suelos.

MV: materia orgánica volátil

RTH: tiempo de retención hidráulica.

Temperatura psicrófila: Los microorganismos psicrófilos son aquellos cuya temperatura de crecimiento óptima es baja, aproximadamente 15°C o inferior, y poseen una temperatura máxima de crecimiento de aproximadamente 20°C

Temperatura mesófila: Los microorganismos que tienen su óptimo de desarrollo de 25 °C a 40 °C y se pueden encontrar en el suelo, plantas, animales.

Temperatura termófila: Las bacterias termófilas son aquellas que se desarrollan a temperaturas superiores a 45°C, pudiendo superar incluso los 100°C (hipertermófilos) siempre que exista agua en estado líquido, lo que se consigue si la presión es elevada como ocurre en las profundidades oceánicas.

Inhibidores: Un inhibidor puede unirse a una enzima y bloquear la unión del sustrato, por ejemplo, al pegarse al sitio activo. Esto se conoce como inhibición competitiva porque el inhibidor "compite" con el sustrato por la enzima. Es decir, solo el inhibidor o bien el sustrato puede estar unido a la enzima en un momento dado.

PCI: Poder calorífico interior (kWh/kg)

GWP: miden cuánta energía absorben las emisiones de una tonelada de un gas determinado durante un período de tiempo, en relación con las emisiones de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂).

NFPA 704: es la norma que explica el "**diamante de materiales peligrosos**" establecido por la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (inglés: National Fire Protection Association), utilizado para comunicar los riesgos de los materiales peligrosos.

MPC: materia prima para la carga.

PE: Las tuberías de polietileno, también conocido por su abreviatura PE, son las más extendidas en su uso para los sistemas de riego, principalmente en red secundaria para instalaciones agrícolas.

PE-Xa: Las tuberías de polietileno reticulado (PE-Xa) Pexgol tienen muchas características que las convierten en una alternativa excelente y rentable comparadas a tuberías de otros materiales: Excelente resistencia química y a la corrosión (agentes químicos, lodos, materiales tóxicos, materiales radiactivos).

kWe: Kilowatts eléctricos.

kWth.: Kilowatts térmicos.

“Una fuente renovable para la generación de energía es la biomasa, la cual por medio de un proceso anaeróbico en un biodigestor produce biogás, el cual puede ser usado tanto para cocción, calefacción, generar electricidad entre otros. Este gas fue descubierto en el año de 1667 y para el año de 1884 Pasteur y Gayón descubrieron que producirlo con estiércol de animales aumentaba el poder calorífico y finalmente en 1896 comenzó el uso para calentar e iluminar las calles en Exeter Inglaterra y más tarde para la crisis energética de 1970, estudios realizados de biogás llevaron al desarrollo de actividades que conllevaron a la generación de energía eléctrica ya de forma industrial.”



Figura 1. 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad

RESUMEN.

Este documento de trabajo de graduación establece la divulgación de los logros que proyecta esta propuesta de construcción de una planta para tratamiento de los residuos de una granja avícola y ganado bovino, que, por un lado reduzca la contaminación por los efluentes del proceso productivo, pero que al mismo tiempo permita generar biogás para producir energía eléctrica y térmica para autoconsumo.

El proyecto se caracteriza por la sencillez de su aplicación tecnológica, consistente en un digestor anaeróbico en el cual se producirá el biogás para accionar un grupo de motores generador de combustión interna, cogenerando energía eléctrica y térmica que será utilizada en los procesos de la planta. Lo anterior permitirá una reducción sustancial en la facturación de los costos de la energía proveniente de los combustibles fósiles.

En cuanto a la materia prima para la planta de biogás, ésta se obtendrá del estiércol de la gallinaza y del ganado bovino producida en la planta garantiza la generación continua del volumen requerido de excretas al digestor.

Como filosofía del uso eficiente de los espacios y la adopción de la tecnología más apropiada para la generación de energía eléctrica, el diseño de las estructuras de techo de todo el complejo cuenta con a la capacidad de carga y orientación hacia el sur para poder instalar una planta generadora fotovoltaica, con lo cual se ampliará a capacidad de generación de energía, convirtiendo la planta en una central híbrida de generación eléctrica.

Adicionalmente al estudio de factibilidad técnica también se crea un estudio de factibilidad económica con lo cual se complementa el proyecto y permite la mejor toma de decisión en cuando a la justificación de su implementación.

INTRODUCCIÓN

El estilo de vida de la actual sociedad exige una mayor demanda de energía de alta calidad como la eléctrica, por lo que cada vez es primordial la ampliación de la generación de energía proveniente de fuentes primarias de energía para suplir la demanda de forma segura y con énfasis en la conservación del medio ambiente.

Una de estas fuentes es el biogás, considerado como una fuente de energía primaria renovable y auto gestionable, que puede usarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas como producción de energía eléctrica o térmica en un proceso de cogeneración.

Según (MAG, 2000) el uso de desechos orgánicos como los avícolas en El Salvador representan un volumen importante de biomasa residual mediante los cuales y, empleando tecnología apropiada, se puede obtener biogás para su uso en un proceso de cogeneración. Ante la poca difusión del aprovechamiento de este tipo de biomasa residual húmeda, en el presente estudio fue importante realizar una investigación de campo en las principales industrias avícolas del país y así poder estudiar el tipo de tecnologías que transforman la biomasa de las granjas avícolas y su aprovechamiento en procesos de cogeneración.

La implementación de un proyecto como el antes mencionado requiere que éste sea viable tanto técnica como económicamente, lo cual fue uno de los principales objetivos del trabajo de investigación, pero también, la mitigación de focos de contaminación asociados a esta agroindustria y explorar alternativas a las prácticas tradicionales de tratamiento de los desechos orgánicos de la granja avícola y la revalorización de estos.

JUSTIFICACIÓN

En la búsqueda de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, la planta avícola propone innovar en sus procesos de producción, revalorizando sus residuos orgánicos mediante un tratamiento a sus aguas residuales provenientes de los distintos procesos de producción.

Dentro de este contexto, la planta aprovechará la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica para producir biogás, logrando una propuesta energética de mucho interés la cual es una opción amigable con el medio ambiente dado que permite la disposición adecuada de la materia orgánica, mitigando focos de contaminación y permitiendo la autonomía en el consumo de energía eléctrica y térmica a través de una planta de cogeneración. El biogás, considerado como la “energía renovable de futuro” es una energía limpia se considera una alternativa al gas natural, que creará una cadena de valor a la producción de metano en biodigestores y será usado como combustible limpio en la producción de energía eléctrica y calor para procesos industriales. En la actualidad el uso de biodigestores está ampliamente difundido debido que las propias características termoquímicas del biogás, principalmente las del gas metano (CH_4), que han permitido su almacenamiento y posterior utilización de forma segura.

También en el diseño de las instalaciones se consideró tanto la orientación con inclinación de los techos para el aprovechamiento de recurso solar mediante tecnología fotovoltaica. Lo anterior convertirá a la planta en una central híbrida (Biogás y solar) de producción de energía eléctrica.

Por todo lo anterior, el proyecto tiene la firma filosofía de fomenta la autonomía energética y abrir así nuevas oportunidades para lograr un futuro más sostenible y resiliente con el medio ambiente. En tal razón, el sistema híbrido (biogás-solar) permitirá generar su propia energía, reducir su dependencia de la red eléctrica convencional, además genera el potencial de comercializar los excedentes de electricidad.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica y económica de una propuesta de diseño de un biodigestor para aprovechar la biomasa generada en una granja avícola del municipio de Ciudad Arce, La Libertad.

ESPECÍFICOS:

1. Determinar el potencial energético de la biomasa residual de la agroindustria avícola,
2. Desarrollar una propuesta de diseño de biodigestor para la producción de biogás para su uso en cogeneración en una granja avícola según el recurso de biomasa disponible,
3. Evaluar las principales tecnologías para el aprovechamiento del biogás procedente de biomasa residual de granjas avícolas para cogeneración, y
4. Evaluar la viabilidad económica de la cogeneración a través de un biodigestor para abastecer parcialmente la demanda energética de la granja avícola.

CAPITULO 1 - BIOMASA RESIDUAL HÚMEDA EN EL SALVADOR

Antecedentes en El Salvador:

El interés por las energías renovables¹ no deja de crecer día tras día y esto se debe principalmente al gran impacto ambiental causado por las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de los combustibles fósiles que las fuentes de energía convencional no renovable emplean, amplificado por las políticas energéticas basadas en tendencias mundiales que actualmente para la diversificación de la matriz energética del país.

De la totalidad de las energías renovables existentes, la producción de biogás procedente de la biomasa residual húmeda tiene un gran potencial de crecimiento y mucho futuro ya que además de producir energía con una menor emisión de gases contaminantes, también se gestiona los residuos de nuestra sociedad que suponen un problema cada vez más evidente.

El biogás es un combustible renovable que contiene, esencialmente, metano y dióxido de carbono. Además de su eficiencia, destaca por jugar un importante papel en el cuidado del medio ambiente, sobre todo gracias a que se obtiene a partir del tratamiento de los residuos orgánicos en un proceso de digestión anaerobia.

Esta fuente de energía destaca por sus numerosas aplicaciones tanto en la industria como en el área doméstica. No se puede olvidar su importante aportación a la reducción del cambio climático, la mejora en la calidad del aire debido a que no realiza emisiones de dióxido de azufre y reduce la dependencia de los combustibles de origen fósil. Asimismo, esta energía renovable también se debe valorar desde la vertiente socioeconómica, ya que la generación de este combustible representa una oportunidad de negocio para las zonas donde se emplazan estos proyectos, además de garantizarles el suministro eléctrico descentralizado.

Técnicamente, el biogás se genera gracias a que los microbios anaeróbicos² producen una biodegradación sin oxígeno de la materia orgánica. Además, hay que tener en cuenta que en este proceso no se genera metano puro, también se crean gases como el dióxido de carbono. Por lo tanto, el gas generado debe depurarse para su uso.

¹ Real Academia de la Lengua Española (RAE), se consideran energías renovables las energías cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable.

² Las bacterias anaerobias son microorganismos que son capaces de sobrevivir y multiplicarse en ambientes que no tienen oxígeno

No obstante, hay que señalar la importancia de contar con instalaciones (biodigestores) bien diseñados para evitar que se produzcan filtraciones al suelo o al aire de los gases generados ya que lo anterior sería perjudicial para el medio ambiente.

En El Salvador existen plantas que producen electricidad y calor de proceso mediante el aprovechamiento de los residuos orgánicos para obtener gas metano (biogás), y como ejemplo se tienen las instalaciones de la empresa Manejo Integral de los Desechos Sólidos (MIDES), el cual es un relleno sanitario instalados en el municipio de Nejapa con una planta anexa que tiene moto generadores que funcionan con biogás.

Por otro lado, en la zona occidental y central de El Salvador la instalación de biodigestores ha traído muchos beneficios medioambientales, entre ellos está la generación de energía eléctrica no contaminante y la obtención de abonos orgánicos de alta calidad que hacen más fértil el suelo y aumentan la producción de cualquier cultivo.

Los gases generados por los residuos naturales mal-utilizados se vuelven contaminantes del medio ambiente pues, al no ser procesados, tanto el excremento de animales, los desperdicios y las aguas negras liberan toxinas que son dañinas para la atmósfera, las plantas, los animales e incluso para el ser humano.

Según datos oficiales del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARN), el país produce alrededor de 3 mil 400 toneladas de desechos sólidos al día, de los cuales el 65.1% son orgánicos. Con 16 rellenos sanitarios autorizados, la empresa MIDES implementa el proyecto del biogás e inyecta a la red pública 10 megavatios³ de energía eléctrica amigable con el medio ambiente.

Con la constante optimización y alimentación del biodigestor, MIDES proyecta que para el 2025 podrá producir casi el triple⁴ de energía renovable. De acuerdo con MIDES, *“Este tipo de aparato se ha vuelto una buena alternativa para aprovechar los desechos orgánicos que carecen de depósitos, considerando que los rellenos sanitarios se están sobrecargando”* (Redacción, 2016)

³ Representado como MW, es una unidad de potencia equivalente a un millón de vatios

⁴ En 2016 inyecta a la red pública 10 megawatts de energía eléctrica, proyectando 30 megawatts en el 2025



Figura 2. El estiércol de las vacas es el componente más potente para alimentar un biodigestor, debido a que genera más cantidad de metano que contribuye a una producción fácil y mayor de energía.

Fuente: (Redacción, 2016)

1.1. Beneficios en el País por Uso de Biomasa Residual (BR)

A pesar de que la mayor cantidad de biodigestores se ha producido en el centro y occidente del país, la zona oriental empezó a incursionar en esta innovadora modalidad desde el 2013. San Miguel fue el pionero con la instalación del biodigestor de la granja Avícola Campestre, figura 3, que se alimenta de las aguas residuales de la matanza de pollos y de estiércol.

Este mecanismo se alimenta además con los sueros lácteos y el excremento de vaca de la granja Agropecuaria La Laguna. Según datos oficiales de la primera cadena de comida rápida salvadoreña, Pollo Campestre, el biodigestor produce 1,200.0 metros cúbicos de biogás por día, cantidad de energía que sustituye entre el 60% y 70% del consumo total del búnker productor de energía eléctrica.



Figura 3. Proyecto Grupo Campestre produce energía eléctrica con biogás, cortesía del Grupo Campestre.

1.2. Futuro del Biogás en El Salvador

Según (Magaña, 2024), en febrero de 2024 El Salvador aprobó ampliar las fuentes de sus recursos energéticos con la generación de energía usando biogás, gracias a un crédito que el Ministerio de Hacienda podrá suscribir con el Reino de Arabia Saudita por \$83 millones, luego del aval otorgado por la Asamblea Legislativa, se aprobó obtener los recursos para el proyecto “*Instalación de una planta de generación eléctrica con biogás en el río Acelhuate*”, que tiene como eje central el tratamiento de las aguas orgánicas y residuales que se vierten en el afluente, específicamente en el sector del río Urbina, y la generación de biogás, que es energía limpia.



Figura 4. CEL realizo monitoreo de la calidad del agua y aire en la zona donde se ubicará el colector y se construirá la planta de biogás. Foto /Diario El Salvador

El proyecto contará con una potencia bruta instalada de 5.43 megavatios (MW) que se obtendrán de generación biológica (biogás) con dos motogeneradores de 0.85 MWe cada uno, generando 2.9 MWe a través de biogás; además de 1.9 MWe mediante tecnología fotovoltaica y 0.45 MWe con la pequeña central hidroeléctrica. (Magaña, 2024).

Esta planta tiene como objetivo convertir un grave problema ambiental en un beneficio para el país al limpiar las aguas y generar energía de forma auto-sostenible. La planta saneará hasta un 70% de aguas residuales provenientes del AMSS⁵ por el río Acelhuate, contribuyendo al mejoramiento ambiental del país. (Consultores, 2021).

⁵ Área Metropolitana de San Salvador

1.3. Casos Ejemplos de Plantas de Biogás

Para contextualizar el presente trabajo, a continuación, se detalla brevemente algunos sistemas de aprovechamiento de la biomasa de residuos animales existente en el país los cuales han sido ocupados como ejemplo para la elaboración de este documento de trabajo de graduación. Cada sitio visitado se enfoca en producir biogás que se aprovecha como combustible para la producción de electricidad la que es utilizada en autoconsumo y vertida a la red pública. La biomasa utilizada en las plantas de estudio son la cama avícola, excretas de cerdos o ganado bovino.

En El Salvador existen empresas, que han implementado la utilización del biogás dentro de sus procesos o actividades industriales. A continuación, nuestros casos de investigación tendrán de referencia los Biodigestores ubicados en Industrias La Constancia, Grupo Campestre y la Hacienda San Ramón, que se mencionan a continuación:

1.4. Biodigestor Industrias La Constancia

Industrias La Constancia es una empresa subsidiaria de SABMiller, líderes en la producción de bebidas en San Salvador, El Salvador y a nivel mundial, las cuales incluyen agua envasada, bebidas carbonatadas, jugos, néctares, isotónicos y cervezas.

Dicha empresa, con la finalidad de reducir el efecto de contaminación de las aguas residuales, debido al proceso de elaboración de cervezas, instaló en el año 2008 una planta de tratamiento de aguas residuales con dos fines: uno, el ya mencionado tratamiento de aguas residuales y el otro, la generación de biogás, el cual es utilizado como combustible para las calderas dentro de la planta. La materia prima la cual es el agua a tratar proviene de varios procesos que se realizan en la elaboración de la cerveza dentro de la planta. Estas aguas contienen ciertos porcentajes de levaduras, polvos e inclusive materia orgánica vegetal el agua proveniente de los procesos llega a la planta de tratamiento por tuberías de acero inoxidable, por medio de la gravedad, las cuales se almacenan en un pozo conocido como estación de bombeo, y en la cual se poseen dos bombas sumergidas que transportan el afluente (líquido) hacia una criba automática, en la cual, por medio de un proceso de filtrado (tamizado), se separan todas las partículas sólidas mayores a 1 mm de diámetro. Dichos sólidos son removidos y llevados a un relleno sanitario. Una vez el afluente (líquido) es filtrado, se transporta por gravedad al siguiente proceso llamado proceso anaeróbico.

1.4.1. Etapa Anaerobia

El primer proceso de tratamiento de agua inicia con la descarga de los efluentes en un tanque de homogenización, en donde se deja reposar esta agua un tiempo entre 24 y 27 horas. En esta primera etapa se comienzan a producir ciertos gases, un factor importante a controlar en esta etapa es el pH del agua, que debe permanecer en un valor entre 8 y 10. En general las aguas que entran en el tanque poseen estas condiciones, sin embargo, cuando la producción es de un producto en específico, las condiciones de pH varían, por lo que se activa la alimentación de ácido clorhídrico si el pH es demasiado alto, o en su defecto, hidróxido de sodio si el pH es demasiado bajo.



Figura 5. Aguas contienen ciertos porcentajes de levaduras, polvos e inclusive materia orgánica vegetal el agua proveniente de los procesos llega a la planta de tratamiento por tuberías de acero inoxidable. (Fuente: <https://es.slideshare.net/GenMen/biogas-usos-en-el-salvador>)

En el segundo proceso pasa a un tanque de acidificación, donde las bacterias acetogénicas comienzan la descomposición anaeróbica, también conocida como hidrólisis. En esta etapa las cadenas largas de carbono son atacadas por estas bacterias y convertidas a cadenas cortas de carbono, para facilitar la producción de biogás en la siguiente etapa. El tiempo de retención en este tanque es de alrededor de 13 horas. En esta etapa ya hay formación de biogás, aunque en cantidades muy pequeñas, por lo tanto, no se aprovechan.

El tercer proceso es en donde se da la producción de biogás, se divide en dos fases, una de carga alta, en donde se reciben los lodos de la etapa de proceso anterior y la de carga baja que recibe los lodos tratados de la etapa de alta carga. En esta etapa se da la actividad de las bacterias

metanogénicas, las cuales son las encargadas de producir el biogás. El biogás producido en esta etapa es utilizado como combustible de calderas donde se produce el vapor utilizado para el proceso de producción de cerveza. En ciertas ocasiones la producción de biogás es más grande que la demanda energética de la planta, por lo que se recurre a la quema de este exceso por medio de una antorcha, evitando así la descarga de metano a la atmósfera, gas que tiene 21 veces el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) del CO₂.

Finalmente, los lodos son trasladados a una piscina en donde se bombea oxígeno al agua, por medio de tuberías que pasan a lo largo de la piscina de recolección, que además de la función de inyección de oxígeno, también funciona como mezclador del agua. Finalmente se obtienen dos efluentes: el de agua tratada y el lodo, éste último es prensado y puede ser utilizado como abono.

1.4.2. Biodigestor Tiro Ascendente

Un biodigestor de desechos orgánicos (llamado también como reactor), en su forma más simple, es un contenedor hermético, dentro del cual se deposita materia orgánica en determinada dilución con agua; esta mezcla es degradada mediante la fermentación anaerobia por acción de microorganismos, obteniendo como producto gas metano (biogás) y un subproducto líquido (biol).



Figura 6. El reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA o UASB por sus siglas en inglés) es un proceso de un solo tanque. Las aguas residuales entran al reactor desde el fondo y fluyen hacia arriba. Un manto de lodo suspendido filtra y trata las aguas residuales conforme pasan a través del manto

1.4.3. Diagrama de procesos para la producción de biogás en Industria La Constanca

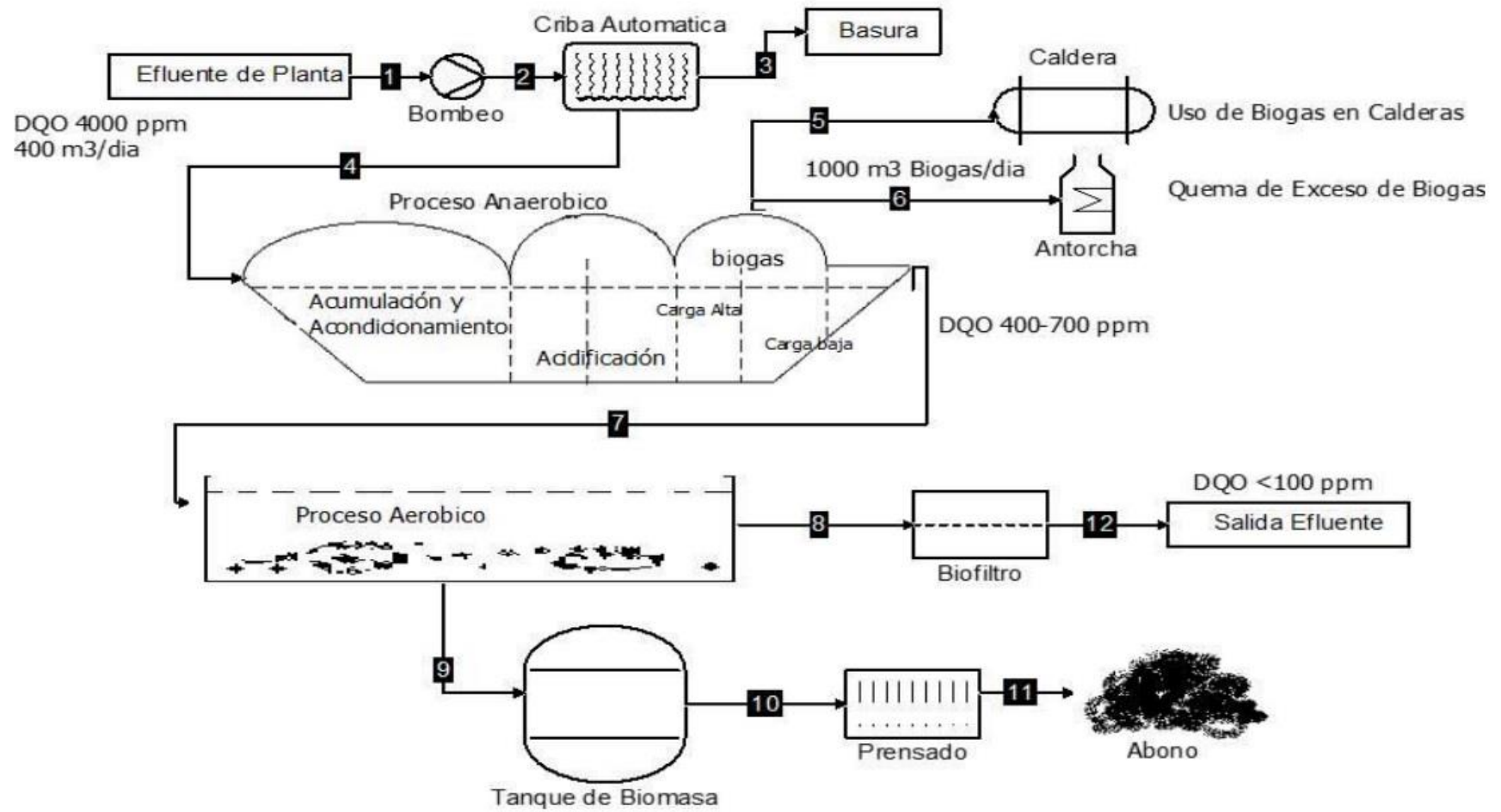


Figura 7. Diagrama de procesos de Biogás en Industria La Constanca.

1.5. Biodigestor de Grupo Campestre

El Grupo Campestre es una de las principales empresas avícolas de El Salvador y tiene en operación el biodigestor más grande del país para el aprovechamiento de la biomasa residual de algunos de sus procesos agroproductores. Las instalaciones están cerca de una laguna considerada sitio RAMSAR. La granja avícola aprovecha las aguas residuales de las plantas de proceso, el estiércol de la ganadería y las excretas de los galpones aviarios para producir biogás. La planta generadora de biogás está ubicada en la granja avícola “*El Brazo*”, que está localizada en el cantón El Brazo de San Miguel, utiliza las aguas residuales producidas en una granja avícola y una hacienda ganadera que pertenecen a dos empresas del Grupo Campestre. Bajo ese sistema se producen 35 mil m³ de biogás al mes y con ese proceso la avícola redujo el consumo de búnker para la caldera en un 100%, en los primeros dos años. En el presente, también usan GLP cuando es necesario. Además del ahorro que representa la generación de biogás, esta acción refuerza las actividades ambientalmente sostenibles de la empresa.



Figura 8. Dos enormes biodigestores procesan anualmente alrededor de 40 000 toneladas de desechos orgánicos en Grupo Campestre, en El Salvador. (“Granjas avícolas salvadoreñas producen biogás y alivian conflictos socioambientales”, 2024)

El estiércol se recoge de forma mecánica y automática, utilizando un sistema de tuberías especiales. Con esa tecnología se ha mejorado la recolección de las excretas. En la actualidad el hato⁶. La empresa se compone de 100 cabezas de ganado. Todos los efluentes llegan a un tanque colector que actúa como homogeneizador y alimenta al biodigestor, el cual está diseñado para funcionar con un sustrato líquido con solamente un 3-4% de sólidos. El biogás producido pasa

⁶ El concepto de hato hace referencia a una porción de ganado mayor (vacas, toros, bueyes, búfalos, caballos, etc.) y a las fincas destinadas a la crianza de estos animales. Así tenemos que el hato ganadero de un país se conforma por todos los tipos de ganado que se explotan en esa región.

a la caldera para producir vapor. El sistema incluyó la construcción de las instalaciones para el pretratamiento de las aguas residuales y excretas vacunas; así como la construcción de un biodigestor anaeróbico con capacidad para producir 24,000 m³ de biogás al mes. La operación el biodigestor incorpora todos los desechos de la cadena de procesamiento de Pollo Campestre y otros establecimientos que pudieran suministrar materia orgánica.

Este modelo de energía alternativa resultado del uso del biogás utilizando la biomasa con la composición de aguas de matanza, estiércol de ganado bovino y gallinaza, ofrece una serie de beneficios adicionales porque continúa con el ciclo de reutilización total de la biomasa inicial ayudando así al medio ambiente y reduciendo el uso de combustible fósil en los procesos de producción. El Bioabono es destinado como insumo en la fertilización de los campos de forraje para el ganado, el efluente de aguas tratadas se dispone para riego de los cultivos y el biogás se convierte en una fuente alternativa de energía renovable que se aprovecha en la planta de proceso. Datos básicos del sistema de biodigestión de acuerdo con el tipo de biomasa, cantidades y los tiempos de carga, obteniendo lo siguiente en la Tabla 1:

Tabla 1. Cargas y cantidades de biomasa al biodigestor.

Tipo de biomasa	Cantidad	Frecuencia de tiempo
Pollinaza	30 ton	diario
Guano	20 ton	diario
Excreta de vaca	18 ton	diario
Agua residual procesamiento de pollo	100 m ³	diario

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

Caracterización de sustratos: ver Tabla 2, Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Totales (ST), Nitrógeno Total, Amonio, Carbono Total. Conductividad, pH, Metales varios según sustrato, DBO, DQO:

Tabla 2. Caracterización de sustratos del biodigestor.

Sustrato	ST %	SV %	N %	P%	K%	C	pH (uni)	DQO (ppm)	DBO (ppm)	Cond (µmhos/cm)
Pollinaza	79.45	82.3	2.88	0.72	2.87	35	–	–	–	–
Guano	19.9	87.97	5.69	0.68	2.6	29	–	–	–	–
Excreta de vaca	27.31	50.93	1.62	0.52	1.74	30	–	–	–	–
Agua residual	3	60	294 (ppm)	210 (ppm)	–	–	6.9	3082	1080	1826

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

Metales en agua residual como Cadmio, Mercurio, Níquel, Plomo, Arsénico, Cromo y Cianuro; no detectable en análisis efectuados.

Los biodigestores tienen una capacidad de volumen de 5600 m³, con un volumen de almacenamiento de biogás de 1125 m³ por biodigestor y volumen de lodos almacenados de 400 m³, Los sólidos no digeridos en el biodigestor, denominados “digestato sólidos” son utilizado como Biofertilizantes orgánicos y son aplicados en 60 ha de cultivos agrícolas para la producción de forraje de ganado.

La infraestructura dispone de lagunas de estabilización con un volumen de 3000 m³, los “digestatos líquidos” son utilizados para el riego y fertilización orgánica de 60 ha de cultivos agrícolas para la producción de forraje de ganado.

La eficiencia de conversión de gas por cada biodigestor es de 4500 m³ al día, obteniendo un total de 9000 m³ de biogás por día. En cuanto a la eficiencia en la conversión de bio abono de acuerdo al ingreso de biomasa, esta es la siguiente:

- Digestato solido: 25 m³ /día al 80% humedad.

En la Tabla 3 se describen el control de los parámetros operativos en cada biodigestor, estos son:

Tabla 3. Parámetros de monitoreo del biodigestor.

Parámetro de control.	Medida
Temperatura del digestor	39 °C
pH	8
Nitrógeno total	3500 ppm
TAC (Alcalinidad Total- CaCO ₃)	12175 mg/l
FOS (Acido Grasos Volátiles - expresado en Ácido Acético)	2328 mg/l
FOSTAC	0.2
Solidos totales (ST)	97%
Solidos volátiles (SV)	60%
Nitrógeno total	3500 ppm
Relación carbono nitrógeno (C/N)	16
Conductividad eléctrica:	20 (mS/cm)
Amoniaco	190 mg/l

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

1.5.1. Caracterización del Biogás

Según la información recopilada durante la visita y detallada en la Tabla 4, el biogás obtenido en la planta tiene las características siguientes:

Tabla 4. Porcentaje de elemento en la composición del biogás.

Compuesto	Formula Química.	Cantidad %
Gas metano,	CH ₄	60 %
Dióxido de carbono	CO ₂	35-37%
Oxígeno diatómico	O ₂	1%
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0.3 %
Resto elemento son trazas como	N, H, etc.	% min

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

Caracterización del bio abono sólido, % de Nitrógeno, Potasio y demás compuestos. Ver Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización del Digestato Solido

Compuesto	Formula Química.	Cantidad [kg/ton] %
Nitrógeno	N	3.57 Kg/ton
Oxido fosfórico	P ₂ O ₅	5.05 Kg/ton
Oxido de potasio	K ₂ O	3.68 kg/ton
Solidos totales (ST)	ST.	30%

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

Caracterización del bio abono líquido, % de Nitrógeno, Potasio y demás compuestos. Ver Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del Digestato Liquido

Compuesto	Formula Química.	Cantidad [kg/ton] %
Nitrógeno	N	4.61 Kg/ton
Oxido fosfórico	P ₂ O ₅	3.12 Kg/ton
Oxido de potasio	K ₂ O	11 kg/ton
Solidos totales (ST)	ST.	5%

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

Según se muestra en la Figura 8, la forma constructiva del biodigestor es tipo domo fijo, continuo y de mezcla completa, el tiempo de residencia de la biomasa o materia prima es de cuarenta y cinco días, para el proceso de depuración física del biogás se emplea una columna de carbón activo para desulfurar el biogás.

Los productos resultantes del proceso anaerobio del biodigestor son empleados como combustible gaseoso para producción de energía eléctrica y vapor de agua, todo mediante un proceso de cogeneración, cuya eficiencia de conversión es la que se indica en la Tabla 7.

Tabla 7. Aplicaciones y eficiencia del biogás resultante.

Aplicación	Eficiencia
Energía eléctrica	0.4
Energía Térmica, vapor	0.35
Eficiencia total	0.75

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

La producción total de energía eléctrica y vapor al mes de 450 MWh/mes, año es de 5400 MW/año; producción diaria de vapor que se emplea la planta de procesamiento de pollos es de 16800 kg de vapor por día. Estos se generan con el calor residual de los gases de combustión. En términos económicos estimados por la venta de electricidad a la distribuidora de energía eléctrica local es de 120,000.00 USD mensuales. Con una tasa de retorno estimada de la inversión de 37.2% y un periodo simple de retorno de la inversión de siete años. En cuanto al detalle de los costos directos e indirectos, éstos son del orden de 40,000.00 USD mensuales.

1.5.2. Aspectos Ambientales.

En la Tabla 8 se detallan los impactos ambientales negativos propios de la planta con operaciones a escala han sido controlados, no generan impacto en la salud de las personas en la planta y comunidades circundantes.

Tabla 8. Monitoreo de parámetros ambientales

Parámetro	Dato técnico	Estado
Ruido	Menor a 70 dB (A)	Controlado
Emisiones atmosféricas	NOx (óxidos de nitrógeno), CO ₂ (dióxido de carbono)	Controlado, No afectan la salud
Extracción de agua fresca	14.3 m ³ /día, mínimo	

Fuente: Grupo Campestre, S.A. de C.V.

La planta tiene impacto positivo en la mitigación del calentamiento global, los impactos ambientales que presenta en la mayoría son positivos. La captura de metano para generar energía eléctrica trae como resultado la mitigación de los gases de efecto invernadero que acentúan los

efectos del cambio climático al dejar de emitir 24000 toneladas de CO₂ al año no ventiladas a la atmósfera en comparación con una fuente no renovable. Los procesos industriales asociados al biodigestor representan beneficios en reducir la huella de carbono al año en un BC/año 24000 toneladas.

1.5.3. Esquema de la planta de biodigestión.

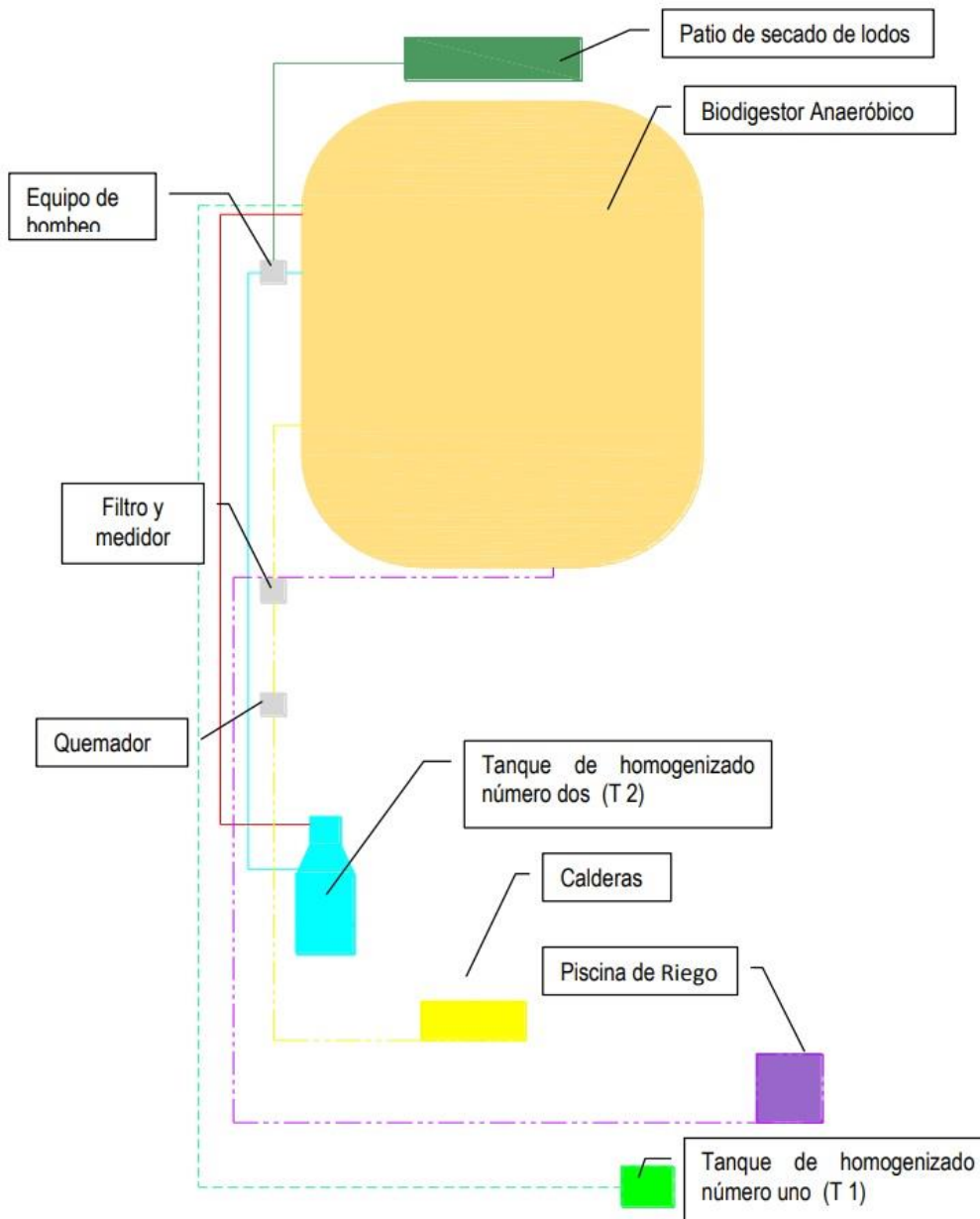


Figura 9. Diagrama de procesos para la producción de biogás en Grupo Campestre.

1.6. Biodigestor Hacienda San Ramón

La Hacienda San Ramón realizó la construcción del biodigestor para el aprovechamiento de estiércol de ganado lechero para producir energía eléctrica para el vertido a la red pública de electricidad. El proyecto del biodigestor en la hacienda San Ramón está ubicado en la autopista a Sonsonate, El Salvador.



Figura 10. Planta arquitectónica del biodigestor en Hacienda San Ramón.

El biodigestor se compone de las siguientes estructuras: tanque de mezcla y alimentación cuya función es homogeneizar la materia orgánica que se carga, biodigestor de 3500 m³, laguna de descarga de 1200 m³, lecho de secado de lodos de 200 m² y un generador de 350 kWe. (Fuente: Aqualimpia, 2015)

Las excretas bovinas son ricas en nitrógeno y otros minerales esenciales para las plantas, ya que los bovinos al ser rumiantes en su digestión participan microorganismos anaerobios los cuales en su proceso metabólico degradan los alimentos y forman parte vital de la digestión de estos animales. El metano (CH₄)⁷ es uno de los principales gases de efecto invernadero y es mucho

⁷ El **metano** es un gas natural, incoloro e inodoro que se produce debido a la digestión de materia orgánica, como las plantas. Su fórmula química es CH₄ (un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno).

más dañino que el ya bien conocido CO₂⁸, de todas las formas que los rumiantes poseen para liberar o expulsar este gas de su interior, la más representativa es la excreción fecal, ya que todas estas excretas van no sólo cargadas del gas si no también llevan parte de la población de bacterias anaerobias en su interior, las cuales continúan actuando y así liberando gas metano (CH₄) hasta lograr descomponer la excreta o que su ciclo de vida concluye.

El proyecto en la Hacienda San Ramón consiste en el aprovechamiento del estiércol de 1,200 vacas lecheras para la producción de biogás en biodigestores. El biogás se utilizará como combustible en un generador de 360 kWe de potencia para la producción de electricidad.



Figura 11. Hacienda San Ramón tiene un hato de ganado lechero de 1,200 unidades.

1.6.1. Uso Potencial del Estiércol Bovino.

Con el conocimiento de las características del excremento y de todos los problemas que su mal manejo genera, en la Hacienda San Ramón se han desarrollado técnicas de aprovechamiento de toda la biomasa o excretas del ganado, lo cual se disminuyen en gran medida los daños y problemas al medio ambiente. Una técnica más presente y conocida actualmente en la infraestructura es el uso de un sistema de canaletas por gravedad que transportan las excretas a un tanque homogeneizador y posteriormente es cargado el biodigestor, donde el excremento se procesa para la producción de biogás y Resultado de la fermentación de estiércol y agua a través de la descomposición y transformaciones químicas de residuos

⁸ El **dióxido de carbono** (fórmula química CO₂) es un compuesto de carbono y oxígeno que existe como gas incoloro en condiciones de temperatura y presión estándar.

orgánicos en un ambiente anaerobio⁹, el excremento es confinado a una degradación en condiciones anaerobias lo cual favorece la digestión y desarrollo de las bacterias anaerobias en un ambiente controlado y con ello reducir los daños y darle una ventaja al productor sobre otro tipo de práctica en tratamiento de las excretas, el canalizado por gravedad es un proceso de bajo costo y amigable con el medio ambiente al no emplear energía eléctrica para la transportación de materia orgánica al tanque de mezcla y alimentación. El fundamento del proceso es crear unas condiciones ambientales en un recinto cerrado, en el que ciertos microorganismos, capaces de utilizar la sustancia orgánica presente en las deyecciones de estos animales, puedan vivir y multiplicarse sin aire.

En los establos, los animales se encuentran sobre camas de pasto picado, que junto a las heces y orín forman el estiércol, residuos orgánicos del ganado, es decir el estiércol y los purines que se cargan al biodigestor de 3500 m³ tipo laguna, estiércol que se aprovecha para producir biogás e inyectar al generador de 350 kWe mediante la digestión anaerobia en el digestor.



Figura 12. En esta figura se observa el ganado en los establos y el estiércol generador por las mismas la cual es Aprovechado para la producción de biogás y energía eléctrica. (fuente: fotografía de fuente propia).

⁹ Resultado de la fermentación de estiércol y agua a través de la descomposición y transformaciones químicas de residuos orgánicos en un ambiente anaerobio.

1.6.2. Diseño conceptual de la planta de biodigestión.



Figura 13. Diseño conceptual del proyecto en Hacienda San Ramón.
Fuente: (Engineering e.K., 2020)

CAPITULO 2 - LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Características del Proceso Anaeróbico

El proceso en el digestor se puede comparar con el proceso que ocurre en el interior de los estómagos de los rumiantes. Por esta razón las bacterias al interior del digestor reaccionan negativamente cuando se cometen errores con la alimentación de la biomasa. La digestión anaeróbica es un proceso complejo desde el punto de vista microbiológico. Al estar enmarcado en el ciclo anaerobio del carbono, es posible, transformar la biomasa en ausencia de oxígeno en compuestos volátiles como el CO_2 ¹⁰, NH_3 ¹¹, H_2S ¹², N_2 ¹³, CH_4 ¹⁴ y otros gases menores. Este proceso ocurre también con el denominado “gas de pantanos” que brota en las aguas estancadas, el gas natural metano, en los yacimientos petrolíferos, así como el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes, en todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas¹⁵.

El diagrama de procesos de la digestión anaerobia y producción de biogás se puede esquematizar según se muestra a continuación en la Figura 14.

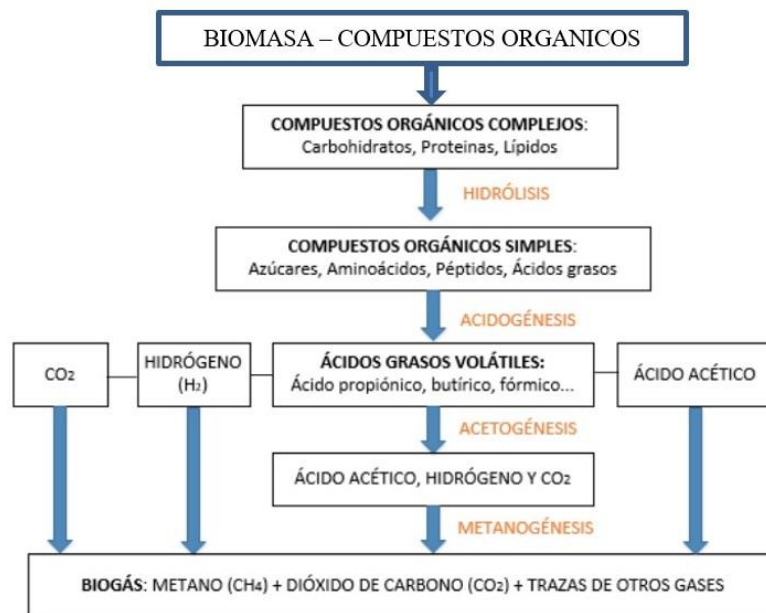


Figura 14. Proceso de la digestión anaerobia en un biodigestor para la obtención de biogás (Elaboración propia)

¹⁰ Dióxido de carbono.

¹¹ Amoníaco

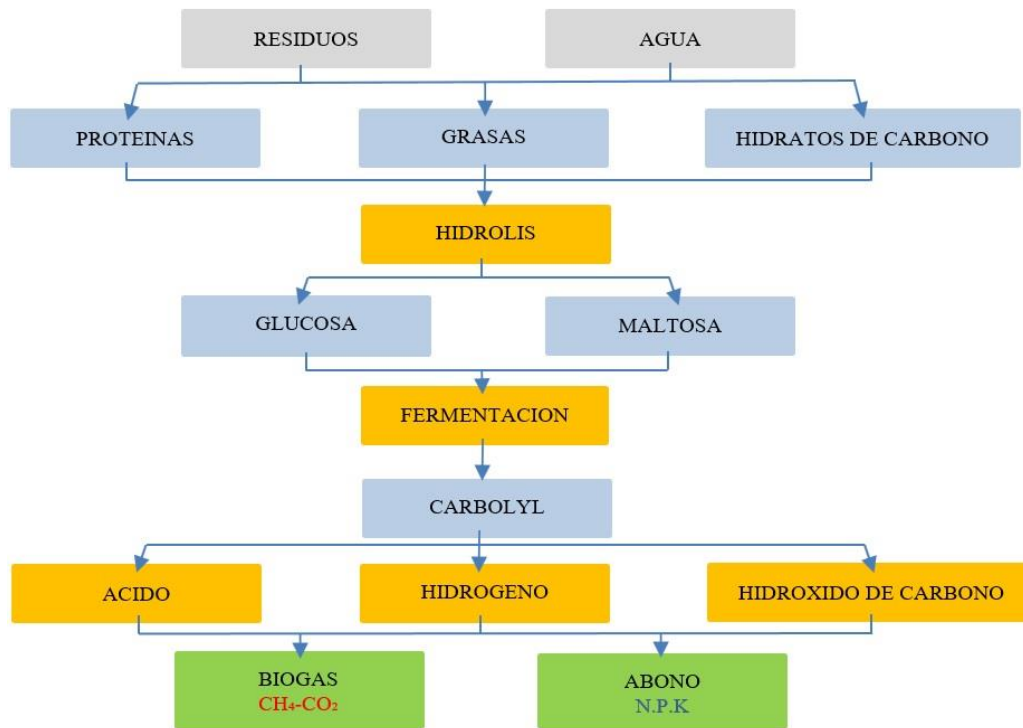
¹² Ácido sulfhídrico

¹³ Nitrógeno en su forma molecular

¹⁴ Metano es un gas natural

¹⁵ Bacterias productoras de gas metano.

Diagrama 1. Descomposición anaeróbica (Elaboración propia)



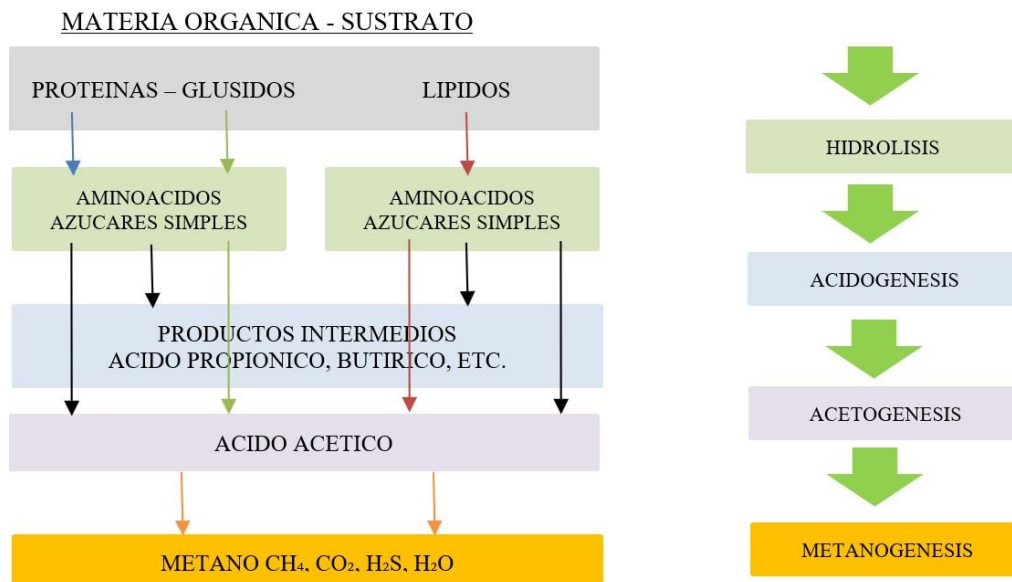
La digestión anaerobia es un proceso natural, que corresponde al ciclo anaeróbico del carbono, ver la Figura 15, por el cual es posible que, mediante una acción coordinada y combinada de diferentes grupos bacterianos en ausencia total de oxígeno, estos pueden utilizar la materia orgánica para alimentarse y reproducirse.

Cuando se acumula la materia orgánica (compuesta por polímeros, como carbohidratos, proteínas, celulosa, lípidos, etc.) en un ambiente acuoso los microorganismos aerobios actúan primero tratando de alimentarse de este sustrato. Este proceso consume el oxígeno disuelto que pueda existir. Luego de esta etapa inicial, cuando el oxígeno se agota, aparecen las condiciones necesarias para que la flora anaerobia se pueda desarrollar consumiendo también, la materia orgánica disponible. Como consecuencia del proceso respiratorio de las bacterias se genera una importante cantidad de metano CH_4 , dióxido de carbono CO_2 , y trazas de nitrógeno N_2 , hidrogeno H_2 ¹⁶ y ácido sulfhídrico H_2S .

¹⁶ Forma de molécula diatómica del hidrogeno.

Acidogénesis: En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono. Estas dos primeras fases son realizadas por bacterias hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples (acético mayormente). Son bacterias anaerobias facultativas (pueden consumir oxígeno molecular¹⁷ para su metabolismo, se adaptan a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno resulta toxico en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaeróbico ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no hay una reducción significativa de la DQO¹⁸ del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente.

Diagrama 2. Esquema simplificado proceso anaeróbico



Acetogénesis: Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan

¹⁷ O₂: Oxígeno molecular que forma parte de la atmósfera y que hace posible nuestra respiración y la vida.

¹⁸ Demanda Química de Oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte

produciendo ácido acético, llevándolos al grupo acéticos $\text{CH}_3\text{-COOH}$ ¹⁹ y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. Esta reacción es exergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que sustraen los productos finales del medio, minimizando la concentración de estos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de las bacterias, haciendo posible la degradación y el mantenimiento del equilibrio energético.

Metanogénesis: En esta fase un segundo grupo de bacterias convierten los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono. Se trata de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Las más importantes son las que transforman los ácidos propanoico²⁰ y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclasticas²¹. El otro grupo de bacterias metanogénicas, las hidrogenófilas²², consumen el hidrogeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrogeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

Las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las de la fase de acetogenesis, por ello, son las que limitaran el proceso de degradación anaerobia. Son también las que condicionaran el tiempo de retención de la biomasa en el digestor, así como la temperatura del proceso.

La conversión de acetato a metano aparece como un proceso ecológico muy importante en digestores de residuos y en medios anóxicos²³ de agua dulce donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias. A pesar de que la producción de metano está muy extendida, son muy pocos los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de

¹⁹ Es un compuesto cristalino que pertenece al grupo de los ácidos carboxílicos, su fórmula química es CH_3COOH ; es un líquido cristalino, con olor peculiar, con propiedades corrosivas e irritantes, es una sustancia higroscópica, que absorbe el agua de diversas fuentes

²⁰ El ácido propanoico (también llamado ácido propiónico) es un ácido carboxílico monoprótico que puede encontrarse naturalmente, de fórmula molecular $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$

²¹ Bacterias acetoclasticas utilizan ácido acético, metanol y algunas aminas presentes antes de la digestión

²² Bacterias hidrogenófilas cuya finalidad es romper los enlaces complejos de proteínas, celulosa, lignina o lípidos en monómeros o moléculas como aminoácidos, glucosa, ácidos grasos y glicerol

²³ La condición de un ambiente en el que el oxígeno libre es escaso o inexistente

la metalogénesis²⁴. Por lo tanto, es un proceso que depende de la producción de estos compuestos por otros organismos, a partir de la materia orgánica compleja.

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H₂ y CO₂ que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido²⁵, como la celulosa, pueden invertir hasta cinco grupos fisiológicos de procariontas²⁶.

Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa²⁷ y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H₂ y CO₂. Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si este se halla en alta concentración. Además, el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos.

El metano bacterias sólo pueden multiplicarse cuando está avanzada la fermentación de los sustratos primarios por acción de las bacterias anaerobias facultativas (por ejemplo *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klesiella* o *Bacillus* spp.) y se haya consumido todo el oxígeno disuelto de manera que el potencial redox²⁸ ha alcanzado un valor de -330mV. Además, el pH²⁹ no debe bajar demasiado para no inhibir el crecimiento de los metanógenos.

2.1. Parámetros Principales que Inciden en la Producción de Biogás.

La actividad metabólica involucrada en la producción del biogás puede ser afectada por diversos factores y esto es debido a que cada grupo de bacterias que intervienen en las distintas etapas del proceso responden en forma diferencial a la influencia de estos factores no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de biogás en

²⁴ Proceso de alteración hidrotermal al intercambio químico ocurrido durante una interacción fluido hidrotermal-roca.

²⁵ Carbohidratos complejos formados por un gran número de azúcares simples, los cuales se unen entre sí mediante los enlaces glucosídicos

²⁶ Los procariontas no tienen núcleo definido y ni organelos rodeados por membrana.

²⁷ La celobiosa es un inhibidor de la hidrólisis enzimática llevada a cabo por endoglucanasas y exoglucanasa, reduciendo su eficacia. Finalmente, en la última etapa, se produce la degradación de la celobiosa a glucosa por la acción de la β-1,4-glucosidasa

²⁸ Redox: es una reacción de transferencia de electrones. La especie que pierde los electrones se oxida y la que los gana se reduce. Se llama reductor a la especie que cede los electrones y oxidante a la que los capta

²⁹ pH: medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14.

forma precisa, no obstante y a modo de orientación, en la Tabla 9 se dan los parámetros más importante a ser tomados en cuenta.

Tabla 9. Parámetros físicos y químicos para la digestión anaeróbica.

Valores mínimos de parámetros físicos y químicos necesarios para la digestión anaeróbica	
pH	6.5 – 8.0
Contenido de sales / conductividad	2.5 – 25 mS/cm
Temperatura	(8 -55) °C
Oxígeno	<1 ppm
Hidrogeno	6 Pa
Carbono total	0.2 – 50 g/l DQO
Sodio	45 – 200 ppm
Potasio	75 – 250 ppm
Magnesio	10 – 40 ppm
Azufre	50 – 100 ppm
Hierro	10 – 200 ppm
Níquel	0.5 – 30 ppm
Cobalto	0.5 – 20 ppm
Molibdeno, Wolframio, Selenio	0.1 – 0.35 ppm
Zinc	0 – 3 ppm
Fosfatos	50 – 150 ppm

Entre los factores idóneos más importantes que influencia la producción de biogás se tienen los siguientes:

2.1.1. Ausencia de Oxígeno

Según (Moncayo Romero, 2013), las bacterias metanogénicas son los seres vivos más antiguos que existieron sobre nuestro planeta. Se formaron hace 3 ó 4 billones de años, cuando en la tierra no existía la atmósfera como la conocemos en la actualidad. Por esa razón las bacterias metano génicas sólo pueden existir en ambientes anóxicos³⁰, en ausencia de oxígeno, por esta razón no se mueren o se inhiben en presencia de oxígeno es porque viven en conjunto con otras bacterias que se formaron en los procesos previos. Sin embargo, el efecto inhibitor del oxígeno no es permanente ya que en la flora bacteriana existen también microorganismos facultativos que irán consumiendo el oxígeno que pueda tener el medio acuoso. Estas son las bacterias facultativas que pueden vivir en presencia de oxígeno y en ausencia de él. Es por esa

³⁰ La condición de un ambiente en el que el oxígeno libre es escaso o inexistente.

razón que para que ocurra un proceso anaeróbico óptimo deben crearse las condiciones para la formación de un medio totalmente libre de oxígeno al interior del digestor. Mientras el contenido de oxígeno en el digestor sea menor que el 3-5 % puede desarrollarse el proceso anaeróbico sin consecuencias negativas.

2.1.2. Tipo y Calidad de Biomasa Empleada en el Biodigestor

La producción de biogás es influenciada por el tipo de biomasa con la que se alimenta al digestor y unas como es el caso del estiércol de cerdo o ganado producen más biogás que otras como el maíz o similar. Por lo tanto, la producción de biogás depende de la cantidad de grasas, proteínas, hidratos de carbono y nutrientes que contenga esta biomasa.

El proceso anaeróbico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes un cierto equilibrio en sales minerales como el azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores.

La selección del tipo de biomasa influye en la producción de biogás. Generalmente la biomasa con alto contenido de grasas, proteínas e hidratos de carbono es la que más biogás produce. Debido a esta característica es entendible que se quiera alimentar al digestor únicamente con este tipo de biomasa. Pero los digestores necesitan un amplio espectro de nutrientes, por lo tanto, hay que tener en cuenta que lo más conveniente es la preparación equilibrada de una mezcla de biomasa para alimentar el digestor. No es recomendable que se alimente al digestor con biomasa podrida o fermentada. Esta biomasa puede inhibir el proceso anaeróbico y colapsar el proceso de digestión. Tampoco debe cambiarse en forma frecuente el tipo de biomasa o de mezcla con la que se alimenta al digestor. Particularmente la biomasa que viene directamente de las cosechas debe ser troceada o cortada para que alimente al digestor, mientras más cortada o trillada sea la biomasa mayor va a ser la producción de biogás, ya que la biomasa tendrá a una mayor superficie de contacto para la acción de las bacterias metanogénicas. De otra manera puede suceder que la biomasa no se degrade y que cuando cumpla su tiempo de retención en el digestor sea extraída y no se haya degradado.

También el pH³¹ de la biomasa tiene influencia en la producción de biogás. Hay que considerar que durante el proceso anaeróbico hay fluctuaciones del pH que pueden ser soportadas y equilibradas por el digestor, siempre y cuando el pH se maneje dentro de ciertos rangos. Si se alimenta al digestor con biomasa con un pH demasiado bajo, por ejemplo, aguas de procesos o forrajes, puede ocurrir una inhibición del proceso. En este caso hay que regular el pH de la biomasa antes de su ingreso al digestor. También pueden formarse muchas espumas al interior del digestor si el pH de la biomasa que se carga es diferente del pH al interior del digestor.

2.1.3. La Co digestión

La co-digestión ofrece ventajas ecológicas, tecnológicas y económicas mejorando el balance de nutrientes. La co digestión de una variedad de sustratos en lugar de un solo tipo de residuo mejora la relación C:N:P³² de nutrientes del cual óptimamente debería ser de alrededor de 300:5:1. Este también mantiene una razonable mezcla de minerales (Na, K, Mg, Mn³³, etc.); así como también una balanceada composición de trazas de metales. La co-digestión mejora el proceso de digestión e incrementa la generación de biogás (efecto cinegético), este podría ser atribuido a la presencia de nutrientes y a reducción/dilución de sustancias inhibitoras debido a la mezcla de los residuos.

El suministro y transporte de biomasa juega un papel muy importante únicamente en el aprovechamiento del sustrato que no se produzca en la misma instalación o previo en donde se construye el digestor. Es importante que se implemente un sistema de preparación y adecuación de la biomasa, y se disponga de equipos para el control y el pesaje de biomasa. Se debe también controlar y protocolar la calidad y calidad de la biomasa que se alimenta al digestor. La magnitud y tipo de preparación de la biomasa tiene una gran influencia en la eficiencia del proceso al interior del digestor. A mayor y mejor preparación de la biomasa, mejor eficiencia y mayor producción de biogás. La preparación de la biomasa tiene como meta mejorar y optimizar el proceso de degradación de la materia orgánica.

³¹ El pH es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14.

³² Carbono, nitrógeno, fósforo

³³ Sodio, potasio, magnesio, manganeso.

2.1.4. Higienización

En caso de que se aprovechen desechos de restaurantes, de mercados o restos de animales, y de acuerdo con las regulaciones y normas en cada país, se debe higienizar la biomasa antes de su alimentación al digestor. A través de la higienización se eliminan bacterias, parásitos y virus. Se reduce el riesgo de contaminación y transmisión de enfermedades. La higienización se realiza calentando la biomasa a una temperatura de 70°C durante una hora.



Figura 16. Tanque de higienización para desechos de restaurantes

El proceso de higienización se efectúa en tanque de acero y hormigón. Después de la higienización y previo a la alimentación de la biomasa en el digestor, hay que reducir o igualar la temperatura de la biomasa a la temperatura del proceso.

2.1.5. Mezcla y Homogenización

Es necesaria la mezcla y homogeneización de la biomasa con agua, para alcanzar el grado de dilución requerido. La biomasa debe mezclarse con suficiente agua para alcanzar el grado de dilución. El grado de dilución debe ser del 10-15%. Este valor corresponde el contenido de masa seca, un porcentaje de dilución del 10% significa que la mezcla tendrá un 10% de masa seca y un 90% de humedad (agua). Los contenidos de masa seca mayores al 15% inhiben el proceso de degradación en el digestor.

Para homogeneizar la biomasa se puede utilizar agua, Biol (reciclado del efluente) a aguas de procesos. El Biol es el efluente del digestor, se lo puede recircular desde el tanque de descarga

al tanque de homogeneización. La inoculación de la biomasa con biol³⁴ favorece el proceso de digestión, ya que la biomasa se inocula con bacterias digeridas o fermentadas. Si se utiliza agua de algún proceso para la homogeneización hay que tener en cuenta que no contenga trazas de desinfectantes o elementos químicos que inhiban la producción de biogás. La homogeneización se realiza en tanques por medio de mezcladores o agitadores.

2.1.6. Alimentación al Digestor

Idealmente se debe alimentar al digestor de forma continua. En la práctica pocas veces es posible por lo que se habla de una alimentación casi continua. La alimentación debe hacerse durante todo el día, en lo posible cada hora. Este proceso puede automatizarse. No es recomendable que se mezcle u homogeniza la biomasa en los tanques de alimentación si esta no se alimenta inmediatamente al digestor. Preferentemente solo se debe homogenizar la biomasa con la que se va a alimentar en ese momento al digestor.

2.1.7. Masa Seca (MS)

La masa seca se define como la cantidad de sólidos que contiene la biomasa. Este valor se define también como la materia seca total con la que se alimenta diariamente al digestor. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir en el digestor debe ser de 10 - 15 %. se logra esta dilución mezclando la biomasa con agua o recirculando Biol o Bioabono. En digestores operados con estiércol (ganado o gallinaza) los valores óptimos de operación oscilan entre 10 – 12%, esta dilución es importante para establecer un mejor contacto de las bacterias con el sustrato. Mezclas de biomasa con porcentajes de masa seca mayores al 15% son difíciles de bombear por las tuberías de alimentación al digestor. También son muy difíciles de agitar en el biodigestor o se requiere de grandes cantidades de energía para la agitación.

En la siguiente Tabla 10 se indican los contenidos de agua de varios tipos de biomasa (biomasa-MS).

³⁴ El Biol: es el resultado de la fermentación de estiércol y agua a través de la descomposición y transformaciones químicas de residuos orgánicos en un ambiente anaerobio. Tras salir del biodigestor, este material ya no huele y no atrae insectos una vez utilizado en los suelos.

Tabla 10. Contenido de agua de diferentes sustratos.

Sustratos	Contenido de agua (%)
Vinazas	90 – 94
Cereales	12 – 15
Estiércol de cerdo	85 – 95
Gallinaza	65 – 85
Forraje de maíz	65 – 80
Estiércol de ganado	85 – 95
Frutas - verduras	82 - 95

2.1.8. Masa Volátil (MV)

La masa o sólidos volátiles es el volumen de la masa orgánica que contiene la biomasa. La masa volátil es el componente que se volatiliza después de la incineración de la masa seca durante 6 horas a 550 °C. Las cenizas que quedan después del secado corresponden al componente inorgánico de la masa seca.

El dato de la MV es importante ya que solo este porcentaje es el contenido real de la masa orgánica en la biomasa. El resto es humedad, trazas inorgánicas y otros materiales que no producen biogás, solo este contenido de MV es el que produce el biogás durante la digestión anaeróbica en el biodigestor. El contenido de humedad (agua) no produce biogás, pero facilita el proceso de digestión. Únicamente la masa volátil produce biogás.

2.1.9. Carga Orgánica Volumétrica (COV)

Se entiende como COV a la cantidad de materia orgánica volátil (MV) con la que se alimenta al biodigestor por m^3 de volumen del digestor. Se define en kg de MV por m^3 de volumen del digestor ($kg\ MV/m^3$). El valor de la COV depende mayormente de la temperatura del proceso interior del digestor y del tiempo de retención hidráulica (RTH) que se desee obtener. La COV es considerada como un parámetro para controlar la carga del digestor y es un valor determinante para el dimensionamiento del digestor. Si el sustrato está muy diluido, las bacterias no tienen suficiente alimento para vivir; mientras que un exceso en sólidos disminuye la movilidad de los microorganismos y por consiguiente la efectividad del proceso, ya que se le impide el acceso al alimento.

A mayor temperatura y mayor RTH, mayor puede ser la COV. Por lo tanto, más masa orgánica puede ser alimentada al digester. La COV puede aumentar hasta un valor máximo determinado. A mayor COV mayor es el riesgo de inhibir el proceso, ya que se carga demasiada biomasa a las bacterias. En este caso el proceso se torna muy inestable y tiene que ser observado y analizado con más frecuencia. Generalmente la COV debe alcanzar entre 2-3 kg MV/m³ de digester por día. Si se mantiene constante el volumen del digester (m³) y si se aumenta la COV, disminuye el RTH. En este caso las bacterias tienen menor tiempo para degradar la materia orgánica y para producir biogás. Para cargas de COV mayores a 3 kg MV/m³ se puede dar el caso de que la materia orgánica se descargue del digester a través del efluente, sin que se haya degradado.

Tabla 11. Cálculo de COV por medio MS y MV

Cálculo de MS, MV y COV					
Sustrato	t/d	MS%	MS (t/d)	MV (%)	MV (kg)
Gallinaza	12	28	3.36	80	2688
Purín de cerdo	15	8	1.20	90	1080
Estiércol de cerdo	7	12	0.84	85	714
Totales	34		5.40		4482

$$COV = 4482/1500 = 2.99 \text{ [kg MV/M3]}$$

Fuente: (Moncayo Romero, 2013)

$$COV = \frac{\sum MV (kg)}{Volumen BD_{m^3}} = \frac{4482 \text{ kg}}{1500m^3} = 2.99 \text{ kg/m}^3$$

Ecuación 1. Cálculo de la COV por medio la masa sólida y volátil

El volumen del biodigester (Volumen BD, m³) es ilustrativo para el cálculo de la Tabla 11. Según Moncayo Romero, 2013, en algunas ocasiones considera que es necesario determinar la cantidad de sustrato para realizar la mezcla de dos tipos de biomasa sí que se supere un valor determinado de concentración de sólidos. A valores de COV entre 4-5 kg MV/m³ Se debe controlar constantemente el proceso, ya que presenta una disminución del proceso de degradación de las bacterias y la consecuente disminución de biogás. COV alrededor de 1-2 no presentan ningún problema.

2.1.10. Temperatura de Proceso

De acuerdo con (Aguilar Genes, 2015), para producir biogás según describe basta tener el biodigestor cargado de biomasa y producir el proceso anaeróbico con temperaturas entre los 10°C a 68 °C, pero la temperatura juega un papel fundamental dentro de la producción de biogás al interior de un biodigestor puesto que es inversamente proporcional al tiempo de retención de la biomasa, es decir, a mayor temperatura se produce más rápidamente biogás y se hace necesario recargar el sistema de forma más constante. Se aprecia que el proceso se puede realizar en un gran rango de temperaturas, pero la fermentación de la biomasa es más eficiente en el rango mesofílico (30 °C a 45°C) y en el rango termofílico (55 °C a 60°C).

Según (Moncayo Romero, 2013), la digestión anaeróbica tiene tres rangos de temperatura: un primer rango (por debajo de 25 °C) es el psicofílico³⁵, un segundo rango (25 – 45 °C) es el mesofílico³⁶ y el tercero es el termofílico³⁷ (45 – 60 °C). No obstante, de lo anterior, casi todos los digestores funcionan en el rango mesofílico y la temperatura óptima para la digestión anaeróbica es de 35 °C.

La producción de biogás, en ausencia de inhibidores³⁸, aumenta con la temperatura, aumenta la tasa de crecimiento de los microorganismos.

2.1.10.1. Método de Carga de Material Orgánica

El proceso de carga y descarga de material orgánico al biodigestor es preferiblemente de forma diaria, donde las cargas deben ser de forma homogéneas para que las bacterias al interior del biodigestor trabajen de forma eficiente y procesen la mayor cantidad de materia. Adicionalmente al realizar la descarga de forma diaria hará que el efluente líquido (compostaje) que se obtenga posea mayor cantidad de nutrientes, lo que lo hace ideal para el uso como fertilizante. Si el método de carga y descarga no es constante y homogéneo durante su proceso, ocasionará una producción de biogás ineficiente o en algunas ocasiones nula. Es importante

³⁵ Los microorganismos psicrófilos son aquellos cuya temperatura de crecimiento óptima es baja, aproximadamente 15°C o inferior, y poseen una temperatura máxima de crecimiento de aproximadamente 20°C

³⁶ Los microorganismos que tienen su óptimo de desarrollo de 25 °C a 40 °C y se pueden encontrar en el suelo, plantas, animales

³⁷ Las bacterias termófilas son aquellas que se desarrollan a temperaturas superiores a 45°C, pudiendo superar incluso los 100°C (hipertermófilos) siempre que exista agua en estado líquido, lo que se consigue si la presión es elevada como ocurre en las profundidades oceánicas.

³⁸ Un inhibidor puede unirse a una enzima y bloquear la unión del sustrato, por ejemplo, al pegarse al sitio activo. Esto se conoce como inhibición competitiva porque el inhibidor "compite" con el sustrato por la enzima. Es decir, solo el inhibidor o bien el sustrato puede estar unido a la enzima en un momento dado.

mencionar que se prefiere que la materia prima usada para cargar el sistema sea lo más fresca posible, pues de esta forma la producción de biogás es mayor.

2.1.12. Tiempo de Retención

El tiempo de retención es el tiempo de residencia de la biomasa dentro de un biodigestor. Hasta ahora no se ha encontrado una forma clara para obtener y estimar un tiempo de retención o una metodología para hacerlo, pero en la práctica a medida que la temperatura va en aumento dentro del biodigestor el tiempo de retención va disminuyendo, lo que se traduce como fabricación de biogás más rápidamente.

2.1.13. El pH de la Mezcla Cargada

El pH del biodigestor indica qué tan adecuado es el proceso que se está realizando, ya que existe un rango aceptado para la producción de biogás que ronda de 6 a 9. El pH durante el proceso se determina según el tipo de temperatura y según el tipo de biodigestor que se utilice. Los niveles de pH recomendados para una producción de biogás eficiente se encuentran entre 6.7 y 7.5, niveles que se cumplen para diferentes rangos de temperaturas y diferentes tipos de biodigestores. Cuando se usan rangos de temperatura termofílico y se usan procesos para la eliminación de amoníaco, los niveles de pH pueden ascender al rango de 7.8 a 9 para que de esta forma la producción de biogás sea mayor.

Durante la producción de biogás es importante que el pH se mantenga constante en los rangos de operación mencionados anteriormente, ya que al no mantener constante este rango, significa que la operación que se está realizando con el biodigestor no es la correcta y se está subutilizando el sistema. Así mismo es necesario hacer que el pH no se torne muy ácido, ya que, en la tercera etapa de producción de biogás conocida como gasificación, actúan bacterias metanogénicas las cuales inhiben su acción mientras el pH se torna ácido, lo que aumenta la proporción de gas carbónico en el biogás lo cual no resulta conveniente.

El pH se puede tornar ácido en un biodigestor debido a:

- Un cambio excesivo en la carga.
- El permanecer por largo tiempo sin recibir carga.
- La presencia de productos tóxicos en la carga.
- Un cambio amplio y repentino de la temperatura interna.

Desde el punto de vista de (Botero, 1987), “La alta acidez se puede corregir adicionando agua con cal a la fase líquida”

2.1.14. Producción de Gallinaza

Desde el punto de vista teórico, por cada kilo de alimento consumido, los pollos producen alrededor de 1.1 a 1.2 kg de deyecciones frescas, con el 70 –80% de humedad. En deyecciones totalmente secas ello supondría unos 0.2 – 0.3 kg por ave y por kilo de alimento consumido, La producción de gallinaza pura y seca, al final del periodo, depende del peso vivo y de su consumo total, pudiéndose estimar entre 20 y 28 kg/ave.

La producción de gallinaza de gallinas ponedoras es sencilla al recogerse en forma pura, Lo más lógico sería expresar la producción de gallinaza de las ponedoras en materia seca y en relación con el consumo de alimento, ver Tabla 12.

Tabla 12. Estimación de la producción de deyecciones de las ponedoras

Tipo de gallina	Consumo de alimento gr/ave/día	Digestibilidad del alimento, %	Materia Seca deyecciones gr/ave/día
Liviana	100 – 110	75 – 80	20 – 27
Semi pesada	110 – 120	75 – 80	22 – 30

Fuente: Elaboración propia

El valor de la gallinaza como biomasa a utilizar como fuente para generar energía y su elevado contenido de materia orgánica, cerca del 70%, le aseguraría un valor energético; además otros usos como alimento para ganado y fertilizante, debe tenerse muy presente que la composición de esta cambia de acuerdo al momento de recolección y al tipo de almacenamiento, tal como se aprecia en la Tabla 13.

Tabla 13. Valor como abono de la gallinaza de ponedoras de jaula.

Tipo	Humedad %	Nitrógeno %	Ácido fosfórico %	Potasio %
Fresca	70 – 80	1.1 – 1.6	0.9 – 1.4	0.4 – 0.6
Acumulada unos meses	50 – 60	1.4 – 2.1	1.1 - 1.7	0.7 – 1
Almacenada en foso profundo	12 – 25	2.5 – 3.5	2 – 3	1.4 – 2
Desecada industrialmente	7 – 15	3.6 – 5.5	3.1 – 4.5	1.5 – 2.4

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros físicos y químicos de la gallinaza pueden observarse en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos de la gallinaza.

Parámetros	Rango
pH (unidades)	8-9
Humedad (g Humedad/g M)	01-02
Sólidos Volátiles (g SV/g M)	02-04
D.Q.O (mg O ₂ /g M)	200-500
D.B. O (mg O ₂ /g M ₉)	200-400
Nitrógeno Total (mg N/g M)	3-12
Nitrógeno Amoniacal (mg NH ₃ /g M)	3-7
Fósforo (mg P/g M)	5-25
Nitratos (mg NO ₃ /g M)	2-16

Fuente: Elaboración propia

Composición y rendimiento de biogás de diferentes materias primas Tabla 15 (Jiménez, 2012).

Tabla 15. Composición y rendimiento de biogás de diferentes materias primas.

Parámetros	Materia Seca (% co-substrato)	Materia Orgánica (% de MO)	Rendimiento/Biogás (m ³ /Ton MOS)	Rendimiento/Biogás (m ³ /Ton Húmeda)
Gallinaza	10 a 20	70 a 80	350 a 550	24 a 88
Estiércol de vaca	7 a 15	65 a 85	200 a 400	9 a 51
Estiércol de puerco	3 a 13	65 a 85	350 a 550	7 a 61
Desechos vegetales	10 a 20	65 a 85	400 a 700	25 a 120
Ensilaje de maíz	15 a 40	75 a 95	500 a 900	55 a 340
Ensilaje de pasto	8 a 50	70 a 90	600 a 1,300	30 a 585

Nota: MO: masa orgánica, MOS: masa orgánica seca.

Citando a (Frigon, 2014) donde sus estudios demuestran que el rendimiento de las mezclas de co-sustratos con estiércol, la co-digestión de “*switchgrass*” (20 %) y de estiércol (80 %) se incrementó un 86 % en la producción de metano, comparado con digestores que solamente fueron alimentados con estiércol y bajo las mismas condiciones de operación; detalle anterior de Tabla 15.

La excreta animal de gallina como fuente principal de biomasa, la cual puede ser clasificada por diferentes formas o estados en los diferentes estudios consultados; datos porcentuales que serán

parte de los procesos de cálculos y cuantificar parámetros de diseño para la generación de biogás. los que se explican a continuación en la Tabla 16.

Tabla 16. Clasificación de porcentaje de sólidos en la excreta animal.

CLASIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS	UNIDAD
Estiércol crudo	Contenido de Sólidos de 8-25% depende del tipo de animal; se diluye o espesa de acuerdo con las necesidades	8-25%
Estiércol Líquido	Contenido de sólidos < 3%; es lavado con agua de donde está depositado; producción de biogás en clima cálido; (es más asociado a la producción de cerdos)	< 3%
Estiércol Slurry	Contenido de Sólidos de 3-10%; es bombeado al sistema y se almacena en tanques; se mezcla con algo de agua.	3-10%
Estiércol Semisólido	Contenido de Sólidos 10-20%; Puede ser usado si tiene menos de una semana; no requiere adición de agua.	10-20%
Estiércol Sólido	Contenido de sólidos >> a 20%; No es deseable para la producción de biogás al envejecer o secarse.	>> a 20%

Enfocados en tratar la biomasa por medio de procesos anaeróbicos para obtener biogás y biofertilizantes, que conlleva la realización de este trabajo. Para poder estimar la producción de biogás y la futura generación eléctrica y térmica que se puede obtener, se deben especificar los valores descritos en la anterior Tabla 16 para efectos de cálculo constructivo de un biodigestor.

Tabla 17. Valores específicos para estimar la producción de biogás.

Variable	Siglas	Valor	Unidad
Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie	SO	17	%
Producción aproximada en metros cúbicos de gas por cada kilogramo de masa orgánica seca total	P	0,4	%
Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo	PE	4,5	%
Producción de orín por animal por día en porcentaje de peso vivo	PO	4,5	%
Peso vivo promedio	PVP	1,4	(m ³ de gas / kg de SO)

Según (Aguilar Genes, 2015), considera que “Cabe recordar también que, por cada m³ de biogás, se obtienen aproximadamente 1,25 kWh de electricidad”.

2.1.15. Proceso de Biometanización con Gallinaza

Este proceso consiste en mezclar la excreta de gallina con agua, lo cual permite que el amoníaco no actúe como resistencia para la producción de biogás. Así mismo el proceso es adaptable a diferentes sectores socioeconómicos e industriales, ya que en partes de escasos recursos es efectivo, porque todo el proceso de fabricación de instalaciones y operación de las instalaciones se puede realizar de forma manual, adicionalmente si este proceso es acompañado con biodigestores de geomembrana, tipo balón plástico, con desplazamiento horizontal u otros, hacen que el proceso se pueda adaptar de forma fácil a sectores industriales, donde el volumen de excreta de gallina es mayor.

2.1.16. Procesamiento y uso de la Gallinaza para Producir Biogás

Como materia orgánica, la gallinaza, a través de un proceso anaerobio, produce gases, de los cuales los más importantes son el metano CH_4 y el dióxido de carbono CO_2 . En condiciones óptimas, si la proporción del primero es al menos del orden de un 60 –70% del total, ello constituye el llamado biogás, producto que, en teoría, servirá como fuente de energía de la propia granja. En síntesis, el proceso se basa en poner las deyecciones, sin cama, en un biodigestor o tanque hermético en el cual se produce la degradación de la materia orgánica en un medio anaerobio mediante la acción de enzimas segregadas por microorganismos. El proceso requiere de instalaciones voluminosas y una inversión en equipos de transformación. Las deyecciones deben mezclarse con una cantidad muy precisa de agua, 50%, aproximadamente, necesitando una residencia de al menos 15 días para que se produzca el gas, en un proceso continuo. Además, se requiere mantener un control de la temperatura del digestor (35°C) y del pH, que debe ser superior a 6. De fallar alguno de estos puntos puede aumentar la proporción de CO_2 a expensas del CH_4 , con lo que el gas obtenido pierde sus propiedades como fuente de energía.

El biodigestor pasa a ser una fábrica de combustibles renovables. El biogás se produce a través de la degradación anaeróbica de la biomasa y se compone generalmente de un 50-75 % de metano CH_4 , de 30-45% de CO_2 , sulfuro de hidrógeno 0,01 - 0,4% y trazas de otros gases menores. El biogás se aprovecha como combustible para la producción de calor o para generación de electricidad.

2.1.17. Beneficios Aportados por el Biodigestor

Una de las ventajas del biodigestor es la producción de biogás mediante el cual, y empleando la tecnología apropiada se puede producir energía eléctrica y térmica, reduciendo así el gasto energético en las instalaciones del centro de producción estratégico o agroindustrial al producir su propia energía.

2.1.18. Aprovechamiento del Biogás

Desde el punto de vista de (Engineering e.K., 2020), el biogás se aprovecha como combustible en generadores para la producción de electricidad o en calderas para la producción de calor empleando el vapor de agua como medio de transporte. Plantea (Engineering e.K., 2020) que un m³ de biogás tiene un poder calorífico de 22.000 BTU o de 6,25 kWh. Un m³ de biogás aprovechado como combustible en un generador a biogás puede producir un estimado de 2,2 kWh de electricidad, dependiendo del contenido de CH₄ (metano) en el biogás y de la eficiencia del generador. Si por ejemplo en un biodigestor se produce 1000 m³/día de biogás, este gas puede ser alimentado a un generador de casi 100 kW para que funcione las 24 horas/día. Si el biogás se aprovecha en reemplazo de combustibles fósiles, cada 100 m³ de biogás tiene el poder calorífico equivalente a 51 kg de GLP o 58 kg de bunker C.

2.2. El Gas Metano

El metano es el principal componente del biogás. Es un hidrocarburo altamente inflamable por lo que su uso principal es como combustible, con un alto poder calorífico (PCI³⁹=13,2 kWh/kg). Es también un gas de efecto invernadero, es decir que su presencia en la atmósfera favorece el aumento de las temperaturas terrestres, y su vida atmosférica es de aproximadamente 12 años.

El índice GWP⁴⁰ mide la cantidad de calor que puede atrapar un gas de efecto invernadero en la atmósfera durante un periodo de tiempo, en comparación con el gas de referencia (CO₂). El GWP del metano para 100 años es 21, es decir que, si se introdujese la misma masa de metano y de dióxido de carbono a la atmósfera, el metano atraparía 21 veces más calor que el dióxido

³⁹ PCI: Poder calorífico interior (kWh/kg)

⁴⁰ GWP: miden cuánta energía absorben las emisiones de una tonelada de un gas determinado durante un período de tiempo, en relación con las emisiones de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂).

de carbono durante los próximos 100 años. En otras palabras y en términos de efecto invernadero, emitir una tonelada de metano es el equivalente de emitir 21 toneladas de CO₂. Por otra parte, destaca la peligrosidad de este gas. No es un gas tóxico, pero al ser altamente inflamable puede formar mezclas explosivas con el aire. El punto de inflamabilidad del metano es -188°C, es decir que a esa temperatura se dan las condiciones necesarias para iniciar la combustión si se aplica una fuente de calor que permita llegar al punto de ignición, punto en el que comienza a arder. La figura 2.7 muestra el “diamante del metano” con los riesgos que este gas conlleva, según la norma estadounidense NFPA 704⁴¹:



Figura 17. Diamante del metano, NFPA 704

El color azul representa el nivel de riesgo que supone para la salud, del 0 al 4 siendo el 4 el más peligroso (mortal). El color rojo representa la inflamabilidad siendo el 4 el más inflamable (por debajo de 25°C). El amarillo representa la reactividad (0 representa que es estable) y el blanco los riesgos específicos. En conclusión, la recuperación de los residuos avícolas para producir biogás es una buena alternativa tanto por su alto potencial como combustible por la presencia de metano, como para reducir las emisiones a la atmósfera de este gas tan contaminante.

⁴¹ NFPA 704: es la norma que explica el "**diamante de materiales peligrosos**" establecido por la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (inglés: National Fire Protection Association), utilizado para comunicar los riesgos de los materiales peligrosos.

CAPÍTULO 3 – DIMENSIONAMIENTO DEL DIGESTOR

Dimensionamiento de Biodigestor

La planta para generar biogás a partir de biomasa que se emplea en esta propuesta de estudio emplea como materia prima de biomasa la excreta de gallina, y para su dimensionamiento es necesario comenzar con la estimación de la producción de estiércol y orina del animal, para así saber dimensionar el biodigestor y a partir de allí la producción de biogás.

Para el diseño de la planta de biogás a partir de biomasa residual húmeda se deberá tener en cuenta lo siguiente.

1. Se debe realizar un diseño fácil de construir, de operar y de reparar.
2. Se deben usar materiales que se encuentren en el mercado local, y además que sean resistentes a la corrosión y buenos aislantes.
3. Una construcción que sea modular, es decir, que al final de la vida útil, o durante la vida útil sea una construcción fácil de modificar, y consiga ser económicamente viable.
4. “Se deben implementar dispositivos de seguridad como antorchas para la quema de biogás, Válvulas de seguridad de control de presión y sistemas de purificación de biogás”
5. Se debe garantizar que se usen los equipos necesarios, y no existan equipos que sobredimensionan el sistema.
6. Realizar un buen uso de los efluentes generados.
7. Debe ser un sistema de bajo costo para la producción por unidad de volumen de biogás

3.1. Etapas y Tipos de Biodigestores.

Para la producción de biogás es necesario que la biomasa posea un alto porcentaje de carbono y de nitrógeno, puesto que el carbono es la sustancia que las bacterias convierten en metano, mientras que el nitrógeno funciona como multiplicador bacterial y como catalizador, acelerando el proceso de producción del biogás. Así mismo “la relación deseada de carbono y de nitrógeno debe ser entre 15 y 30 partes de carbono por una de nitrógeno”. Dentro del biodigestor se producen bacterias anaeróbicas, y sobre todo de tipo metanogénicas (bacterias capaces de descomponer materia orgánica y así contribuir a la formación de metano).

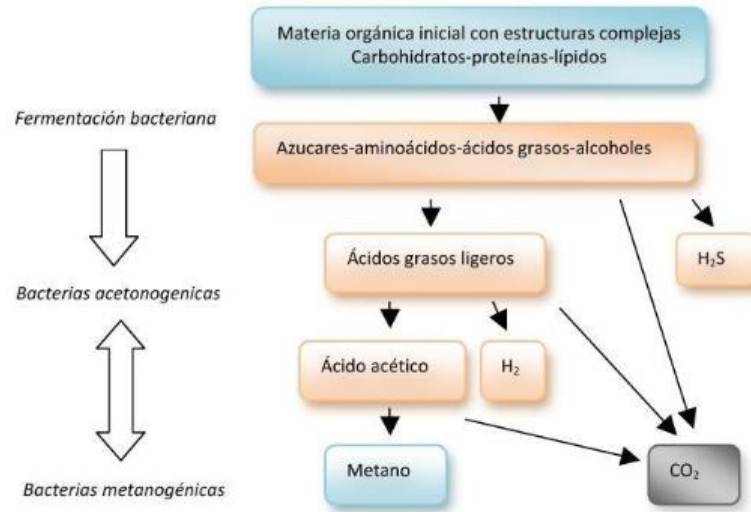


Figura 18. Materia orgánica para la producción de biogás

3.1.1. La Producción de Biogás en el Biodigestor

Un biodigestor es un componente importante para la fabricación de biogás, el cual es una bóveda sellada herméticamente que es cargada con biomasa. “Un biodigestor dentro del proceso de producción de biogás cumple el papel de optimizar de forma natural el crecimiento y proliferación de un grupo de bacterias anaerobias que descomponen y tratan los residuos dejando como subproducto gas combustible y un efluente líquido rico en nutrientes y materia orgánica estabilizada.

El biodigestor debido a su importancia en el proceso de fabricación de biogás y además al ser el artefacto de fácil acceso para las diferentes clases socioeconómica hacen que este posea una tecnología que se ha desarrollado teniendo en cuenta diversos factores como: económicos, la eficiencia requerida para el proceso rendimiento de energía producida y rendimiento de operación. Sin embargo, para realizar una óptima selección del biodigestor se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: Temperatura, Método de carga, Tiempo de Retención, pH y el Tipo de biodigestor.

3.1.2. Tipos de Biodigestores

Se puede encontrar diferentes tipos de biodigestores, en la Figura 19 se da una visión general de los tipos de biodigestores a nivel local; según su forma de carga y según su tipo de estructura, los cuales se ilustran a continuación:

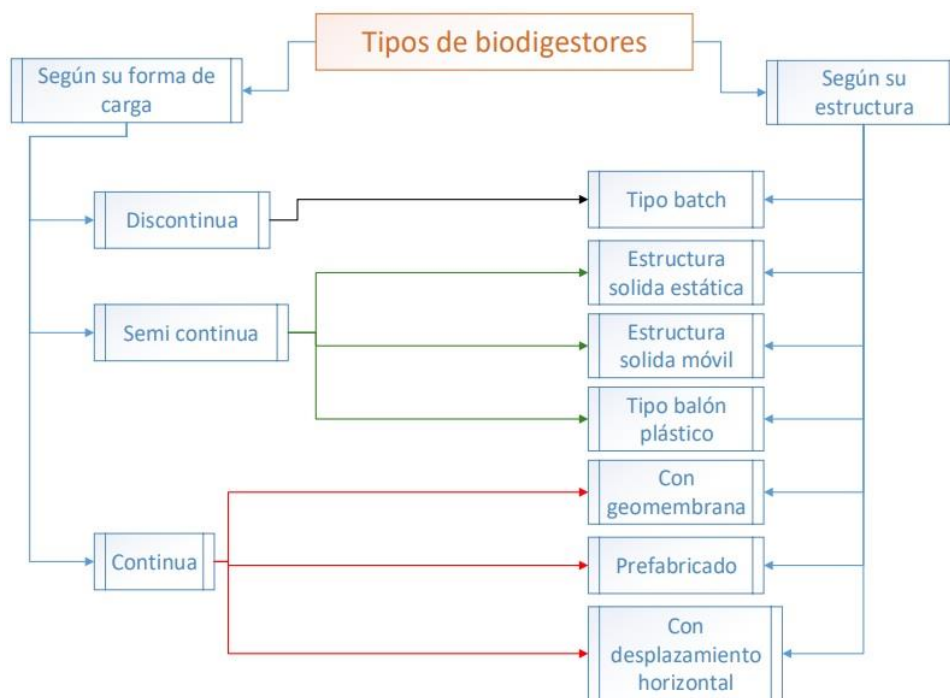


Figura 19. Visión general de los tipos de biodigestores.

3.1.3. Biodigestor de Flujo Discontinuo

Este biodigestor es cargado y sellado, este produce biogás entre 30 a 180 días siguientes a la carga del biodigestor, pero al finalizar el proceso de descomposición de su carga es necesario vaciarlo e iniciar de nuevo el proceso. Este funciona a temperatura del ambiente.

3.1.4. Biodigestor de Flujo Semi Continuo

Esta clase de biodigestores es cargada con biomasa a diario en cantidades menores comparado con biodigestor de flujo continuo. La carga debe mantenerse de forma uniforme y es funcional para la gran mayoría de los diferentes tipos de estructura para un biodigestor. Poseen un alto uso en el sector rural, y a diario deben ser cargados y descargados en igual cantidad para ambos procesos. Un sano manejo de carga y descarga del biodigestor harán que se produzca biogás de forma permanente, puesto que las bacterias al interior de este están siendo constantemente alimentadas con nutrientes.

3.1.5. Biodigestor de Flujo Continuo

Esta clase de biodigestores es cargada con biomasa a diario, donde la carga debe mantenerse de forma uniforme y es funcional para cualquier tipo de estructura del biodigestor.

Son usados para manejar y tratar una cantidad considerable de biomasa, por lo cual requieren de alta tecnología para controlar todo el proceso.

Adicionalmente los biodigestores aparte de clasificarse según su tipo de carga o flujo, también se pueden clasificar debido a su forma estructural, en la propuesta técnica se consideran los dos tipos de biodigestores de tipo continua y con las formas estructuras siguientes.

3.1.6. Biodigestor con Geomembrana

Esta clase de biodigestor está enfocado a lugares más industriales o lugares en donde se manejan volúmenes de biomasa considerables. Preferiblemente la biomasa utilizada para esta clase de biodigestores proviene del sector agropecuario, principalmente de criaderos de cerdo y establecimiento con gallinas ponedoras.

Para su construcción se realizan excavaciones del orden de 2,50 a 4,50 metros, donde se prefieren hacer de forma trapezoidal para así aprovechar los ángulos de reposo natural del lugar en donde se va a implementar esta clase de biodigestor. La superficie en donde se excava debe ser cubierta con geomembranas de polietileno con densidades de 1000 a 1500 micrones(μ) de espesor, para que de esta forma no se den filtraciones al ambiente.

A lo largo de la obra civil se instalan diferentes agitadores mecánicos para lograr la agitación de la biomasa cuando se encuentre dentro del biodigestor en proceso de fermentación y por último para cubrir la superficie del biodigestor se utiliza otra geomembrana para completar y formar el balón, en donde se unen las membranas inferiores y superiores por medio de una soldadura de termofusión. Se puede decir que este biodigestor también tiene la capacidad de almacenar el biogás generado a presión relativamente constante.

Al igual que otras clases de biodigestores posee un conducto de llenado, otro conducto de descarga y un conducto por donde se transporta el biogás generado. En la figura 4 se encuentra un esquema que muestra como es la disposición de este biodigestor al ser construido.



Figura 20. Biodigestor con geomembrana.

3.1.7. Biodigestor Prefabricado

Es una clase de biodigestores utilizados para la depuración de efluentes agroindustriales, que posee altos beneficios económicos debido que requiere poco espacio, al ser prefabricado otorga libertad de movimiento para la reubicación a un nuevo sitio y realiza un trabajo eficiente. Adicionalmente suele ser construido con acero inoxidable, lo cual permite que esta clase de biodigestores funcionan por un largo tiempo. Este tipo de biodigestor posee mayor predominancia en el eje Y de un plano cartesiano, es decir, su arquitectura hace que el sistema sea predominantemente vertical y no horizontal. Debido a su arquitectura es usado para tratar efluentes agroindustriales, es decir, aguas que han sido usadas por el sector agroindustrial, las cuales ingresan a este biodigestor por la parte superior y se encuentran con una capa de barro orgánico granular que filtra el agua, quitando sólidos presentes en esta. El agua sale rápidamente de esta capa de barro, mientras que los sólidos se quedan mayor tiempo los cuales alimentan a las bacterias presentes en este barro para así por medio de un proceso anaeróbico producir biogás, el cual es retirado por medio de ductos hacia un reservorio. Mientras se genera biogás el agua que es tratada pasa a ser almacenada en la parte inferior del biodigestor y luego es enviada hacia un reservorio en el exterior. A continuación, en la figura 5 se representa esta clase de biodigestor.



Figura 21. Biodigestor vertical prefabricado.

El digestor de biogás vertical en su diseño cuenta con agitador central, se ensambla a partir de paneles esmaltados sobre pernos. El agitador central se fija al techo. Los anillos superiores de los paneles del digestor a nivel de líquido-gas y la superposición están hechos de acero inoxidable. El digestor se instala sobre una base de hormigón con un sellador. La orientación vertical del fermentador proporciona una mejor transferencia de calor y masa que un fermentador de ancho bajo.

Dentro de las ventajas se tiene:

- Los digestores de metal llevan todos los equipos y se instalan sobre el banco de hormigón armado
- El tiempo para la instalación de un digestor metálico es 3 veces más corto que la construcción de un digestor de hormigón armado
- La altura es comparable o superior al diámetro
- Agitador central

3.2. Dimensionamiento del Volumen del Biodigestor

Para el dimensionamiento del volumen del biodigestor se deberá tener en cuenta la cantidad de materia prima disponible que para el caso es la proveniente de la gallina u otras fuentes, como en el caso del ejemplo del Grupo Campestre, que pueden ser incluidas.

Entre los componentes fundamentales a dimensionar de la planta se citan los siguientes:

- Biodigestor,
- Tanque de almacenamiento,
- Sistema de distribución de biogás,
- Equipos de generación, y
- Distribución de energía eléctrica.

3.3. Cantidad de Materia Prima

Por medio de la Ecuación 1 y 2 se puede determinar la cantidad de estiércol y orina generado por un animal que para el caso es la gallina.

$$E = NA * PVP * \frac{PE}{100}$$

Ecuación 1. Cantidad de estiércol en kilogramos por día.

Donde:

E: Cantidad de estiércol en kilogramos por día.

NA: Número de animales por especie.

PVP: Peso vivo promedio del animal.

PE: Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo.

$$O = NA * PVP * \frac{PO}{100}$$

Ecuación 2. Orín día en kilogramos (1 litro de orín, pesa 1 Kg).

Donde:

O: Cantidad de orín en kilogramos por día.

PO: Producción de orín por animal por día en porcentaje de peso vivo.

NA: Número de animales por especie.

PVP: Peso vivo promedio del animal.

Tras dimensionar la producción de estiércol y orín de la fuente de materia prima o biomasa, se procede a determinar la materia prima para la carga (MPC) del biodigestor por medio de la ecuación 3.

$$MPC = E + O$$

Ecuación 3. Materia prima para la carga (MPC) del biodigestor.

Tras conocer la materia prima para la carga, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales y la cantidad de sólidos contenidos en la materia prima para la carga, dichas variables se calculan por medio de la Ecuación 4 y la Ecuación 5.

$$ST = \frac{E * EST}{MPC}$$

Ecuación 4. Cantidad de sólidos contenidos en la materia prima para la carga (MPC) del biodigestor.

Donde:

ST: Porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga.

E: Estiércol en kilogramos por día.

EST: Porcentaje de sólidos en el estiércol.

MPC: Estiércol en kilogramo por día.

$$ST = \frac{ST * MPC}{100}$$

Ecuación 5. Cantidad de sólidos contenidos en la MPC, en kilogramos por día.

Donde:

ST: Cantidad de sólidos contenidos en la MPC, en kilogramos por día.

MPC: Estiércol en kilogramo por día.

Dentro del proceso de generación de biogás, es importante mezclar la excreta de gallina con agua, lo cual permite que el amoníaco no actúe como resistencia para la producción de biogás por lo cual es necesario determinar la masa de agua que se va a introducir al biodigestor.

$$MH_2O = \frac{MPC * ST}{10} - MPC$$

Ecuación 6. Masa de agua para mezclar con la excreta de gallinaza.

MH₂O: Masa de agua para mezcla que disminuye hasta un 10% los sólidos orgánicos contenidos en la materia prima, en kilogramos por día. Al tener la *MH₂O*, y la *MPC*, se determina la carga diaria para alimentar el biodigestor en kilogramos por día por medio de la Ecuación 7.

$$C = MPC + MH_2O$$

Ecuación 7. Carga diaria para alimentar el biodigestor en kilogramos por día.

Dónde:

C: Carga diaria para alimentar el digestor en kilogramos por día o litros por día
(Se asume que 1 litro pesa 1 kilogramo)

Por último, para determinar el volumen de un biodigestor, es necesario saber el tiempo de retención que se tardará la biomasa dentro del biodigestor. A continuación, por medio de la Ecuación 8 se explica cómo obtener el tiempo de retención.

$$TR = (-51.227 * Ln(T^{\circ}C) + 206.72)$$

Ecuación 8. Tiempo de retención en el biodigestor.

Donde:

TR: Tiempo de retención en día.

Ln: Logaritmo natural.

T[°]C: Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor.

Por último, se determina el volumen del biodigestor, el cual se determina por medio de la Ecuación 9.

$$V_{Bd} = C * TR * 1.2$$

Ecuación 9. Volumen del biodigestor.

Donde:

V_{Bd}: Volumen del biodigestor en litros.

1.2: Volumen adicional para el almacenamiento del biogás.

Para determinar la producción de biogás de la planta es necesario tener el dimensionamiento del biodigestor y de la posible biomasa con la que se va alimentar el sistema. Para saber la producción de biogás se usa la Ecuación 10.

$$PG = MPC * SO * P$$

Ecuación 10. Producción de biogás.

Donde:

PG: Producción en litros por día de biogás.

MPC: Materia prima para la carga.

SO: Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie.

P: Producción aproximada en metros cúbicos de gas por cada kilogramo de masa orgánica seca total con la relación de: $20 \text{ kg} = 1 \text{ m}^3 \text{ biogás} = 1.25 \text{ kWh}$.

3.4. Dimensionamiento de la Planta de Biogás

La planta para generar biogás a partir de la materia prima o biomasa de excreta de gallina es necesario comenzar dimensionando la producción de estiércol y orina de la cantidad de ejemplares o gallinas, así saber dimensionar el biodigestor y a partir de ahí la producción de biogás. Para el presente proyecto, la planta operará con 2000 ejemplares de gallina ponedoras (NA).

Dimensionamiento de Biodigestor con Biomasa Avícola

3.4.1. Método de diseño 1.

El diseño se basa en la cantidad de estiércol disponible, y se utiliza en granjas ya existentes en las cuales se quiere aprovechar al máximo el estiércol disponible para así maximizar la producción de biogás. En la Tabla 18 se muestran las variables para el desarrollo de cálculos con base al peso de un animal vivo.

Tabla 18. Parámetros de dimensionamiento 1

Variable	Unidad
Peso vivo del animal	1.4 kg
Producción de estiércol del animal por día	4.5%
Producción de orín del animal por día	4.5%
Producción aproximada de biogás por kg de masa orgánica seca	0.4%
Porcentaje de sólidos en la excreta animal	3 – 10%
Temperatura del proceso del biodigestor	37°C

Fuente: Elaboración propia

Desarrollo del método 1 para diseño

1.- Empleando la ecuación 1 para el Cálculo de estiércol (E) en [kg/día]

$$E = NA * PVP * \frac{PE}{100} = (2000) * (1.4) * (4.5) = 12,600.0 \frac{kg}{dia}$$

E: Cantidad de estiércol en kilogramos por día.

NA: Número de animales por especie.

PVP: Peso vivo promedio del animal. Ver Tabla 17

PE: Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo. Ver Tabla 17.

2.- Con la ecuación 2 se calcula la cantidad de orín (O) en [kg/día]

$$O = NA * PVP * \frac{PO}{100} = (2000) * (1.4) * (4.5) = 12,600.0 \frac{kg}{dia}$$

O: Cantidad de orín en kilogramos por día.

PO: Producción de orín por animal por día en porcentaje de peso vivo. Ver Tabla 17

NA: Número de animales por especie.

PVP: Peso vivo promedio del animal. Ver Tabla 17

3.- Mediante la ecuación 3 se calcula la materia prima para la carga (MPC)

$$MPC = E + O = (12,600 + 12,600) \frac{kg}{dia} = 25,200.0 \frac{kg}{dia}$$

4.- Empleando la ecuación 4 se calcula el porcentaje de sólidos totales en la materia prima para carga (ST)

$$ST = \frac{E * EST}{MPC} = \frac{\left(12,600.0 \frac{kg}{dia}\right) * (10)}{25,200.0 \frac{kg}{dia}} = 5\%$$

ST: Porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga.

E: Estiércol en kilogramos por día.

%EST: Porcentaje de sólidos en el estiércol. Ver Tabla 16

MPC: Estiércol en kilogramo por día.

5.- La ecuación 5 permite calcular la cantidad de sólidos contenidos en la MPC, en kg/día (*ST*).

$$ST = \frac{ST * MPC}{100} = \frac{(5) * 25,200.0 \frac{kg}{dia}}{100} = 1,260.0 \frac{kg}{dia}$$

ST: Cantidad de sólidos contenidos en la MPC, en kilogramos por día.

MPC: Estiércol en kilogramo por día.

6.- Con la ecuación 6 se calcula la masa de agua que a introducir en el biodigestor (MH_2O),

$$MH_2O = \frac{MPC * ST}{10} - MPC$$

$$MH_2O = \frac{25,200 \frac{kg}{dia} * 1,260 \frac{kg}{dia}}{10} - 25,200 \frac{kg}{dia} = 3,150,000.0 \frac{kg}{dia}$$

MH_2O en $m^3/día$ queda:

$$MH_2O = 3,150,000.0 \frac{kg}{dia} * \left(\frac{1m^3}{1000 kg} \right) = 3,150.0 m^3/dia$$

7.- Empleado la ecuación 7 se puede estimar la carga diaria para alimentar el digestor en kilogramos por día o litros por día (*C*), asumiendo que 1 litro tiene una masa de 1 kilogramo.

$$C = MPC + MH_2O = (25,200 + 3,150,000) \frac{kg}{dia} = 3,175,200 \frac{kg}{dia}$$

C: Carga diaria para alimentar el digestor en kilogramos por día o litros por día (Se asume que 1 litro equivale a 1 kilogramo)

Convertir a $m^3/día$.

$$MH_2O = 3,175,200 \frac{kg}{dia} * \left(\frac{1m^3}{1000 kg} \right) = 3,175.2 m^3/dia$$

8.- Mediante la Ecuación 9 se determina el volumen del BD, para ello primero se calcula el tiempo de retención (RT), para lo cual se usó una temperatura del proceso de 37 °C.

$$TR = (-51.227 * Ln(T°C) + 206.72)$$

$$TR = (-51.227 * Ln(37°C) + 206.72) = 22 días$$

Determinar el volumen del BD, ver Ecuación 9

$$V_{Bd} = C * TR * 1.2 = 3,175,200 \frac{kg}{dia} * 22 \text{ día} * 1.2 = 75,943,985.7 \text{ L}/\text{dia}$$

C: Carga diaria para alimentar el digestor

V_{Bd}: Volumen del biodigestor en litros.

1.2: Volumen adicional para el almacenamiento del biogás.

9.- Producción en litros por día de biogás (PG), ver Ecuación 10

$$PG = MPC * SO * P$$

$$PG = 25,200 \frac{kg}{dia} * (17) * (0.4) = 171,360.0 \frac{l}{dia}$$

PG: Producción en litros por día de biogás.

MPC: Materia prima para la carga.

SO: Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie. Ver Tabla 17

P: Producción aproximada en metros cúbicos de gas por cada kilogramo de masa orgánica seca total con la relación de: 20 Kg = 1 m³ biogás = 1.25 kWh. Ver Tabla 17

Convertir a m³/día.

$$PG = 171,360.0 \frac{l}{dia} * \left(\frac{1m^3}{1000 \text{ kg}} \right) = 171.36 \text{ m}^3/\text{dia}$$

3.4.2. Método de diseño 2 Para Dimensionar el Biodigestor

En el segundo método de cálculo se considera la cantidad de estiércol disponible, el peso vivo del ejemplar y la densidad del biogás de gallinaza. Con esta información se determinó el dimensionamiento del biodigestor y a partir de allí la producción de biogás, empleando la misma cantidad de 2000 ejemplares de gallina ponedoras en la planta.

De acuerdo con (Cetero, 2022), una gallina de 16 semanas tendrá un peso entre 1.7 y 2.2 kg y generará en promedio 150 gramos (0.15 kg) de estiércol al día.

Por otro lado, (Estrada Pareja, 2005) dice que, por cada kg de alimento consumido, los pollos producen alrededor de 1.1 - 1.2 kg de eyecciones frescas con 70 - 80% de humedad. En cuanto

a las eyecciones secas, ello supondría 0.2 - 0.3 kg por ave y por kg de alimento consumido. Al final del periodo de crecimiento, el peso total puede alcanzar 20 - 28 kg por cada ave al día. En la Tabla 19 se muestran los parámetros para el diseño del biodigestor con base a un peso promedio 1.4 kg por pollo.

Tabla 19. Parámetros de dimensionamiento 2

Variable	Unidad
Peso vivo del animal	1.4 kg
Eyecciones frescas del animal adulto por día	20 kg
Porcentaje de masa seca en el estiércol (%MS)	8%
La masa seca introducida al biodigestor	10%
Porcentaje de masa volátil en el estiércol (%MV)	83%
Valor promedio de masa volátil por cada kg de estiércol	0.325 m ³
Densidad del estiércol de gallina	550 kg/ m ³
Densidad del biogás	1.2 kg/m ³
Temperatura del proceso del biodigestor	31°C

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.1. Cálculo de Cantidad de Estiércol

1.- La cantidad de estiércol por cada gallina ponedora queda:

$$\frac{\text{Estiércol}}{\text{dia}} = \text{Cant. estiércol}_{\text{animal}} * \text{peso}(\text{kg})_{\text{animal}}$$

$$\frac{\text{Estiércol}}{\text{dia}} = 20 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg.peso.dia}} * 1.4 \text{ kg.peso} = 28 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{dia}}$$

2.- La cantidad de estiércol diario en 2000 gallinas ponedoras es:

$$\frac{\text{Estiércol}}{2000 \text{ unid, dia}} = 28 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{dia}} * 2000 = 56,000.0 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{dia}}$$

3.4.2.2. Cálculo de la Cantidad de Biogás Generado

Se tomará en cuenta la variable de la Tabla 19 para la masa seca, siendo: MS de 8% y MV de 83%. Según lo anterior, el valor promedio de biogás en un kg de masa volátil (MV) es de 0.325 m³.

De acuerdo con lo anterior, la producción de biogás queda de la manera siguiente:

$$Biogás_{generado} = \#Excreta_{animal-día} * MS * MV * \#biogás_{kg-MV}$$

$$Biogás_{generado} = 28 \frac{kg \text{ estiércol}}{MS.gallina - día} * 0.08 * 0.83 * 0.325 \frac{m^3}{kg.MV}$$

$$Biogás_{generado} = 0.604 \frac{m^3}{gallina - día}$$

4.- Cantidad de biogás diario en 2000 gallinas ponedoras en el primer digestor:

$$Biogás_{generado \text{ 1er } BD} = 0.604 \frac{m^3}{gallina - día} * 2000 \text{ gallinas} = 1,208.48 \frac{m^3}{día}$$

a) Cantidad de biogás por hora:

$$Biogás_{hora} = 1,208.48 \frac{m^3}{día} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 50.35 \frac{m^3}{h}$$

b) Cantidad de biogás por mes:

$$Biogás_{mes} = 1,208.48 \frac{m^3}{día} * \frac{30 \text{ día}}{1 \text{ mes}} = 36,254.40 \frac{m^3}{mes}$$

c) Cantidad de biogás por año:

$$Biogás_{año} = 1,208.48 \frac{m^3}{día} * \frac{365 \text{ día}}{1 \text{ año}} = 441,095.20 \frac{m^3}{año}$$

3.4.2.3. Cálculo del Tanque de Alimentación

Para estimar el volumen de materia prima para carga (MPC) para el tanque de alimentación donde se mezcla y homogeneiza el estiércol para su posterior introducción al biodigestor, se recomienda, con base a la Tabla 19, que el porcentaje de la biomasa seca (MS) sea 8% y la densidad de la gallinaza (ρ) de 550 kg/m³. Por lo tanto, el volumen queda:

$$MPC = \frac{\#Excreta_{animal-día} * \# \text{ gallinas}}{\rho_{gallinaza}}$$

Considerar la cantidad de estiércol por cada gallina ponedora al día de:

28 kg estiércol/día

$$MPC = \frac{28 \frac{kg}{gallina \cdot dia} * 2000 \text{ gallina}}{550 \frac{kg}{m^3}} = 101.82 \frac{m^3}{dia}$$

Lo anterior es el volumen mínimo del tanque de alimentación. Al volumen anterior se le incrementará un porcentaje para sobredimensionamiento, dicho valor es del 20%. Por lo tanto, el nuevo volumen es el siguiente:

$$MPC = 101.82 \frac{m^3}{dia} * 1.2 = 123.84 \frac{m^3}{dia}$$

Para un depósito cilíndrico, el volumen de éste se calcula con la ecuación $V=\pi r^2 h$ y por lo tanto, si se asumen un radio de 3 metros, la altura del tanque es la siguiente:

Parámetros de diseño
Radio de diseño: 3 m
Altura de diseño: 4.5 m

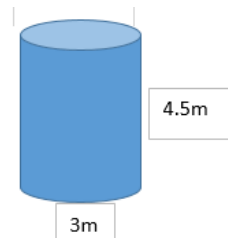


Figura 22. Tanque de alimentación al biodigestor

3.4.2.4. Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulico (RTH)

Temperatura de interior en el biodigestor 31°C

$$TRH = (-51,227 * \ln(T^{\circ}C) + 206,72)$$

$$TRH = (-51,227 * \ln(31^{\circ}C) + 206,72) = 30.8 \text{ días}$$

3.4.2.5. Balance de Masa Global del Proceso

El procedimiento siguiente es para calcular las cantidades de digestato y biogás obtenido en cada digestor, el detalle como sigue:

Primer digestor

Datos para el balance de masa:

- a) Carga diaria de estiércol introducida es 56,000.0 kg/día
- b) Cantidad de biogás diario es 1,208.48 m³/día
- c) Densidad del biogás (asumido): 1.2 kg/m³

Cálculo de flujo másico de gas por día.

$$m_{gas/día} = biogás \frac{m^3}{día} * \rho_{estiércol} \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{gas/día} = 1,208.48 \frac{m^3}{día} * 1,2 \frac{kg}{m^3} = 1\,450.18 \frac{kg}{día}$$

Con la masa de biogás se obtiene la masa diaria de digestato resultante del proceso en el biodigestor, el cual queda de la manera siguiente:

$$kg\ digestato = Masa\ de\ carga\ diaria\ (MPC) - Masa\ de\ biogás$$

$$kg\ digestato = (56,000 - 1\,450.18) \frac{kg}{día} = 54,549.82 \frac{kg}{día}$$

Asumiendo la densidad del estiércol de ρ : 550 kg/m³, el volumen de digestato queda:

$$Volumen\ digestato = \frac{kg\ digestato}{densidad\ estiércol}$$

$$Volumen\ digestato = \frac{54,549.82 \frac{kg}{día}}{550 \frac{kg}{m^3}} = 99.00 \frac{m^3}{día}$$

Segundo digestor.

Datos para el balance de masa:

- a) Carga diaria del digestato 1(estiércol) en el segundo digestor es 54,549.82 kg/día
- b) Cantidad de MS = 5%
- c) MV: 83%
- d) Valor de la masa volátil (MV), valor tomado para el proyecto 0.325 m³.

Cálculo del biogás en el segundo digestor

A partir de la carga diaria de digestato 1 (estiércol), el volumen de biogás del segundo digestor es:

$$BG_{2do\ BD} = Carga\ diaria\ OUT-digestato\ 1er\ BD * MS * MV * \rho\ biogás$$

$$Biogás_{2do\ BD} = 54,549.82 \frac{kg}{MS.día} * 0.05 * 0.83 * 0.325 \frac{m^3}{kg.MV}$$

$$Biogás_{generado\ 2do\ BD} = 735.74 \frac{m^3}{día}$$

Cálculo de la masa del biogás 2do BD.

$$kg\ biogás_{2do\ BD} = biogás \frac{m^3}{día} * \rho_{estiércol} \frac{kg}{m^3} = (unid.\ de\ masa) \frac{kg}{día}$$

$$kg\ biogás_{2do\ BD} = 735.74 \frac{m^3}{día} * 1,2 \frac{kg}{m^3} = 882.89 \frac{kg}{día}$$

Cálculo de la masa del digestato en el segundo biodigestor

Con la masa de biogás se obtiene la masa diaria de digestato 2 resultante del proceso en el biodigestor 2.

$$kg\ digestato_{2do\ BD} = Masa\ de\ carga\ diaria\ MPC - Masa\ de\ biogás$$

$$kg\ digestato_{2do\ BD} = (54,549.82 - 882.89) \frac{kg}{día} = 53,666.54 \frac{kg}{día}$$

Asumiendo la misma densidad del estiércol de ρ : 550 kg/m³, el volumen del segundo digestato queda:

$$Volumen\ digestato_{2do\ BD} = \frac{kg\ digestato_{2do\ BD}}{densidad\ estiércol}$$

$$Volumen\ digestato_{2do\ BD} = \frac{53,666.54 \frac{kg}{día}}{550 \frac{kg}{m^3}} = 97.00 \frac{m^3}{día}$$

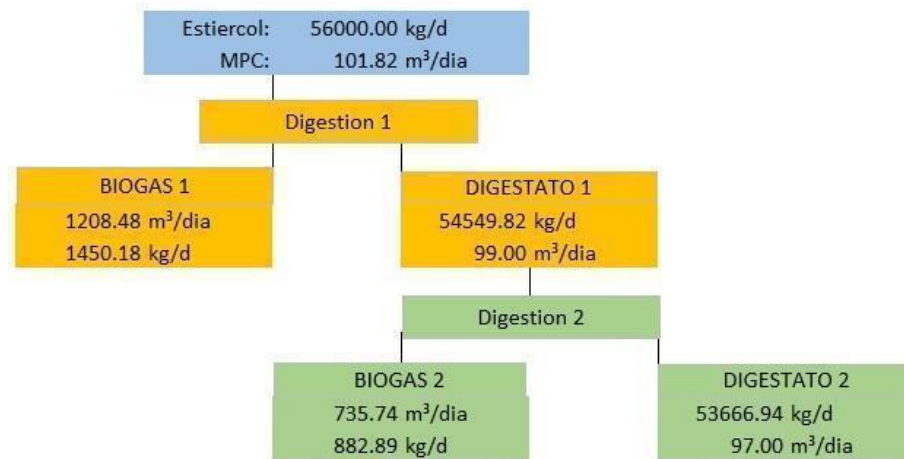


Figura 23. Balance de masa global (Elaboración propia)

3.4.2.6. Carga Orgánica Volumétrica (COV)

Esta es la cantidad orgánica que produce el biogás, con esta se alimentará a los dos biodigestores y se expresa en m^3 . El valor debe estar comprendido entre 1 y 3 $kg \cdot m^3/día$.

$$COV = \frac{\% \text{ de MS} * \% \text{ de MV} * \rho_{\text{estiércol}}}{TRH_{\text{días}}}$$

COV del biodigestor 1 ($COV_{1er BD}$)

$$COV_{1er BD} = \frac{0.08 * 0.83 * 550 \frac{kg}{m^3}}{31 \text{ días}} = 1.17 \frac{kg}{m^3 \cdot día}$$

Siendo:

- a) MS: 8%
- b) MV: 83%
- c) $\rho = 550 \text{ kg/m}^3$

COV del biodigestor 2 ($COV_{2do BD}$)

$$COV_{2do BD} = \frac{0.05 * 0.83 * 550 \frac{kg}{m^3}}{31 \text{ días}} = 0.736 \frac{kg}{m^3 \cdot día}$$

Siendo:

- a) MS: 5%
- b) MV: 83%
- c) $\rho = 550 \text{ kg/m}^3$

Si supera los 3 kg/m³*día, el proceso es más inestable y se debe controlar constantemente para comprobar si disminuye o no la producción de biogás. El valor obtenido para la COV del segundo biodigestor no presenta exceso de sólidos y facilita la movilidad de los microorganismos, aumentando la efectividad del proceso.

Por otro lado, considerando que el digestato 1 es la biomasa que sale del biodigestor 1. El valor de 5% en MS es debido a los procesos de homogeneización previos antes de entrar al segundo biodigestor.

3.4.2.7. Cálculo del Volumen de los Digestores

Los caudales de alimentación para cada biodigestor, según diseño, son diferentes, siendo el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la temperatura de digestión el mismo valor para ambos. Para su dimensionamiento se establece un 20% de seguridad de los volúmenes a calcular.

Por su facilidad de construcción en acero u hormigón se seleccionó unos biodigestores de mezcla completa de forma cilíndrica, son los más utilizados para el tratamiento de residuos mediante digestión anaerobia debido a que la mezcla de materia orgánica y agua se mantiene permanentemente mezclada de forma homogénea mediante un sistema de agitación mecánico.

El tiempo de retención hidráulico (RTH) tiene un rango de 10 a 30 días de acuerdo con la temperatura de digestión y el porcentaje óptimo de residuos sólidos en la mezcla, el cual debe situarse entre el 3 y el 10%. Por lo anterior, la carga puede realizarse de forma continua o discontinua y puede existir o no recirculación del efluente.

Estimación del Volumen del Primer Biodigestor

Para su cuantificación se toma en cuenta la materia prima obtenida a diario producto de los 2000 ejemplares de gallinas ponedoras, con un valor de 101.82 m³/día que representa la carga de biomasa y un RTH de 31 días, por lo tanto, el volumen del primer biodigestor queda:

$$V_{total\ 1er\ BD} = TRH * Caudal\ alim * margen\ de\ seguridad$$

Siendo:

RTH: 31 días

Carga de alimentación: 101.82 m³/día

Margen de seguridad: 20%

$$V_{total\ 1er\ BD} = 31\ dias * 101.82 \frac{m^3}{día} * 1.2 = 3,787.70m^3$$

Volumen del Segundo Biodigestor

Con el caudal total de biomasa de 99.0 m³/día y un RTH de 31 días, el volumen del segundo biodigestor queda:

$$V_{total\ 2do\ BD} = TRH * Caudal\ alim * margen\ de\ seguridad$$

Siendo:

RTH: 31 días

Carga de alimentación: 99.0 m³/día

Margen de seguridad: 20%

$$V_{total\ 2do\ BD} = 31\ días * 99.0 \frac{m^3}{día} * 1.2 = 3,682.80m^3$$

Dado que el segundo biodigestor almacena el biogás y de acuerdo con (Moncayo Romero, 2013), el volumen total que incluya el volumen de almacenamiento de biogás en la cúpula más un volumen mínimo de biogás con un almacenamiento de 5 horas queda:

Biodigestor 1: 1,208.48 m³/día

Biodigestor 2: 735.74 m³/día

$$Total\ de\ biogás_{BD\ 1,2} = Biogás_{BD\ 1} + Biogás_{BD\ 2}$$

$$Total\ de\ biogás_{BD\ 1,2} = (1,208.48 + 735.74) \frac{m^3}{día} = 1,994.22 \frac{m^3}{día}$$

El volumen mínimo para la cantidad de biogás producido en 5 horas es:

$$V_{Min-biogás\ 2do\ BD} = 1,994.22 \frac{m^3}{día} * \frac{1día}{24h} * 5h = 415.46 m^3$$

El volumen total del segundo biodigestor, incluyendo la cúpula, queda:

$$V_{Total\ 2do\ BD} = V_{Total\ 2do\ BD} + V_{Min-biogás\ 2do\ BD}$$

$$V_{Total\ 2do\ BD} = (3,682.80 + 415.46) m^3 = 4,098.26 m^3$$

Con base a lo anterior, los parámetros de ambos biodigestores son los siguientes:

Tabla 20. Tabla comparativa de parámetros de los biodigestores

Parámetro \ Digestor	Digestor 1	Digestor 2	Unidad
Biomasa para carga.	56,000	53,666.54	kg/día
Volumen de diseño	3,787.70	3,682.80	m ³
Temperatura digestión	31	31	°C
RTH	31	31	día
Margen de seguridad	20	20	%
Volumen total	3,787.70	4,098.26	m ³
Área total	1,706.64	1,691.37	m ²

Fuente: Elaboración propia

Según se muestra en la Figura 24, las dimensiones de los biodigestores y la cúpula de almacenamiento mínimo de biogás, construidas en hormigón armado con un espesor de 30 cm queda:

Dimensiones generales del primer digestor.

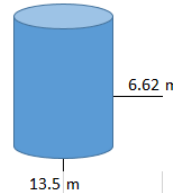
$$V_{cilindro} = \pi r^2 h [m^3]$$

$$A_{cilindro} = 2\pi r h + 2\pi r^2 [m^2]$$

Ecuación 26. Cálculo del volumen y área de un cilindro.

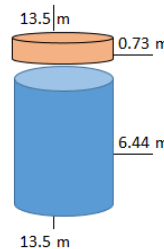
Digestor 1

- Radio: 13.5 m
- Altura: 6.62 m
- Diámetro: 27 m
- Espesor de pared: 0.3m
- Área: 1,706.64 m²



Digestor 2

- Radio: 13.5 m
- Altura: 6.44 m
- Diámetro: 27 m
- Espesor de pared: 0.3m
- Área: 1,691.37 m²



Cúpula:

- Radio: 13.5 m
- Altura: 0.73 m

Figura 24. Dimensiones de biodigestores y cúpula del BD 2.

Dimensionamiento del Biodigestor con Biomasa Bovina

3.4.3. Método de diseño 2

A continuación, se calcula la cantidad de estiércol que genera cada cabeza de ganado. Citando a (Moncayo Romero, 2013), se considera que cada kilogramo de peso vivo del animal genera 0.086 kg de estiércol al día en un bovino adulto con un peso promedio de 600 kg; lo cual se verá influenciado por factores como la alimentación, el peso y el tipo de confinamiento de los animales.

Tabla 21. Parámetros de dimensionamiento con biomasa bovina.

Variable	Unidad
No. De cabezas de ganado	500
Cada kg de Peso vivo del animal genera estiércol kg/día	0.086 kg /día
Eyecciones frescas del animal adulto por día	20 kg
<i>Porcentaje de masa seca en el estiércol (%MS)</i>	8%
<i>La masa seca introducida al biodigestor</i>	10%
<i>Porcentaje de masa volátil en el estiércol (%MV)</i>	83%
<i>Valor promedio de masa volátil por cada kg de estiércol</i>	0.325 m ³
Densidad del estiércol de res	600 kg/ m ³
Densidad del biogás	1.2 kg/m ³
Temperatura del proceso del biodigestor	31°C

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.1. Cálculo de la Cantidad de Estiércol

1.- Cantidad de estiércol por cada cabeza de ganado:

$$\frac{\text{Estiércol}}{\text{día}} = \text{Cant. estiércol}_{\text{animal}} * \text{peso}(\text{kg})_{\text{animal}}$$

$$\frac{\text{Estiércol}}{\text{día}} = 0.086 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{kg. peso. día}} * 600 \text{ kg. peso} = 51.6 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

2.- Cantidad de estiércol diario en 500 cabezas de ganado:

$$\frac{\text{Estiércol}}{500 \text{ unid, día}} = 51.6 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día. res}} * 500 \text{ res} = 25,800 \frac{\text{kg estiércol}}{\text{día}}$$

3.4.3.2. Cálculo del biogás generado

Con base a la *Tabla 21*, la cantidad de estiércol calculada, la cantidad de biogás, así como también los parámetros de 8% de MS: 83% de MV y valor promedio de biogás en un kg de masa volátil (MV) igual a 0.325 m³, la cantidad de biogás queda:

$$Biogás_{generado} = \#Excreta_{animal-dia} * \%MS * \%MV * \#biogás_{kg-MV}$$

$$Biogás_{generado} = 51.6 \frac{kg \text{ estiércol}}{MS.res - dia} * 0.08MS * 0.83MV * 0.325 \frac{m^3}{kg.MV}$$

$$Biogás_{generado} = 1.11 \frac{m^3}{res - dia}$$

3.- Cantidad de biogás diario en 500 cabezas de ganado en el primer digestor.

$$Biogás_{generado \text{ 1er } BD} = 1.11 \frac{m^3}{res - dia} * 500 res = 555.00 \frac{m^3}{dia}$$

a) Cantidad de biogás por hora:

$$Biogás_{hora} = 555.00 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 \text{ día}}{24 h} = 23.12 \frac{m^3}{h}$$

b) Cantidad de biogás por mes:

$$Biogás_{mes} = 555.00 \frac{m^3}{dia} * \frac{30 \text{ dia}}{1 \text{ mes}} = 16,650.00 \frac{m^3}{mes}$$

c) Cantidad de biogás por año:

$$Biogás_{año} = 555.00 \frac{m^3}{dia} * \frac{365 \text{ dia}}{1 \text{ año}} = 202,575.00 \frac{m^3}{año}$$

3.4.3.3. Cálculo del Tanque de Alimentación

Para mezcla y homogenizar el estiércol y a continuación introducirlo al biodigestor, se recomienda, según *Tabla 21*, que el porcentaje de la biomasa sea del 8% (MS) y la densidad del estiércol del ganado (ρ) 600 kg/m³.

$$MPC = \frac{\#Excreta_{animal-dia} * \# ganado}{\rho_{ganado}}$$

$$MPC = \frac{51.6 \frac{kg}{res.dia} * 500 res}{600 \frac{kg}{m^3}} = 43.00 \frac{m^3}{dia}$$

Para obtener las dimensiones del tanque según un volumen mínimo 43.00 m³ más un margen del 20%, el resultado es el siguiente:

$$MPC = 43.00 \frac{m^3}{dia} * 1.2 = 51.60 \frac{m^3}{dia}$$

Parámetros de diseño
Radio de diseño: 3 m
Altura de diseño: 2.04 m

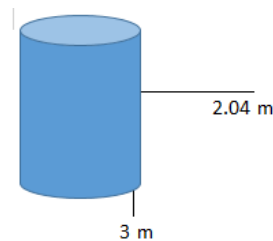


Figura 25. Tanque de alimentación al bio digestor con excretas de ganado.

3.4.3.4. Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulico TRH

Asumiendo una temperatura de interior en el biodigestor de 31°C, el TRH queda

$$TRH = (-51,227 * \ln(T^{\circ}C) + 206,72)$$

$$TRH = (-51,227 * \ln(31^{\circ}C) + 206,72) = 30.8 \text{ días}$$

3.4.3.5. Balance de Masa Global del Proceso

Con el procedimiento que se detalla a continuación se procedió el cálculo de las cantidades de digestato y biogás obtenido en cada digestor.

Primer digestor

Datos para el balance de masa:

- Carga diaria de estiércol introducida es 25,800 kg/día,
- Cantidad de biogás diario es 555.00 m³/día, y
- Densidad del biogás de 1.2 kg/m³.

Cálculo de la masa del biogás.

$$kg \text{ biogás} = biogás \frac{m^3}{dia} * \rho_{estiércol} \frac{kg}{m^3} = (unid. de masa) \frac{kg}{día}$$

$$kg \text{ biogás} = 555.00 \frac{m^3}{dia} * 1,2 \frac{kg}{m^3} = 666.00 \frac{kg}{día}$$

Al igual que para el caso de la gallinaza, el cálculo de digestato se obtendrá restando la masa de biogás a la masa de carga diaria.

$$kg \text{ digestato} = \text{Masa de carga diaria MPC} - \text{Masa de biogás}$$

$$kg \text{ digestato} = (25,800 - 666.00) \frac{kg}{dia} = 25,134.00 \frac{kg}{dia}$$

Convertir las unidades de masa del digestato a unidades de volumen, se toma la densidad del estiércol de ρ : 600 kg/m³

$$\text{Volumen digestato} = \frac{kg \text{ digestato}}{\text{densidad estiércol}}$$

$$\text{Volumen digestato} = \frac{25,134.00 \frac{kg}{dia}}{600 \frac{kg}{m^3}} = 41.89 \frac{m^3}{dia}$$

Segundo digestor.

Datos para el balance de masa:

- Carga diaria del digestato 1(estiércol) en el segundo digestor es 25,134.00kg/día
- Cantidad de MS = 5%
- MV: 83%
- Valor de la masa volátil (MV), valor tomado para el proyecto 0.325 m³.

Cálculo del biogás en el segundo digestor

De esa carga diaria de digestato 1(estiércol) en el segundo digestor se obtiene el siguiente volumen de biogás.

$$BG_{2do BD} = \text{Carga diaria}_{OUT-digestato 1er BD} * \%MS * \%MV * \rho \text{ biogás}$$

$$Biogás_{2do BD} = 25,134.00 \frac{kg}{MS.dia} * 0.05MS * 0.83MV * 0.325 \frac{m^3}{kg.MV}$$

$$Biogás_{generado 2do BD} = 338.99 \frac{m^3}{dia}$$

Cálculo de la masa del biogás 2do BD

$$kg \text{ biogás}_{2do BD} = \text{biogás} \frac{m^3}{dia} * \rho_{estiércol} \frac{kg}{m^3} = (\text{unid. de masa}) \frac{kg}{dia}$$

$$kg \text{ biogás}_{2do BD} = 338.99 \frac{m^3}{dia} * 1,2 \frac{kg}{m^3} = 406.79 \frac{kg}{dia}$$

Cálculo de la Masa del Digestato en el Segundo Biodigestor

Con la masa de biogás se obtiene la masa diaria de digestato 2 resultante del proceso en el biodigestor 2.

$$kg \text{ digestato}_{2do \text{ BD}} = \text{Masa de carga diaria MPC} - \text{Masa de biogás}$$

$$kg \text{ digestato}_{2do \text{ BD}} = (25,134.00 - 406.79) \frac{kg}{\text{día}} = 24,727.21 \frac{kg}{\text{día}}$$

Con una densidad del estiércol de ρ : 550 kg/m³ se convirtió la masa de digestato a volumen.

$$\text{Volumen digestato}_{2do \text{ BD}} = \frac{kg \text{ digestato}_{2do \text{ BD}}}{\text{densidad estiércol}}$$

$$\text{Volumen digestato}_{2do \text{ BD}} = \frac{24,727.21 \frac{kg}{\text{día}}}{600 \frac{kg}{m^3}} = 41.21 \frac{m^3}{\text{día}}$$

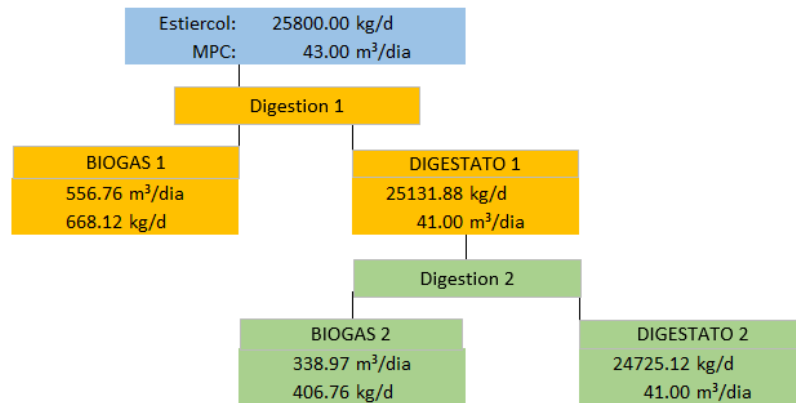


Figura 26. Balance de masa global con excreta bovina (fuente propia).

3.4.3.6. Carga Orgánica Volumétrica (COV)

Es la carga de cantidad orgánica que produce biogás, con esta se alimentará a los dos biodigestores, la carga volumétrica se expresa en m³. El valor debe estar comprendido entre 1 y 3 kg.m³/día.

$$COV = \frac{\% \text{ de MS} * \% \text{ de MV} * \rho_{\text{estiércol}}}{TRH_{\text{días}}}$$

COV del biodigestor 1 ($COV_{1er BD}$)

$$COV_{1er BD} = \frac{0.08 * 0.83 * 600 \frac{kg}{m^3}}{31 \text{ días}} = 1.28 \frac{kg}{m^3 \cdot dia}$$

Siendo:

- a) MS: 8%
- b) MV: 83%
- c) $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$

COV del biodigestor 2 ($COV_{2do BD}$)

$$COV_{2do BD} = \frac{0.05 * 0.83 * 600 \frac{kg}{m^3}}{31 \text{ días}} = 0.80 \frac{kg}{m^3 \cdot dia}$$

Siendo:

- a) MS: 5%
- b) MV: 83%
- c) $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$

Si supera los $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{día}$, el proceso es más inestable y se debe controlar constantemente para comprobar si disminuye o no la producción de biogás. El valor obtenido para la COV del segundo biodigestor no presenta exceso de sólidos y facilita la movilidad de los microorganismos, aumentando la efectividad del proceso; considerando que el digestato 1 es la biomasa que sale del biodigestor 1. El valor de 5% de MS es debido a los procesos de homogeneización previos antes de entrar al segundo biodigestor.

3.4.3.7. Cálculo del Volumen de los Digestores

Los caudales de alimentación para cada biodigestor son diferentes, siendo el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la temperatura de digestión, similares para ambos. Para su dimensionamiento se establece un 20% de seguridad de los volúmenes a calcular.

Por su facilidad de construcción en acero u hormigón seleccionamos biodigestores de mezcla completa de forma cilíndrica, son los más utilizados para el tratamiento de residuos mediante digestión anaerobia debido a que la mezcla de materia orgánica y agua se mantiene permanentemente mezclada de forma homogénea mediante un sistema de agitación mecánico.

El tiempo de retención hidráulico (TRH) tiene un rango de 10 a 30 días de acuerdo con la temperatura de digestión, y el porcentaje óptimo de residuos sólidos en la mezcla debe situarse entre el 3 y el 10%. La carga puede realizarse de forma continua o discontinua, y puede existir o no recirculación del efluente.

Volumen del primer biodigestor

Cuantificación de la materia prima obtenida a diario, producto de los 500 ejemplares de cabeza de ganado con un valor de 43.00 m³/día que representa la carga o caudal de alimentación. El RTH de 31 días.

$$V_{total\ 1er\ BD} = TRH * Caudal\ alim * margen\ de\ seguridad$$

Siendo:

RTH: 31 días

Carga de alimentación: 43.00m³/día

Margen de seguridad: 20%

$$V_{total\ 1er\ BD} = 31\ días * 43.00\ \frac{m^3}{día} * 1.2 = 1,599.60m^3$$

Volumen del segundo biodigestor

Cantidad de materia prima obtenida del digestato 1 con un valor de 41.21 m³/día que representa la carga o caudal de alimentación. El TRH de 31 días.

$$V_{Total\ 2do\ BD} = TRH * Caudal_{alimentación} * margen\ de\ seguridad$$

Siendo:

RTH: 31 días

Carga de alimentación: 41.21 m³/día

Margen de seguridad: 20%

$$V_{Total\ 2do\ BD} = 31\ días * 41.21\ \frac{m^3}{día} * 1.2 = 1,533.01\ m^3$$

Dado que el segundo biodigestor almacena el biogás, se calculará un volumen total que incluya el volumen de almacenamiento de biogás en la cúpula; más un volumen mínimo de biogás con un almacenamiento de 5 horas, como señala (Moncayo Romero, 2013).

Se consolida el biogás producido en ambos biodigestores, siendo:

Biodigestor 1: 555.00 m³/día

Biodigestor 2: 338.99m³/día

$$Total\ de\ biogás_{BD\ 1,2} = Biogás_{BD\ 1} + Biogás_{BD\ 2}$$

$$Total\ de\ biogás_{BD\ 1,2} = (555.00 + 338.99) \frac{m^3}{día} = 893.99 \frac{m^3}{día}$$

Cálculo del volumen mínimo para la cantidad de biogás producido en 5 horas:

$$V_{Min-biogás\ 2do\ BD} = 893.99 \frac{m^3}{día} * \frac{1día}{24h} * 5h = 186.25 m^3$$

Cálculo del volumen total del segundo biodigestor incluyendo la cúpula:

$$V_{Total\ 2do\ BD} = V_{Total\ 2do\ BD} + V_{Min-biogás\ 2do\ BD}$$

$$V_{Total\ 2do\ BD} = (1533.01 + 186.25) m^3 = 1,719.26 m^3$$

Resumen de cálculos de los biodigestores. Ver Tabla 22

Tabla 22. Tabla comparativa de parámetros de los biodigestores con excretas bovinas.

Parámetro \ Digestor	Digestor 1	Digestor 2	Unidad
Biomasa para carga.	25,800.00	25,134.00	kg/día
Volumen de diseño	1,599.60	1,533.01	m ³
Temperatura digestión	31	31	°C
RTH	31	31	día
Margen de seguridad	20	20	%
Volumen total	1,599.60	1,719.26	m ³
Área total	1,382.61	1,372.44	m ²

Fuente: Elaboración propia

Ver Figura 27 las dimensiones de los biodigestores y la cúpula de almacenamiento mínimo de biogás serán construidos en hormigón armado con un espesor de 30 cm en paredes de los biodigestores.

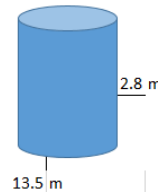
Dimensiones del primer digestor.

$$V_{cilindro} = \pi r^2 h [m^3] \qquad A_{cilindro} = 2\pi r h + 2\pi r^2 [m^2]$$

Ecuación 11. Cálculo del volumen y área de un cilindro.

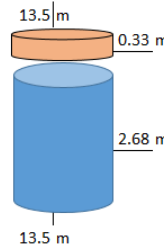
Digestor 1

- Radio: 13.5 m
- Altura: 2.8 m
- Diámetro: 27 m
- Espesor de pared: 0.3m
- Área: 1,382.61 m²



Digestor 2

- Radio: 13.5 m
- Altura: 2.68 m
- Diámetro: 27 m
- Espesor de pared: 0.3m
- Área: 1,372.44 m²



Cúpula:

- Radio: 13.5 m
- Altura: 0.33 m

Figura 27. Dimensiones de biodigestores y cúpula del BD 2.

3.4.3.8. Dimensionamiento y Diseño de los Biodigestores

Una vez desarrollados los diferentes cálculos del tanque de alimentación y los digestores que serán utilizados para digerir los sustratos de origen animal, se procede a dimensionar los componentes principales que se van a instalar en la planta.

Debido a su sencillez y versatilidad se opta por instalar el tanque de alimentación y los dos digestores en forma cilíndrica de tipo mezcla completa con agitación mecánica mediante palas. En el primer biodigestor se realiza una primera digestión, y el digestato obtenido se introducirá en el segundo biodigestor para llevar a cabo una digestión secundaria y obtener mayor cantidad de biogás. El segundo digestor se almacenará el biogás generado en una cúpula cubierta por una delgada membrana de polietileno de alta densidad (HDPE).

Los tres componentes serán alimentados con excretas de gallinaza y bovina, y un margen de seguridad del 20% que contempla un volumen útil y otro de seguridad (borde libre). Para dimensionar los componentes, previamente se han calculado parámetros de operación como la temperatura de digestión, el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la carga orgánica volumétrica (COV).

a) Tanque de alimentación.

Tabla 23. Dimensiones del tanque de alimentación con excretas de gallinaza y bovino.

Tipo de sustrato	Parámetro
Excretas de Gallinaza (v)	123.84 m ³
Excreta de Bovinos (v)	51.60 m ³
Volumen total	205.44 m ³
Volumen del cilindro	
- Radio de diseño	4 m
- Altura	4.1 m

(Fuente: elaboración propia)

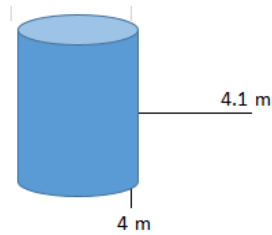


Figura 28. Dimensiones Tanque de alimentación con sustrato de gallinaza y excretas de bovino.

b) Biodigestor 1

Tabla 24. Dimensiones del biodigestor 1 con excretas de gallinaza y bovino.

Tipo de sustrato	Parámetro
Excretas de Gallinaza (v)	3,787.70 m ³
Excreta de Bovinos (v)	1,333.00 m ³
Volumen total	5,120.70 m ³
Volumen del cilindro	
- Radio de diseño	13.5 m
- Altura	8.95 m
Área total	1,904.28 m ²

(Fuente: elaboración propia)

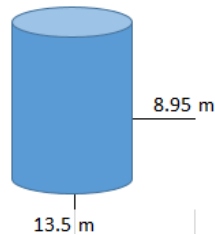


Figura 29. Dimensiones Biodigestor 1 con sustrato de gallinaza y excretas de bovino.

c) Biodigestor 2 y Cúpula.

Tabla 25. Dimensiones del biodigestor 2 y cúpula, excretas de gallinaza y bovina.

Tipo de sustrato	Parámetro
Excretas de Gallinaza (v)	4,098.26 m ³
Excreta de Bovinos (v)	1,277.51 m ³
Volumen total digestor	5,375.77 m ³
Volumen del cilindro	
- Radio de diseño	13.5 m
- Altura	9.40 m
Volumen total Cúpula	601.71 m ³
- Radio de diseño	13.5 m
- Altura	1.06 m
Área total	2,032.36 m ²

(Fuente: elaboración propia).

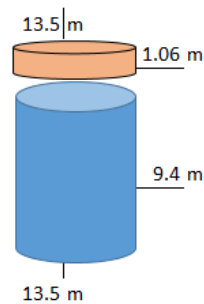


Figura 30. Dimensiones Biodigestor 2 y cúpula con sustrato de gallinaza y excretas de bovino.

3.5. Sistema de calefacción en los biodigestores

En la sección 3.4.2.4. Se determina la temperatura del proceso de digestión de 31°C, lo cual requiere energía térmica para la calefacción. Podemos obtener esta energía en la etapa de refrigeración de la unidad de cogeneración.

El sistema de calefacción está compuesto por una estructura de tuberías a través de las cuales circula agua caliente, ubicadas en el interior de las paredes de los digestores. Las tuberías están

construidas con materiales como PE⁴², acero inoxidable y PE-Xa⁴³ que son tubos de polietileno reticulado propios para implementar sistemas de calefacción en plantas de biogás.

Como recomienda (Moncayo Romero, 2013) en el manual práctico de diseño “Dimensionamiento, Diseño y Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás”, la primera tubería tiene que instalarse a 0.50 m sobre el nivel de piso terminado del digestor, con una separación a la pared de 0.05-0.10 m. La red de tuberías debe estar separadas horizontalmente entre ellas por aproximadamente 0.50 m. El sistema de calefacción debe cubrir como mínimo una tercera parte de la altura total del digestor.

A través de un balance de energía en los digestores se calcula la energía requerida por los sistemas de calefacción. Los cálculos se enfocan en las pérdidas por transferencia de calor en ambos digestores y en el calor requerido para mantener la temperatura interior de 31°C.

3.5.1. Pérdidas por transferencia de calor en primer digestor

En primer plano se establecen los coeficientes de transferencia de calor (U), coeficientes de convección (h) y conductividades, con ello desarrollar los cálculos de las pérdidas por transferencia de calor. Para los cálculos de las pérdidas por transferencia de calor se obtienen los coeficientes de transferencia de calor (U), coeficientes de convección (h) y conductividades.

a) Cálculo de coeficiente hormigón aire global de transferencia de calor.

$$\mu_{Hormigon-aire} = \frac{1}{\frac{1}{h_{interior}} + \frac{Pared_{espesor}}{K_{hormigon-armado}} + \frac{1}{h_{exterior}}}$$

Ecuación 12. Cálculo de coeficiente hormigón aire global de transferencia de calor.

Siendo.

$$h_{interior}: 45 \frac{w}{m^2k}, \text{ coeficiente de convección interior.}$$

⁴² Las tuberías de polietileno, también conocido por su abreviatura PE, son las más extendidas en su uso para los sistemas de riego, principalmente en red secundaria para instalaciones agrícolas.

⁴³ Las tuberías de polietileno reticulado (PE-Xa) Pexgol tienen muchas características que las convierten en una alternativa excelente y rentable comparadas a tuberías de otros materiales: Excelente resistencia química y a la corrosión (agentes químicos, lodos, materiales tóxicos, materiales radiactivos).

$h_{exterior}: 1.37 \frac{W}{m^2k}$, coeficiente de convección exterior.

Espesor de pared: 0.3 m

$K_{hormigon-armado}: 2.4 \frac{W}{m^2k}$, coeficiente de conductividad de hormigón armado.

Área digestor 1: 1,904.28 m². Ver Tabla 24

$$\mu_{Hormigon-aire} = \frac{1}{\frac{1}{45 \frac{W}{m^2k}} + \frac{0.3}{2.4 \frac{W}{m^2k}} + \frac{1}{1.37 \frac{W}{m^2k}}} = 1.14 \frac{W}{m^2k}$$

b) Cálculo de pérdidas por transferencia de calor al medio ambiente.

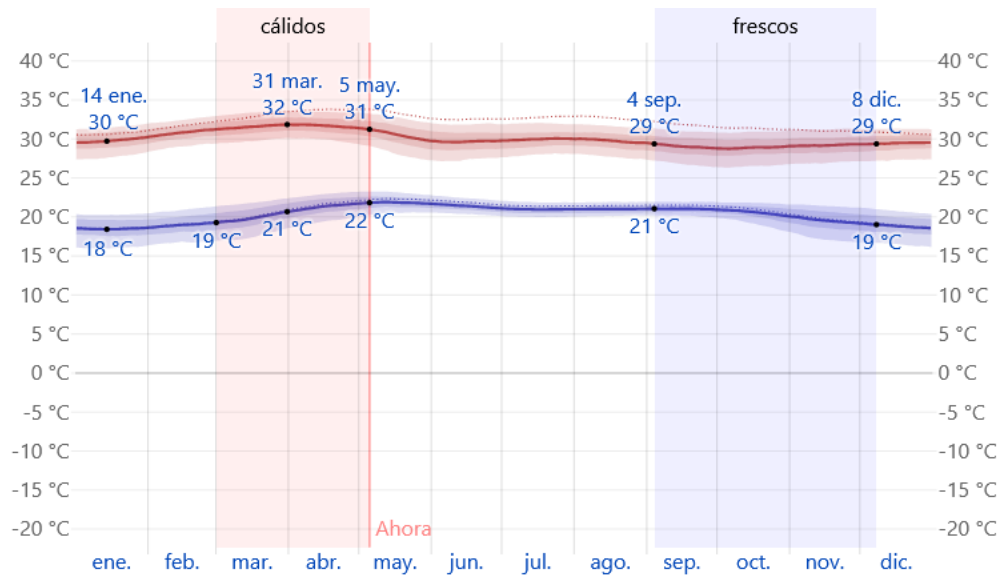


Figura 31. Temperatura promedio en Ciudad Arce. La temporada calurosa dura 2,1 meses, del 1 de marzo al 5 de mayo, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 30 °C. fuente: <https://es.weatherspark.com/y/12271/Clima-promedio-en-Ciudad-Arce-El-Salvador-durante-todo-el-a%C3%B1o>

$$Q_{ambiente \text{ 1er BD}} = \mu_{hormigon-aire} * A_{digestor} * (Temp_{interior} - Temp_{ambiente})$$

Ecuación 13. Pérdidas de temperatura por transferencia calor al medio ambiente.

Siendo.

Temperatura interior del digestor: 31°C

Temperatura ambiente: 30°C

Temperatura mínima: 18°C

Temperatura mínima del suelo: 5°C

Pérdidas por transferencia de calor al medio ambiente del primer digestor.

$$Q_{\text{ambiente 1er BD}} = 1.14 \frac{W}{m^2k} * 1,904.28m^2 * (31 - 30)^\circ C = 2,170.88 W$$

c) Pérdidas de calor al suelo del primer digestor.

$$Q_{\text{suelo 1er BD}} = \mu_{\text{hormigon-suelo}} * A_{\text{digestor}} * (Temp_{\text{interior}} - Temp_{\text{suelo}})$$

Ecuación 14. Pérdidas de temperatura por transferencia calor al suelo.

Siendo:

$$\mu_{\text{Hormigon-suelo}} = 1.3956 \frac{W}{m^2k}$$

Temperatura del suelo: $Temp_{\text{interior}} - Temp_{\text{amb-min}}$

Temperatura interior del digestor: $31^\circ C$

Temperatura mínima: $18^\circ C$

Determinar el área del cilindro y la temperatura del suelo que estará en contacto con la superficie.

$$A_{\text{cilindro}} = 2\pi rh + 2\pi r^2 [m^2]$$

Ecuación 15. Cálculo del área del cilindro.

$$A_{\text{radio inferior-cilindro}} = \pi r^2 [m^2] = \pi(13.5)^2 = 572,55 m^2$$

Temperatura del suelo

$$T_{\text{suelo}} = Temp_{\text{interior}} - Temp_{\text{amb-min}}$$

$$T_{\text{suelo}} = 31^\circ C - 18^\circ C = 13^\circ C$$

Pérdidas por transferencia de calor al suelo del primer digestor.

$$Q_{\text{suelo 1er BD}} = 1.3956 \frac{W}{m^2k} * 572,55 m^2 * (31 - 13)^\circ C = 14,382.91W$$

d) Pérdidas totales en el primer biodigestor.

$$Q_{\text{Total 1er BD}} = Q_{\text{amb}} + Q_{\text{suelo}} = (2,170.88 + 14,382.91)W = 16,553.8W$$

3.3.1. Pérdidas por transferencia de calor en segundo digestor.

a) Pérdidas de calor de la cubierta al exterior

Siendo:

$$\mu_{cubierta} = 1.186 \frac{W}{m^2k}$$

$h_{interior}$: $9.36 \frac{W}{m^2k}$, coeficiente de convección interior.

$h_{exterior}$: $9.36 \frac{W}{m^2k}$, coeficiente de convección exterior.

Espesor de membrana: 0.003 m

K_{HDPE} : $0.5 \frac{W}{m^2k}$, coeficiente de conductividad.

Área cubierta digestor 2: 2,032.36 m². Ver Tabla 25

Temperatura interior del digestor: 31°C

Temperatura ambiente: 30°C

Temperatura mínima: 18°C

Transferencia de calor de la cubierta al exterior del segundo digestor.

$$Q_{cubierta} = 1.186 \frac{W}{m^2k} * 2,032.36 m^2 * (31 - 30)^\circ C = 2,410.38 W$$

b) Pérdida de calor de los laterales al exterior o medio ambiente.

$$Q_{ambiente\ 2do\ BD} = \mu_{hormigon-aire} * A_{lateral-digestor} * (Temp_{interior} - Temp_{ambiente})$$

Siendo.

Temperatura interior del digestor: 31°C

Temperatura ambiente: 30°C

Temperatura mínima: 18°C

$$A_{cilindro} = [(2\pi rh) + (2\pi r^2)] [m^2]$$

r : 13.5m y h : 10.46m. Ver Tabla 25

Pérdidas por transferencia de calor lateral al medio ambiente del segundo digestor.

$$Q_{lateral-amb\ 2do\ BD} = 1.14 \frac{W}{m^2k} * 887.25 m^2 * (31 - 30)^\circ C = 1,011.46 W$$

c) Pérdidas de calor al suelo del segundo digestor

Siendo:

$$Q_{\text{suelo 2do BD}} = \mu_{\text{hormigón-suelo}} * A_{r \text{ inferior}} * (Temp_{\text{interior}} - Temp_{\text{suelo}})$$

Siendo:

$$\mu_{\text{Hormigón-suelo}} = 1.3956 \frac{W}{m^2k}$$

Temperatura del suelo: $Temp_{\text{interior}} - Temp_{\text{amb-min}}$

Temperatura interior del digestor: 31°C

Temperatura mínima: 18°C

Determinar el área del cilindro y la temperatura del suelo que estará en contacto con la superficie.

$$A_{\text{cilindro}} = 2\pi rh + 2\pi r^2 [m^2]$$

$$A_{\text{radio inferior-cilindro}} = \pi r^2 [m^2] = \pi(13.5)^2 = 572,55 m^2$$

Temperatura del suelo

$$T^{\circ}C_{\text{suelo}} = Temp_{\text{interior}} - Temp_{\text{amb-min}}$$

$$T^{\circ}C = 31^{\circ}C - 18^{\circ}C = 13^{\circ}C$$

Pérdidas por transferencia de calor al suelo del segundo digestor.

$$Q_{\text{suelo 2do BD}} = 1.3956 \frac{W}{m^2k} * 572,55 m^2 * (31 - 13)^{\circ}C = 14,382.91W$$

d) Pérdidas totales en el segundo biodigestor.

$$Q_{\text{Total 2do BD}} = Q_{\text{cubierta}} + Q_{\text{lateral}} + Q_{\text{suelo}}$$

$$Q_{\text{Total 2do BD}} = (2,410.38 + 1,011.46 + 14,382.91)W = 17,804.75W$$

3.3.2. Energía térmica para el proceso de digestión

Datos:

$$C_p: 4186.8 \frac{J}{kgK}$$

$$m = 81,800 \frac{kg}{\text{día}}$$

$$T^{\circ}C_{\text{estiércol inicial}} = T^{\circ}C_{\text{amb}} = 30^{\circ}C$$

$$Q_{Proc\ digestión} = m \cdot C_{p\ estiércol} \cdot (T^{\circ}C_{Proc\ digestión} - T^{\circ}C_{estiércol\ inicial})$$

Ecuación 16. Energía térmica para el proceso de digestión.

$$Q_{Proc\ digestión} = 81,800 \frac{kg}{dia} * 4186.8 \frac{J}{kgK} * (31 - 30)^{\circ}C = 342480240 \frac{J}{dia}$$

$$Q_{Proc\ digestión} = 342480240 \frac{J}{dia} = 342.48 \frac{MJ}{dia} \left(\frac{1 kWh}{3.6 MJ} \right) \left(\frac{1 dia}{24 h} \right) = 3.96 kW$$

Calor requerido para mantener la temperatura del proceso de digestión.

$$Q_{Proc\ digestión} = 3.96 kW = 3963.88 W$$

Ver Tabla 26 para la demanda de energía térmica total que debe suministrar el sistema de calefacción a los digestores.

Tabla 26. Energía térmica requerida por el sistema de calefacción y es suministrar la unidad de cogeneración.

Descripción	Energía térmica
Pérdidas de calor por transferencia, digestor 1	16,553.8 Wth
Pérdidas de calor por transferencia, digestor 2	17,804.75 Wth
Calor requerido para la Temp. de proceso.	3,963.88 Wth
Total, de energía térmica [Wth]	38,322.43 Wth (38.3 kWth)

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Dimensionamiento de la Unidad de Cogeneración

Una vez determinada la cantidad de la producción de biogás en los biodigestores ya es posible seleccionar la unidad o unidades de cogeneración más apropiada para la planta de cogeneración en la cual se obtendrá simultáneamente energía térmica y energía eléctrica.

Los datos de partida para la selección del equipo de cogeneración son los siguientes:

- Biogás generado en digestor 1: 1,208.48 m³/día-gallinaza y 555.00 m³/día-bovino
- Biogás generado en digestor 2: 735.74 m³/día-gallinaza y 338.00 m³/día-bovino
- Demanda térmica del sistema de calefacción: 38.3 kWth (considerando la potencia térmica necesaria durante los meses más fríos del municipio de Ciudad Arce, ver Figura 31).

Como primer paso se calcula el poder calorífico interior (PCI) del biogás producido, el procedimiento se detalla a continuación:

- a) El PCI del biogás con un 65% de metano es la siguiente:

$$PCI_{biogás} = 9.94 * \%CH_4 = 9.94 * 0.65 = 6.46 \frac{kWh}{m^3}$$

Ecuación 17. Poder calorífico del biogás.

- b) Biogás disponible por excretas de animales

Gallinaza:

$$Biogás_{disponible} = (Biogas_{digestor\ 1} + Biogas_{digestor\ 2}) \text{ en } \left[\frac{m^3}{dia} \right]$$

$$Biogás_{disp-gallinaza} = (1.208.48 + 735.74) \frac{m^3}{dia} = 1,994.22 \frac{m^3}{dia}$$

Bovino:

$$Biogás_{disp-ovino} = (555.00 + 338.99) \frac{m^3}{dia} = 893.99 \frac{m^3}{dia}$$

Total de biogás disponible (excretas de gallinaza y bovina)

$$Biogás_{disponible} = (1.994.22 + 893.99) \frac{m^3}{dia} = 2,888.21 \frac{m^3}{dia}$$

- c) Cálculo de la energía primaria (química) disponible del biogás generado

$$E_{Disponible} = Biogás_{disponible} * PCI_{biogás}$$

Ecuación 18. Energía por día del biogás disponible.

$$E_{Disponible} = 2,888.21 \frac{m^3}{dia} * 6.46 \frac{kWh}{m^3} = 18,657.84 \frac{kWh}{dia}$$

De acuerdo con lo anterior, la potencia disponible del biogás es la siguiente

$$POT_{generada} = 18,657.84 \frac{kWh}{dia} * \left(\frac{1\ dia}{24h} \right) = 777.41\ kW$$

- d) Los criterios por tomar en cuenta para la selección de la unidad de cogeneración son los siguientes:

1. La unidad de cogeneración tiene que suministrar como mínimo la potencia térmica de 38.3 kWth, y así cubrir la demanda del sistema de calefacción de los digestores.
2. La cantidad de biogás producida debe ser suficiente para alimentar continuamente la demanda del equipo de cogeneración.
3. Rendimiento Eléctrico Equivalente (REE) mayor al 50%, siendo la ecuación para su calcula la que se muestra a continuación:

$$REE = \frac{E}{Q - \frac{V}{Ref H}} * 100\%$$

Ecuación 19. Cálculo del Rendimiento Eléctrico de la unidad de cogeneración.

Siendo:

E: Energía eléctrica generada.

Q: Consumo de energía primaria

V: Producción de calor útil o energía térmica

Ref H: Valor de referencia del rendimiento para la producción separada de calor de 80%

Cálculo del rendimiento eléctrico para el motor generador ECOMAX 1.5 BIO.

$$REE = \frac{125 \text{ kW}}{343 \text{ kW} - \frac{163 \text{ kW}}{0.8}} * 100\% = 89.76\%$$

Tabla 27. Cuadro de parámetros en el diseño de la planta.

	Potencia biogás	Potencia eléctrica	Pot. Térmica Calefacción	REE
Unidades	kW	kWe	kWth	%
Proyecto	777.41	208	38.3	>50%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Cuadro comparativo para selección de equipos de cogeneración.

	Potencia eléctrica	Potencia biogás	Pot. Térmica Recuperable	Eff. Eléctrica	Eff. Térmica	REE
Unidades	kWe	kW	kWth	%	%	Opción
Ecomax 1.5 Bio	125	343	163	36.4	47.4	89.76
Ecomax 2 Bio	190	493	212	38.50	42.9	83.33
Cummins 250	250	657.89	310	38.00	47.20	92.45
Jenbacher J208	335	895.72	393	37.4	43.9	82.82

Fuente: Elaboración propia con información de fabricantes de equipos.

3.5.3. Selección de la unidad de cogeneración y el consumo de biogás

Considerando las características de las tres unidades de cogeneración de la Tabla 28 se puede seleccionar la unidad más idónea a los requerimientos de la planta. Obtenemos tres posibles escenarios que se detallan a continuación.

3.5.3.1. Motor generador Ecomax 1.5 Bio

Las características de esta unidad de cogeneración. Ver Tabla 28

- Potencia eléctrica = 125 kWe < 208 kWe
- Potencia de biogás requerida: 343 kW < 777.41 kW
- Potencia térmica recuperable. 163 kWth > 38.3 kWth
- Rendimiento eléctrico (REE)= 89.76% > 50%

De acuerdo con la disponibilidad de potencia de biogás (777.41 kW), da la posibilidad de emplear dos unidades Ecomax 1.5 Bio de 343 kW (2x343 =686 kW), una unidad cubrirá un 60% de la potencia eléctrica demandada por las instalaciones en la granja (208 kWe), todo con un rendimiento mayor al 50 % por cada unidad. Todos los excedentes de biogás (91.41 kW) se tendrían que destinar para otros procesos o ventilar el biogás a través de la antorcha de emergencia.

3.5.3.2. Motor generador Ecomax 2 Bio

Las características de esta unidad de cogeneración. Ver Tabla 28

- Potencia eléctrica = 190 kWe < 208 kWe
- Potencia de biogás requerida: 493 kW < 777.41 kW
- Potencia térmica recuperable. 212 Kwth > 38.3 kWth
- Rendimiento eléctrico (REE)= 83.33% > 50%

Según la disponibilidad de potencia de biogás (777.41 kW), se emplear una unidad Ecomax 2 Bio (1x493 kW), la demanda de potencia eléctrica de la planta de 208 kWe no se cubre con la Ecomax 2 Bio (1x190 kWe). La demanda térmica para calefacción de 38.3 kWth del proceso de digestión es cubierta con 212 kWth. Y el rendimiento eléctrico del 50% como mínimo es cubierto por la Ecomax 2 Bio con un 83.33%, se tendría que destinar para otros procesos la potencia de biogás restante de 284.41 kW o ventilar el biogás a través de la antorcha de emergencia.

3.5.3.3. Motor generador Cummins EC-250B6

Las características de esta unidad de cogeneración. Ver Tabla 28

- Potencia eléctrica = 250 kWe > 208 kWe
- Potencia de biogás requerida: 657.89 kW < 777.41 kW
- Potencia térmica recuperable. 310 kWth > 38.3 kWth
- Rendimiento eléctrico (REE)= 92.45% > 50%

Con base a la disponibilidad de potencia de biogás (777.41 kW), se emplear una unidad Cummins EC-250B6 (1 x 657.89 kW), la demanda de potencia eléctrica de la planta de 208 kWe se cubre con la Cummins EC-250B6 (1 x 250 kW). La demanda térmica para calefacción de 38.3 kWth del proceso de digestión es cubierta con 310 kWth. Y el rendimiento eléctrico del 50% como mínimo es cubierto por la Cummins EC-250B6 con un 92.45%, se tendría que destinar para otros procesos la potencia de biogás restante de 119.52 kW o ventilar el biogás a través de la antorcha de emergencia.

3.5.3.4. Motor generador Jenbacher J208

Las características de esta unidad de cogeneración. Ver Tabla 28

- Potencia eléctrica = 335 kWe > 208 kWe
- Potencia de biogás requerida: 895.72 kW > 777.41 kW
- Potencia térmica recuperable. 393 kWth > 38.3 kWth
- Rendimiento eléctrico (REE)= 82.82% > 50%

De acuerdo con la disponibilidad de potencia de biogás (777.41 kW), no cumple con la potencia de biogás que requiere la unidad Jenbacher J208 (1 x 895.72 kW), la demanda de potencia eléctrica de la planta de 208 kWe se cubre con la Jenbacher J208 (1 x 335 kWe). La demanda térmica para calefacción de 38.3 kWth del proceso de digestión es cubierta con 393 kWth. Y el rendimiento eléctrico del 50% como mínimo es cubierto por la Jenbacher J208 con un 82.825%, la potencia de biogás restante de 118.31 kW para cubrir la potencia requerida por la unidad Jenbacher J208.

Las unidades de cogeneración que cumplen con los parámetros de la planta son Ecomax 1.5 Bio, con la opción de seleccionar dos unidades para cubrir los requerimientos. Y la Cummins EC-250B6 con una solo unidad de cogeneración que cubre la potencia eléctrica y térmica que demanda la planta, y disponibilidad en potencia de biogás cubre ambas unidades de cogeneración.

Como recomienda (Moncayo Romero, 2013), es necesario considerar que el generador que se instale sea en un 20% de mayor potencia en kWe que la calculada para el generador. Logrando de esta manera que la unidad de generación tiene más potencia para cubrir aquellos picos de demanda de energía eléctrica durante el día; considerando las horas diarias de operación.

3.5.4. Consumo de Biogás en la Cogeneración

Se estima que el sistema de cogeneración está en funcionamiento en el transcurso del año, acumulando 8,760 horas anuales, dejando aproximadamente un margen para posibles averías o labores de mantenimiento que equivale al 90% del tiempo anual. Considerando lo anterior, es primordial conocer el consumo de combustible del motor generador para calcular el de biogás necesario en términos del tiempo de funcionamiento y estimar excedentes con 7,884 días (90%).

3.5.4.1. Ecomax 1.5 Bio

Cálculo del consumo de biogás (combustible) del motor generador es el siguiente:

$$\text{Consumo}_{1.5 \text{ Bio}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{introducida}}}{\text{PCI}_{\text{biogás}}} = \frac{343 \text{ kW}}{6.461 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 53.09 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Consumo}_{1.5 \text{ Bio}} = 53.09 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{7,884 \text{ h}}{1 \text{ año}} = 418,561.56 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Con dos unidades Ecomax 1.5 Bio el motor (2) consume 837,123.12 m³ de biogás anuales.

3.5.4.2. Cummins EC-250B6

Cálculo del consumo de biogás (combustible) del motor generador es el siguiente:

$$\text{Consumo}_{\text{EC-250B6}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{introducida}}}{\text{PCI}_{\text{biogás}}} = \frac{657.89 \text{ kW}}{6.461 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 101.82 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Consumo}_{\text{EC-250B6}} = 101.82 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{7,884 \text{ h}}{1 \text{ año}} = 802,748.88 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

La Cummins EC-250B6, el motor consume 802,748.88 m³ de biogás anuales.

3.5.5. Excedente de biogás

Con la proyección de que los biodigestores funcionan durante todos los días del año, se tiene que considerar los excedentes de biogás en la planta, siendo el excedente aprovechado en otros procesos o quemado en la antorcha de emergencia.

En la Tabla 29 se detalla el biogás total producido en los dos biodigestores.

Tabla 29. Generación de biogás con excretas de gallinaza y bovino en ambos digestores.

No.	m ³ / día		m ³ / h	
Biodigestor	Gallinaza	Bovino	Gallinaza	Bovino
Biodigestor 1	1,208.48	555.00	50.35	23.12
Biodigestor 2	735.74	338.99	30.65	14.12
Total	1,944.22	893.99	81	37.24

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del excedente de biogás.

$$Biogás_{Excedente} = (Prod - Biogás_{diario} * \# \text{ día}_{año}) - consumo \text{ de } biogás_{Mot-Gen}$$

$$Biogás_{Excedente} = 2,8838.21 \frac{m^3}{día} * \frac{365 \text{ día}}{1 \text{ año}} = 1,035,946.65 \frac{m^3}{año}$$

3.5.5.1. Ecomax 1.5 Bio

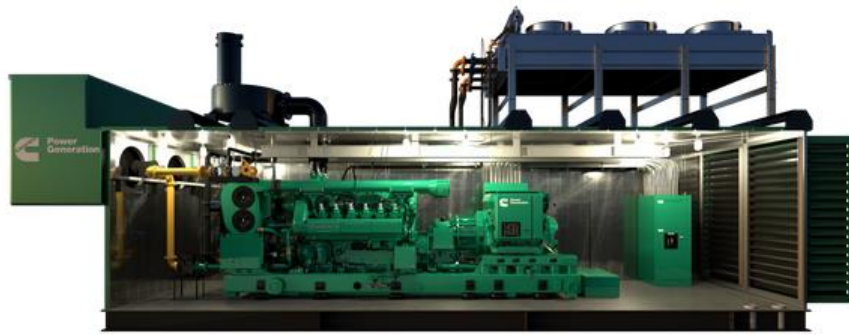
$$Biogás_{Excedente} = 1,035,946.65 \frac{m^3}{año} - 837,123.12 \frac{m^3}{año} = 198,823.53 \frac{m^3}{año}$$

La producción de biogás se cubre el consumo de la unidad de cogeneración Ecomax 1.5 Bio de 837,123.12 m³ anuales (ver sección 3.5.4.1) y el excedente es aprovechado en otros procesos o quemado en la antorcha de emergencia

3.5.5.2. Cummins EC-250B6

$$Biogás_{Excedente} = 1,035,946.65 \frac{m^3}{año} - 802,748.88 \frac{m^3}{año} = 233,197.77 \frac{m^3}{año}$$

La producción de biogás cubre el consumo de la unidad de cogeneración Cummins EC-250B6 de 802,748.88 m³ anuales (ver sección 3.5.4.2) y el excedente es aprovechado en otros procesos o quemado en la antorcha de emergencia.



*Figura 32. Generador de biogás y serie CHP ECB- Cummins EC-250B6.
Fuente: <https://www.ettesgenerator.com/products-list-biogas-power-generation-CHP.html>*



*Figura 33. Generador de biogás ECOMAX® Biogás – Ecomax 1.5 Bio.
Fuente: <https://www.gruppoab.com/ecomax/ecomax-biogas/>*

La línea constructiva de estos modulos tienen características de un producto industrial de elevadas prestaciones: no requiere obra civil, gran flexibilidad y posibilidad de reubicación, tiempos rápidos de instalación y de puesta en marcha, sencillez de interconexión con los sistemas ya existentes, reducción alta del ruido sonoro del motor generador al exterior.

Esta gama de equipos de cogeneradores, poseen una ingeniería enfocada en la valorización energética del biogás. El biogás consumido en este tipo de módulos permite producir dos vectores energéticos: energía eléctrica (para el autoconsumo o bien para cederla a la red eléctrica) y energía térmica, que puede utilizarse, por ejemplo, para el calentamiento de los biodigestores para el sistema de calefacción y para procesos vapor a través de calderas. La

valorización del biogás a través de la cogeneración es una solución innovadora y segura para conciliar eficiencia energética y protección medioambiental gracias a la utilización inteligente de la biomasa.

3.6. Antorcha de Biogás

El diseño de la planta dispone de una antorcha de emergencia a la salida del digestor 2, que se activa de forma automática mediante la apertura de una válvula cuando la presión interna de almacenamiento del biogás en el digestor es mayor al valor predeterminado, o cuando el sistema de cogeneración no está operando por motivos de fallas o mantenimiento. El exceso de biogás que el motor no necesita para su funcionamiento se eliminara mediante la antorcha. La antorcha cuenta con una cámara de combustión donde se quema el excedente de biogás. Se instala una válvula antirretorno de llama para evitar incendios, y permite variaciones tanto en el caudal del biogás como en su composición.



Figura 34. Antorcha HE y HTE de llama baja, cámara de combustión con aislamiento multicapa, encendedor de electrodo y sensor UV para detección de llama continua. Fuente: <https://www.progecosrl.com/es/antorcha-de-llama-oculta.html>

3.7. Generación de electricidad

La estimación en el consumo de energía eléctrica consumida de todas las instalaciones de la planta es de 208.00 kWe, la cual cubre áreas como: iluminación, ventilación y producción de huevos. Por lo tanto, lo anterior es la potencia eléctrica de autoconsumo y el resto el que será inyectado a la red eléctrica.

Con es puede ver en la sección 3.5.4 previa, el sistema de cogeneración estará en funcionamiento 7,884 horas anuales, sin embargo, la granja necesita electricidad los 365 días del año.

Los sistemas de cogeneración propuestos generan: 125 kWe de potencia eléctrica el Ecomax 1.5 Bio, con un total de 250 kWe con dos unidades por instalar y la Cummins EC-250B6 con 250 kWe. La producción anual de energía eléctrica por cada unidad de cogeneración es la siguiente:

Ecomax 1.5 Bio

$$Ecomax\ 1.5\ Bio = 2 * \left(125\ kW * 7,884 \frac{hrs}{año} \right) = 1,971,000.00 \frac{kWh}{año}$$

Cummins EC-250B6

$$Cummins\ EC - 250B6 = 250\ kW * 7,884 \frac{hrs}{año} = 1,971,000.00 \frac{kWh}{año}$$

Autoconsumo de energía.

$$Energía_{autoconsumo} = 208\ kW * 8,760 \frac{hrs}{año} = 1,822,080.00 \frac{kWh}{año}$$

Inyección de energía a la red.

$$Energía_{inyectada-red} = Energía_{prod} - Energía_{autocons}$$

$$Energía_{inyectada-red} = 1,971,000.00 - 1,822,080.00 = 148,920 \frac{kWh}{año}$$

Potencia eléctrica a inyección a la red.

$$POT\ eléctrica_{inyeccion-red} = 148,920.00 \frac{kWh}{año} * \frac{1\ año}{8760\ h} = 17\ kW$$

De los cálculos se obtiene una energía eléctrica inyectada a la red de 148,920.00 kWh anuales, lo que supone el 95.45% de la energía eléctrica generada en la planta cubre el autoconsumo, destinando el 7.55% restante a posible inyección a la red eléctrica.

La electricidad generada se inyecta a un transformador de la planta permitiendo el autoconsumo. Se cuantificará el ahorro en el consumo eléctrico, es decir, cuanto representa en términos económicos la electricidad que se ha dejado de consumir de la distribuidora de energía local, y los ingresos provenientes de la producción de huevos en la planta. Cuantificando los egresos que genera con proveedores de servicios, la disposición final de la biomasa y el impacto ambiental.

CAPÍTULO 4 – EVALUACIÓN ECONÓMICA

4. Desarrollo de la Propuesta Económica

Actualmente se tiene la propuesta constructiva de instalaciones de una planta industrial que albergará al Centro de Incubación y Producción de Huevo Fértil y Actividades Conexas; esta planta, como cualquier otra de su especie, generará desechos orgánicos producto de sus actividades rutinarias como aseos de patios para limpieza de excretas de aves. Para mitigar lo anterior, el proyecto también contempla la construcción de una planta anexa para tratamiento de toda la biomasa residual como desechos orgánicos, excretas de los animales que no puede ser desechada directamente, ya que supondría un grave problema ambiental a los sitios cercanos a la planta.

La planta empleará un tratamiento natural llamado anaeróbico en donde se degradará los desechos orgánicos para la obtención de biogás para su utilización en la generación de energía térmica y eléctrica para autoconsumo en la planta o en el futuro; la venta de energía eléctrica a la distribuidora de la zona.

4.1. Alcance del Proyecto

El alcance para desarrollar la propuesta empleando fuentes renovables en el diseño de un biodigestor para la producción de biogás en el centro de incubación y producción de huevo fértil y actividades conexas, parte del alcance será la evaluación técnica y económica de las principales tecnologías de biorreactores y equipos para aprovechamiento del biogás para determinar la tecnología más apropiada según el recurso avícola disponible; con el proyecto que se propone busca también la mitigación de focos de contaminación de esta agroindustria y explorar alternativas a las prácticas tradicionales de tratamiento de los desechos orgánicos de la granja avícola y la revalorización de estos. Con base a lo anterior, en este trabajo de graduación se propondrá el diseño de una planta piloto para el aprovechamiento del recurso de la biomasa proveniente de la granja avícola para la producción de biogás, producto que será empleado para la cogeneración de energía térmica y eléctrica para autoconsumo.

4.2. Descripción del proyecto

La instalación del Centro de Incubación permitirá realizar un tratamiento responsable y un aprovechamiento energético de los residuos orgánicos generados de las diferentes actividades agroindustriales, en específico aguas residuales, pollinaza y guano de las galeras de gallinas

ponedoras. Básicamente el alcance de las edificaciones a diseñar comprende, entre otros, en las áreas de oficinas administrativa, sala de ventas, caseta de control y cercos, sala de equipos eléctricos, centro de incubación, galeras avícolas, bodega de insumos y productos, platinero, casa malla, instalaciones eléctricas generales, y áreas generales.

Tabla 30. Distribución de áreas generales y consumo de energía eléctrica del proyecto.

Descripción de componentes	m ²	Energía (kWh)
Oficinas administrativas	138.70	291.10
Sala de ventas	11.30	112.53
Caseta de control	12.18	29.12
Centro de incubación	231.54	284.90
Galeras avícolas	752.88	108.02
Bodega de insumos y productos	48.89	0.28
Platinero	244.87	72
Instalaciones eléctricas generales	66.16	9

Fuente: Elaboración propia

4.3. Evaluación Económica del Proyecto

El proceso de evaluación económica y financiera nos ayudara a definir, orientar y delimitar el proceso productivo, de acuerdo con los egresos e ingresos que estos impliquen y con los objetivos planteados en este trabajo de graduación. Como la parte final de toda una secuencia de análisis de factibilidad en el proyecto, en la cual, una vez concentrada toda la información generada en los capítulos anteriores, se aplican métodos de evaluación económica que contemplan el valor del dinero a través del tiempo, con la finalidad de medir la eficiencia de la inversión total involucrada y su probable rendimiento durante su vida útil.

Previo a iniciar la producción de biogás, es necesario realizar inversiones. Se deberá desarrollar obras civiles en la infraestructura del terreno, comprar el biodigestor y el equipamiento eléctrico-mecánico, consultorías, tramites de permisos, mano de obra, etc. La vida útil del biodigestor es de 10 años aproximadamente, terminado ese periodo de tiempo deberá realizarse nuevas inversiones en el biodigestor y sus equipos auxiliares para continuar con la producción de biogás.

Se estimará un cálculo de las retribuciones que se tendrá por la venta de huevo, abono orgánico y el potencial ahorro en energía eléctrica producto del autoconsumo. Se determinará una inversión inicial, costos que incluye todos los componentes de la planta estudiados previamente

como biodigestores, tanque de alimentación, dispositivos para el desplazamiento del biogás, unidad(es) de cogeneración, sistema de recuperación de calor, instalación eléctrica, antorcha de emergencia, bombas, tuberías, válvulas de seguridad, filtros para H₂S, etc. Hay que añadir los costos de la obra civil que incluye la preparación del terreno, mano de obra y trámites de autorización previos a la construcción.

Al utilizarse el metano en la generación eléctrica, se convertirá en un combustible renovable, reemplazando el consumo de derivados del petróleo para la generación de energía en El Salvador, además el biogás o metano es auto gestionable, por su naturaleza se puede emplear en los horarios más convenientes y diferentes estados del clima para la planta de producción.

En primer lugar, se estimará un presupuesto que determinará la inversión inicial de la instalación completa de la planta de biogás, seguido del cálculo de los flujos de efectivo que considera los egresos e ingresos que tendrá la planta en un espacio de tiempo de 10 años, la retribución económica por la energía eléctrica generada por el biodigestor será la cogeneración o autoconsumo. Por simplicidad en el proceso de digestión con la materia prima, se van a tener en cuenta los ingresos provenientes del digestato obtenido, puesto que su precio de venta depende mayoritariamente de la calidad de este, obteniendo subproductos como el Biol líquido y abono orgánico; sus características y composición determinan su precio. Además de calcular los ingresos que conlleva las actividades de producción y venta de huevos.

4.3.1. Análisis Financiero

Por las condiciones de este tipo de agroindustria resulta más fácil desarrollar el estudio financiero por medio de años, cada año cuenta con una suma global del flujo de dinero, producto de los ingresos y egresos. Se introdujo información sobre flujos de dinero como ingresos por los productos avícolas, costos de operación, gastos financieros en préstamos. Para la estimación de presupuestos o la inversión inicial, se consultó a empresas especializadas en biogás; ponderado los costos de adquisición en los equipos de los biodigestores, se considera una ponderación de costos variables, debido al índice de precios al consumidor (CPI) que corresponden a las fluctuaciones del mercado.

En la Tabla 31 se detallan los rendimientos que tendrán cada producto que producirá la planta y que tomará en cuenta una curva de aprendizaje en el primer año de funcionamiento:

Tabla 31. Rendimientos de productos producidos por la planta

Producto	Rendimientos	
	Primer año	Segundo año
Producción y venta de huevo	0.45	0.95
Producción y venta de Bio Abono	0.75	0.95

Fuente: Elaboración propia

La producción general tendrá rendimientos supuestos para el primer año con un 45% y un 95% a partir del segundo año, donde estos porcentajes se irán adecuando en los siguientes años. Se consideraron ingresos de subproductos como el abono orgánico y la actividad principal la venta de huevos. Para amortizar la inversión inicial de \$1,067,374.72, los gastos financieros tendrán una tasa de descuento del 6.17% con un plazo de 10 años, Se gestionará apalancamiento financiero en la banca estatal por \$1,039,394.72, en una línea de créditos dedicada al desarrollo de proyectos de energía renovables y eficiencia energética. Y fondos propios por \$27,980.00, sumando ambos consolidamos la inversión inicial

Además, se obtendrán beneficios en impuestos fiscales de cero aranceles en la importación de equipos, retorno del impuesto al valor agregado y la depreciación de los equipos hasta un máximo de diez años según criterios del ministerio de hacienda. Exoneración del impuesto sobre la renta del 30% durante diez años.

4.3.2. Detalles de las inversiones

Previo a iniciar la producción de biogás, será necesario realizar algunas inversiones como adecuar la infraestructura del terreno, comprar el biodigestor y el equipamiento eléctrico, obra civil, etc. Dentro de apartado para acondicionar el terreno, conlleva costos desarrollar estas actividades preliminares. En la Tabla 32 se detalla la inversión para adaptar el terreno.

Tabla 32. Detalle de costos preliminares para adecuar la infraestructura del terreno

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Sub Total
Preliminares				
Limpieza de capa vegetal	Unidad	2	\$500.00	\$1,000.00
Estudio Topográfico	Global	2	\$400.00	\$800.00
Bodega	Global	1	\$450.00	\$450.00
Subtotal USD\$				\$2,250.00

Fuente: Elaboración propia

En este apartado se determinará la inversión inicial del proyecto, utilizando como fuente de información las cotizaciones con proveedores especializados en el exterior. En la tabla siguiente se detallan los costos en equipamiento.

Tabla 33. Detalle de costos para el apartado de los biodigestores.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Sub Total
Biodigestores				
Excavación y compactación	m ³	1850	\$6.00	\$11,100.00
Contracción y compactación con terraplén a NPT	m ³	1650	\$5.50	\$9,075.00
Instalación de Geomembrana en fondo, sellado e instalación	m ²	1200	\$7.20	\$8,640.00
Instalación de Geomembrana en cubierta, sellado e instalación	m ²	1650	\$8.40	\$13,860.00
Hormigón para sello hidráulico, incluye zonas de sujeción para la membrana de cubierta.	m	920	\$175.00	\$161,000.00
Platinas de sello en cubierta	m	90	\$14.40	\$1,296.00
Lecho de secado de lodos, incluye bomba de lixiviados y tuberías de retorno	m ²	400	\$12.60	\$5,040.00
Tanque de alimentación MPC en hormigón.	m ³	150	\$175.00	\$26,250.00
Canalizaciones de salidas en PVC, incluye la excavación	m ³	450	\$36.00	\$16,200.00
Red de tuberías para la captación de biogás en PE, alta densidad.	m	900	\$18.00	\$16,200.00
Subtotal USD\$				\$268,661.00

Fuente: Elaboración propia

Lista de materiales y costos del equipamiento que permitan construir el biodigestor, hacer la conducción de biogás, válvula de alivio, antorcha de emergencia, filtro de ácido sulfhídrico, reservorios de biogás, etc. Algunas cantidades variarán de acuerdo con el desarrollo del proyecto. La siguiente Tabla 34, se detalla los principales materiales y costos para cada componente:

Tabla 34. Listado de costos del equipamiento en los biodigestores.

Descripción	Unidad	Cant.	Precio Unitario	Sub Total
Equipo Mecánico				
Sistema de bombeo succión, tableros, conexiones y pozos de succión	Unidad	1	\$9,600.00	\$9,600.00
Agitadores	Unidad	2	\$35,000.00	\$70,000.00
Blower	Unidad	2	\$6,500.00	\$13,000.00
Válvula de seguridad-presión	Unidad	2	\$1,800.00	\$3,600.00
Filtros de reducción de H ₂ S (Sulfuro de hidrogeno)	Unidad	2	\$9,600.00	\$19,200.00
Antorcha, quemar biogás; incluye corta llamas y piloto	Unidad	1	\$6,000.00	\$6,000.00
Accesorios para tuberías PVC; codos, uniones y válvulas	Global	1	\$6,000.00	\$6,000.00
Fletes de equipos importados	Global	4	\$1,500.00	\$6,000.00
Limpieza y acondicionamiento final	Global	1	\$450.00	\$450.00
Pruebas y puestas en marcha de equipos	Global	1	\$2,000.00	\$2,000.00
Medidor de caudal de biogás. Vortex DN600	Unidad	1	\$260.00	\$260.00
Compresor de biogás de una etapa con un solo impulsor y una capacidad máxima de 782 m ³ /h.	Unidad	1	\$8,667.00	\$8,667.00
Los hidrociclones se utilizan en plantas de biogás para separar inclusiones sólidas del sustrato: arena, suelo, sedimentos minerales. 30m ³ /h	Unidad	0	\$98,440.00	\$0.00
Paneles eléctricos de automatización. El sistema de automatización Siemens se usa para el control automático y el monitoreo de los procesos tecnológicos en una planta de biogás, para la entrada y distribución de energía eléctrica, protección de equipos eléctricos contra sobrecargas y cortocircuitos.	Global	1	\$15,000.00	\$15,000.00
Motor generador completo, incluye sistema de calibración de biogás	250 kW	1	\$395,000.00	\$395,000.00
Disposición final de materiales de construcción sobrantes.	m ³	1300	\$3.50	\$4,550.00
Subtotal USD\$				\$559,327.00

Fuente: Elaboración propia

El detalle de costos de los equipos de transformación del biogás a energía eléctrica se requiere de la construcción de una subestación eléctrica. En la Tabla 35 se detalla el costo global de la subestación a construir, considerando para ello todos los dispositivos que garanticen la continuidad y seguridad en el suministro de la energía eléctrica. Además, incluye los trámites pertinentes con la distribuidora eléctrica del lugar.

Tabla 35. Costos de la subestación de energía eléctrica.

Descripción	Unidad	Cant.	Precio Unitario	Sub Total
Equipo Eléctrico				
SS.EE. 225 kVA, incluye tramites distribuidora Eléctrica, equipos, postes, canalizado y cables	Unidad	1	\$33,510.93	\$33,510.93
Subtotal USD\$				\$33,510.93

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 36 se detalla los costos por las consultorías previas, estas son importantes para analizar la prefactibilidad de implementar los biodigestores y aprovechar toda la biomasa que generara la planta avícola.

Tabla 36. Costos por consultorías de prefactibilidad de los biodigestores.

Descripción	Unidad	Cant.	Precio Unitario	Sub Total
Consultorías				
Estudio de factibilidad	Global	1	\$12,530.00	\$12,530.00
Permisos ambientales, tramitología con alcaldía, OPAMSS, bomberos, distribuidora de energía eléctrica, MiVi y notario.	Global	1	\$6,200.00	\$6,200.00
Manual de procesos y O&M	Global	1	\$1,500.00	\$1,500.00
Auditoría externa contable	Global	1	\$2,000.00	\$2,000.00
Asistencia y Supervisión técnica de puesta de equipos especiales.	Global	1	\$3,500.00	\$3,500.00
Subtotal USD\$				\$25,730.00

Fuente: Elaboración propia

En las tablas anteriores se consolida las partidas de inversión, considerando un margen global de un 20% como margen de los costos totales de la inversión inicial de \$ 889,478.93, un margen necesario para amortizar las fluctuaciones de futuro que tendría el mercado en la adquisición de los equipos. Con un total de \$1,067,374.72.

4.3.3. Fuentes de Financiamiento

En Tabla 37 se detalla la distribución para el financiamiento de la construcción de los biodigestores de la cual una parte se financiará con fondos propios; entre el alcance están las actividades preliminares y las consultorías, y otra parte con el financiamiento de la banca estatal. Dando cobertura a las actividades restantes.

Tabla 37. Distribución para el financiamiento de la construcción de los biodigestores.

INVERSIÓN INICIAL	\$1,067,374.72
Fondos Propios	\$27,980.00
Financiamiento - Préstamo - Bandensal	\$1,039,394.72

Fuente: Elaboración propia

Beneficio Fiscales y Depreciación en equipos de la planta

4.3.3.1. Beneficios fiscales

Beneficios de acuerdo con la LEY DE INCENTIVOS FISCALES PARA EL FOMENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD en el decreto legislativo No. 462 y en el artículo 3, literal a) y c) establece:

- a) *“DURANTE LOS DIEZ PRIMEROS AÑOS GOZARÁN DE EXENCIÓN TOTAL DEL PAGO DE LOS DERECHOS ARANCELARIOS DE IMPORTACIÓN DE MAQUINARIA, EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS DESTINADOS EXCLUSIVAMENTE PARA LABORES DE PREINVERSIÓN Y DE INVERSIÓN...”*
- c) *“LOS INGRESOS DERIVADOS DIRECTAMENTE DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA CON BASE EN FUENTE RENOVABLE, GOZARÁN DE EXENCIÓN TOTAL DEL PAGO DEL IMPUESTO SOBRE LA RENTA POR UN PERÍODO DE DIEZ AÑOS EN EL CASO DE LOS PROYECTOS DE 10 O MENOS MEGAVATIOS (MW)...”*

4.3.3.2. Depreciación:

Basados en LEY DE IMPUESTO SOBRE LA RENTA en el decreto legislativo No. 134, en relación con depreciar los equipos de la planta, el artículo 30 establece:

“Art. 30.- Es deducible de la renta obtenida, el costo de adquisición o de fabricación, de los bienes aprovechados por el contribuyente, para la generación de la renta computable, de acuerdo a lo dispuesto en este artículo.”

En la Tabla 38 se detalla la depreciación de los equipos que conforman la planta.

Tabla 38. Depreciación estimada de equipos y maquinaria

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Sub Total	Fecha Deprec.		Activos	Años			
					Inicio	Final			Periodos-Años	Deprec. Anual	Deprec.
Equipos Biogás											
Motor generador completo, incluye sistema de caibración de biogás, 250 kW	Global	1	\$395,000.00	\$395,000.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$391,708.33		\$3,291.67
Antorcha de combustión cerrada ambiental, Gas biológico, antorcha de biogás, incluye corta llama y piloto	Unidad	1	\$3,980.00	\$3,980.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$3,946.83		\$33.17
Filtros de reduccion de H ₂ S (Sulfuro de hidrogeno)	Unidad	2	\$9,600.00	\$19,200.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$19,040.00		\$160.00
Sistema de bombeo succión, tabletos, conexines y pozos de succion	Global	1	\$9,600.00	\$9,600.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$9,520.00		\$80.00
Agitadores	Unidad	2	\$35,000.00	\$70,000.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$69,416.67		\$583.33
Blower	Unidad	2	\$6,500.00	\$13,000.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$12,891.67		\$108.33
Valvula de seguridad-presión	Unidad	2	\$1,800.00	\$3,600.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$3,570.00		\$30.00
Medidor de cuadal de biogas. Vortex DN600	Unidad	1	\$260.00	\$260.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$257.83		\$2.17
Compresor de biogás de una etapa con un solo impulsor y una capacidad máxima de 782 m ³ /h.	Global	1	\$8,667.00	\$8,667.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$8,594.78		\$72.23
SS.EE. 225 kVA, incluye tramites dist. Electrica, equipos, postes, canalizado y cables	Global	1	\$33,510.93	\$33,510.93	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$33,231.67		\$279.26
Paneles eléctricos de automatización. El sistema de automatización Siemens se usa para el control automático y el monitoreo de los procesos tecnológicos en una planta de biogás, para la entrada y distribución de energía eléctrica, protección de equipos eléctricos contra sobrecargas y cortocircuitos.	Global	1	\$15,000.00	\$15,000.00	1/8/2024	1/8/2034	10	9.9	\$14,875.00		\$125.00
TOTAL DEPRECIACION ANUAL									\$57,181.79		

Fuente: Elaboración propia

La depreciación es el reconocimiento racional y sistemático del costo de los bienes, distribuido durante su vida útil estimada. Indica el monto del costo o gasto, que corresponde a cada periodo fiscal. Se distribuye el costo total del activo a lo largo de su vida útil al asignar una parte del costo del activo a cada periodo fiscal.

Valor residual: Valor de liquidación de instalaciones y equipo.

Vida útil: La vida útil de un activo fijo es definida como la extensión del servicio que la empresa espera obtener del activo. La vida útil puede ser expresada en años, unidades de producción, kilómetros, horas, o cualquier otra medida.

4.3.4. Apalancamiento financiero

Actualmente la banca local trabaja en la innovación de productos financieros vinculados a energías renovables y eficiencia energética con fondos disponibles para proyectos de autoconsumo y cogeneración renovable. En el segmento de la planta, destaca que el monto máximo a financiar en proyectos de autoconsumo hasta 2 MW y eficiencia energética es de US\$2 millones y que como condiciones generales tiene una tasa de 3.17% con una intermediación del 3% con un periodo de gracia de hasta 2 años, en un plazo de hasta 20 años. Dentro de las tecnologías elegibles se encuentran la biomasa y el biogás. Entre otras como la solar térmica y la solar fotovoltaica.

En la Tabla 37 se detalla la cantidad de dinero con la modalidad de financiamiento requerido para la construcción de la planta, el monto, esta será gestionado con la banca local. La Tabla 39 describe el monto solicitado, la tasa de interés, los años plazo del financiamiento y la cuota a pagar.

Tabla 39. Monto para financiar y sus condiciones de pago.

BANCA LOCAL - FINANCIAMIENTO	
Monto para financiar	\$1,039,394.72
Tasa de interés	3.17%
Tasa de intermediación	3.00%
Total tasa de interés	6.17%
Plazo de financiamiento (años)	10
Periodo de gracia (años)	2
Cuota para pagar (10 años)	\$142,360.04

Fuente: Elaboración propia

La cuota global por cada año es de \$142,360.04, la cuota mensual corresponde a \$11,628.35. En la Tabla 40 se detallan las amortizaciones que se realizan durante un plazo de 10 años. Estos créditos surgen como respuesta a la necesidad de promover soluciones asequibles y no contaminantes alineadas al ODS 7⁴⁴ y generar dinamismo en el mercado.

⁴⁴ El Objetivo 7 pretende garantizar el acceso a una energía limpia y asequible, clave para el desarrollo de la agricultura, las empresas, las comunicaciones, la educación, la sanidad y el transporte.

Tabla 40. Amortizaciones del financiamiento en un lazo de diez años.

No. año	Cuota	Interés	Capital	Saldo
				1,039,394.72
1	\$142,360.04	\$ 64,130.65	\$78,229.39	\$961,165.33
2	\$142,360.04	\$ 59,303.90	\$83,056.14	\$878,109.19
3	\$142,360.04	\$ 54,179.34	\$88,180.71	\$789,928.48
4	\$142,360.04	\$ 48,738.59	\$93,621.46	\$696,307.02
5	\$142,360.04	\$ 42,962.14	\$99,397.90	\$596,909.13
6	\$142,360.04	\$ 36,829.29	\$105,530.75	\$491,378.38
7	\$142,360.04	\$ 30,318.05	\$112,042.00	\$379,336.38
8	\$142,360.04	\$ 23,405.05	\$118,954.99	\$260,381.39
9	\$142,360.04	\$ 16,065.53	\$126,294.51	\$134,086.88
10	\$142,360.04	\$ 8,273.16	\$134,086.88	\$0.00
	\$1,423,600.42	\$384,205.71	\$1,039,394.72	

Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Egresos económicos de la planta

4.3.5.1. Costos operativos

La planta deberá recurrir a costos operativos como personal técnico para la operación y mantenimiento, considerando estos costos directos y consolidados de forma anual. Las áreas de operación y mantenimiento de la planta requieren de recurso humano. Incluye personal técnico, de seguridad y limpieza. Recurso humano necesario para la buena gestión de la planta. En la Tabla 41 se detallan los supuestos costos administrativos.

Tabla 41. Detalle de gastos administrativos

Cargo	Sueldo	Cant.	\$/mes	No. Meses	\$/año
Agente de limpieza 1	380	1	380	12	4560
Seguridad 1	350	2	700	12	8400
Técnico O&M	600	2	1200	12	14400
Total de COSTOS ADMINISTRATIVOS			\$ 8,070.00		\$ 27,360.00

4.3.5.2. Costos de Operación y Mantenimiento.

Finalmente se deben tener en cuenta los costes totales de operación y mantenimiento anuales de la planta de biogás. Basándose en datos ofrecidos por la Tabla 42 y la Tabla 43, estos costes ascienden a aproximadamente \$29,600.00 anuales. Esta inversión permitirá el funcionamiento óptimo de todos los componentes que conforman la planta, logrando que todas las actividades productivas de planta se desarrollen de forma ininterrumpida, entre ellas la más importante la cogeneración de energía eléctrica. Contemplando únicamente paros por mantenimientos programados durante el año.

En la Tabla 42 se detallan los supuestos costos de operación y mantenimientos.

Tabla 42. Detalle de operación y mantenimientos

Descripción	\$/unit	No. Meses	\$/año
Mantenimiento electromecánico	250	4	1000
Mantenimiento a Generador	700	3	2100
Mantenimiento Equipo Térmico	700	2	1400
Equipos auxiliares	250	4	1000
Servicios laboratorios	450	3	1350
Total de costos de O&M			\$ 6,850.00

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 43 se detallan costos externos, estos son parte de la partida de gastos de operación y mantenimientos.

Tabla 43. Detalle de costos externos.

Descripción	\$/Unit	No. Meses	\$/año
Pago de agua potable	100	12	1200
Impuestos municipales	40	4	160
Funcionamiento de estructuras MT en Municipio.	40	1	40
Total costos de pagos externos			\$ 1,400.00

Fuente: Elaboración propia

Resumiendo, los costos de operación y mantenimientos es \$6,850.00, y los costos por pagos externos que la planta realizará será de \$1,400.00, que consolidado correspondiente a \$8,250.00.

4.3.6. Ingresos económicos de la planta

Dentro de la actividad principal de la planta se tiene la producción y venta de huevo, el desarrollo de estas actividades a escala produce una cantidad de biomasa. Esta biomasa se convertirá en la materia prima para la planta de biogás, donde el biogás generado será acondicionado para transformarlo en energía eléctrica y térmica. La planta biogás genera ingresos económicos por la cogeneración de energía eléctrica y térmica, además de la venta de bio abonos orgánicos. Todos estos ingresos económicos mensuales, son una garantía relativa, de solvencia ante los egresos que constituyen la creación de la planta.

4.3.6.1. Ingresos Por La Venta De Huevo

Se establece que una gallina ponedora produce 300 huevos al año, iniciando su ciclo productivo a las dieciséis semanas, también se establece que el formato de venta será en cartones de 20 unidades; costo del cartón (acorde al mercado actual) de huevo jumbo de \$3.70 USD.

Dentro del primer año de funcionamiento se establece una eficiencia en la producción del 45%, este porcentaje está asociada a la curva de aprendizaje; vinculado con todas las etapas de producción de huevo.

En la Tabla 44 se detalla que el año de producción está compuesto de 3 periodos, cada periodo de cuatro meses consolidando tres cuatrimestres, donde el número de gallinas ponedoras inicial es de 2000 ejemplares en el primer cuatrimestre y los subsiguientes cuatrimestres el número de ejemplares será el doble del último cuatrimestre. En la Tabla 45 detalla un aumento de forma exponencial la producción de huevos y su respectiva venta para el segundo año.

Tabla 44. Producción y venta de huevos en el primer año.

Periodo de tiempo (primer año)	Gallinas	Prod/huevos	No. Cartón	\$ Total
1er Cuatrimestre, No de gallinas	2000	600000	30000	\$111,000.00
2do Cuatrimestre, No de gallinas	4000	1200000	60000	\$222,000.00
3er Cuatrimestre, No de gallinas	8000	2400000	120000	\$444,000.00
Total ingresos al año (100%)				\$777,000.00
Porcentaje pleno de ingresos al año (Venta de huevo) 45%				\$349,650.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Producción y venta de huevos en el segundo año.

Periodo de tiempo (2do. año)	Gallinas	Prod/huevo	No. Cartón	\$ Total
1er Cuatrimestre, No de gallinas	8000	2400000	120000	\$444,000.00
2do Cuatrimestre, No de gallinas	16000	4800000	240000	\$888,000.00
3er Cuatrimestre, No de gallinas	32000	9600000	480000	\$1,776,000.00
Total ingresos al año (100%)				\$3,108,000.00
Porcentaje pleno de ingresos al año (Venta de huevo) (95%)				\$3,108,000.00

Fuente: Elaboración propia

4.3.6.2. Ingresos por la venta de Bio Abonos

Con la construcción de la planta de biogás, que se traduce en una forma de revalorizar toda la materia orgánica residual que produce la producción de huevos y sus productos anexos, donde cada etapa de la digestión anaeróbica genera lodos efluentes que salen de los biodigestores y se define por su aporte de elementos minerales, especialmente nitrógeno. Como subproducto después de la generación de biogás, se obtiene una materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales. En función a la carga usada (biomasa residual) y sus procesos de

transformación, esta materia orgánica, también conocida como bioabono puede presentarse de dos formas: líquida y sólida

Biofertilizante en forma líquida: proveniente de digestores continuos con una alta tasa de carga y un bajo contenido de sólidos totales (inferior al 12 %), el inconveniente de éste es su comercialización por el estado físico de su presentación.

Biofertilizante en forma sólida: proveniente de digestores con buen poder fertilizante, que luego de ser secado se puede comercializar sin problemas.

En general todos los productos orgánicos obtenidos, independientemente del proceso utilizado para su estabilización, son buenos acondicionadores o mejoradores de las propiedades físicas de los suelos, porque aportan niveles interesantes de materia orgánica estabilizada. Resaltando un fertilizante orgánico-mineral que contiene sales solubles con elementos nutrientes (*N, P, K, Ca, Mg*).

Este fertilizante conlleva ingresos económicos a la planta, como resultado de su adecuada comercialización en la Tabla 48 se detalla los ingresos resultantes de los cuatrimestres, considerando el primer año con una efectividad en el proceso del 75%. Donde el tiempo de residencia y la temperatura del proceso anaerobio, determinarán la calidad orgánico-mineral de los efluentes o lodos. El formato de comercialización es una bolsa de 11.33 kg a un costo de \$2.50 (\$3.80 costo de mercado actual). Los ingresos estimados el primer año son de \$74,441.25. En la Tabla 49 se proyecta una estimación para el segundo año de \$330,535.88 con una eficiencia del 95% en el proceso.

Tabla 46. Producción y venta de Bio Abonos en el primer año.

Periduo de tiempo (primer año)	Tipo MPC	Cant/Ejm	Prod/kg	Form/venta	\$ Total
1er. Cuatrimestre, No. Digestato	Gallina	2000	53666.94	6918	\$17,295.00
	Ganado	500	24725.12		
2do. Cuatrimestre, No. Digestato	Gallina	4000	107333.88	11655	\$29,137.50
	Ganado	500	24725.12		
3er. Cuatrimestre, No. Digestato	Gallina	8000	214667.76	21129	\$52,822.50
	Ganado	500	24725.12		
Total ingresos al año (100%)					\$99,255.00
Porcentaje pleno de ingresos al año (Venta de Bio Abono) (75%)					\$74,441.25

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47. Producción y venta de Bio Abonos en el segundo año.

Periduo de tiempo (2do. año)	Tipo MPC	Cant/Ejm	Prod/kg	Form/venta	\$ Total
1er. Cuatrimestre, No. Digestato	Gallina	8000	214667.76	21129	\$52,822.50
	Ganado	500	24725.12		
2do. Cuatrimestre, No. Digestato	Gallina	16000	429335.52	40075	\$100,187.50
	Ganado	500	24725.12		
3er. Cuatrimestre, No. Digestato	Gallina	32000	858671.04	77969	\$194,922.50
	Ganado	500	24725.12		
Total ingresos al año (100%)					\$347,932.50
Porcentaje pleno de ingresos al año (Venta de Bio Abono) (95%)					\$330,535.88

Fuente: Elaboración propia

4.3.6.3. Ahorros por la Generación de Energía Eléctrica

Con la generación de biogás y transformarlo para obtener energía eléctrica, nos permitirá un ahorro significativo en los costos por energía eléctrica que consume la planta en sus operaciones diarias. La energía eléctrica producida será empelada para el autoconsumo de la planta. El aprovechamiento de la energía eléctrica generada está regulado bajo la norma de NORMA PARA USUARIOS FINALES PRODUCTORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES (UPR⁴⁵) de SIGET, del ANEXO I, ACUERDO 367-E-2017.

En la construcción de la planta, se consideran los siguientes artículos de la norma UPR:

Art. 2. Esta norma es de aplicación obligatoria en la República de El Salvador para todas las personas naturales o jurídicas, que tengan relación con la construcción, conexión, operación y control de proyectos de generación de energías renovables que se ubiquen dentro de las instalaciones de los usuarios finales y tengan como fin abastecer la demanda interna del mismo usuario.

Art. 3. El distribuidor y el usuario final productor renovable deberán entregar la información que la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones requiera, para efectos de dar cumplimiento a lo dispuesto en la Ley General de Electricidad, el Reglamento de la Ley General de Electricidad y la presente Norma.

Bajo el artículo 4 de la norma UPR, establecemos las siguientes definiciones:

Energía Renovable: *aquella que se obtiene por medio del aprovechamiento de los recursos tales como: la biomasa para el caso de la planta.*

⁴⁵ Usuario Final Productor Renovable, aquel usuario final que instala una unidad de producción de energía eléctrica basada en una fuente renovable con el único objeto de abastecer su demanda interna, y que, bajo una condición temporal y excepcional, por un período corto de tiempo podría inyectar excedentes de energía a la red de distribución eléctrica sin fines comerciales

Biomasa: utiliza como fuente de energía, la materia orgánica no fosilizada, de origen vegetal o animal, producida durante un proceso biológico, espontáneo o provocado, la cual puede usarse directamente como combustible.

Biogás: Es la misma fuente que la biomasa, pero se diferencia en que la materia orgánica se convierte en otro energético (comúnmente gas metano) para ser utilizado como fuente de energía.

La normativa UPR permite aprovechar un porcentaje de la energía eléctrica generada por medio del biogás, considerando un registro histórico en demanda de potencia y consumo de energía del suministro. La planta no cumple con un registro previo de consumo, ante este escenario la normativa contempla el artículo 8, literal b) para establecer un porcentaje del consumo total mensual y el artículo 9, literal b) donde se establece periodos de tiempo para un registro histórico de consumo de energía, ambos artículos describen lo siguiente:

Art. 8. Para garantizar que la unidad de generación que un UPR proyecta instalar, tiene por finalidad producir energía eléctrica para su propio consumo, ésta deberá cumplir las condiciones siguientes: b) La producción mensual estimada de energía de la unidad a instalar deberá ser menor (90%) que el consumo promedio mensual del suministro al que la unidad suplirá la energía.

Art 9, literal b): Cuando no se tenga a disposición registros históricos de consumo de energía o demanda de potencia, se podrá instalar un equipo analizador de energía, con la suficiente capacidad de lectura y almacenamiento de la demanda de potencia y consumo de energía del suministro. Este equipo se deberá instalar por un período mínimo de quince (15) días. La capacidad máxima para instalar de la unidad de generación se calculará considerando la demanda de potencia y/o consumo de energía registrados correctamente y proyectados para un mes.

La normativa UPR y los artículos anteriores, son la base legal para el aprovechamiento del biogás y transformarlo en energía eléctrica, esta revalorización de la biomasa generada por la planta conlleva ahorros importantes en la factura del consumo energía eléctrica que demandara la planta de biogás, las áreas administrativas y productivas. En la Tabla 48 se estima un cuadro de consumo de energía eléctrica en las áreas de la planta de forma mensual.

Tabla 48. Consumos de energía eléctrica en la planta de forma mensual.

Descripción de componentes	m ²	Energía (kWh)	Huella carbono kg-CO ₂
Sala de ventas	11.3	112.53	69.21
Caseta de control	12.18	29.12	17.91
Centro de incubación	231.54	284.9	175.21
Galeras avícolas	752.88	108.02	66.43

Descripción de componentes	m ²	Energía (kWh)	Huella carbono kg-CO ₂
Bodega de insumos y productos	48.89	0.28	0.17
Plantinero	244.87	72	44.28
Instalaciones eléctricas generales	66.16	9	5.54
Total		615.85	378.75

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 49 se estima el costo de la factura de energía eléctrica de la planta.

Tabla 49. Costos de la energía eléctrica en la planta.

Descripción	Cantidad	Unidad
Consumo de energía al día	615.85	kWh
Consumo de energía al mes	18475.50	kWh
Consumo de energía al año	221,706.00	kWh
Costo del kWh	0.21	\$ USD
Costo de la energía al día	129.3285	\$ USD
Costo de la energía al mes	3,879.855	\$ USD
Costo de la energía al año	46,558.26	\$ USD
Cantidad de GEI al año [kg CO ₂]	13,6349.20	kgCO ₂

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la sección 3.7, de este proyecto, la producción de energía eléctrica por medio del biogás se estima en 2 MWh/año. El motor generador Cummins EC-250B6 tendrá una capacidad de entregar 250 kW de potencia nominal. En la sección 3.5.4, se estima que las horas efectivas de funcionamiento del generador son de 7,884 horas. Con las horas efectivas y la capacidad de potencia de la unidad de generación, se determina la cantidad de energía eléctrica anual.

$$\text{Cummins EC} - 250\text{B6} = 250 \text{ kW} * 7,884 \frac{\text{hrs}}{\text{año}} = 1,971,000.00 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Teniendo en cuenta la demanda de energía eléctrica que requiere la planta para su operación, el costo por kWh (\$0.21) de la compañía distribuidora y cantidad de energía eléctrica anual, la generación de energía por medio del biogás representa importantes ahorros en la factura de energía eléctrica. En la Tabla 50 se describe una proyección macro de ingresos económicos por la planta de biogás, se estima en \$ 413,910.00 anuales. En la Tabla 49 se estima la demanda de energía por operación anual, con un costo de energía al año de \$ 46,558.26. Como datos preliminares, el egreso por el costo de la energía eléctrica, son aquellos gastos que realiza la

planta para obtener ingresos, estos egresos son factibles amortizarlos con ingreso económicos de la planta de biogás. La energía generada tiene por finalidad el autoconsumo, minimizando un porcentaje significativo en la compra de energía. Los excedentes de energía, se tiene previsto inyectarlos a la red de distribución bajo la modalidad de contrato de venta de energía eléctrica, la venta de energía es tendencia al mediano plazo, la cual se centra en crecimiento gradual de la planta de forma operativa y económica en su funcionamiento. Los réditos económicos conllevan a un retorno de la inversión en un plazo de 3 años, 7 meses. Datos obtenidos de un flujo de caja de la planta, este considera infraestructura, equipamiento, gastos administrativos, O&M, financieros, etc.

En la Tabla 52, detalle del flujo de caja se determinar un índice de precios al consumidor del 15%, este tendrá una incidencia en determinar año con año, un aumento de aquellos parámetros que están vinculados en operación continua de la planta en general. Afectando los egresos e ingresos económicos del proyecto.

Tabla 50. Detalle de estimación por ingresos económicos de la generación de energía a través de biogás.

Descripción / Unidad Generadora	Pot. (kW) Generador	Horas de servicio año	Energía anual (MWh)	Costo \$kWh Distribuidora	Estimación de ingresos \$USD
Cummins EC-250B6	250	7 884	1.97	0.21	413,910.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51. Cuadro resumen de estimaciones por ingresos económicos anuales de la planta en el 2do año

Descripción	Cantidad \$USD	Unidad
Ingresos por venta de huevos	2,952,600.00	\$USD
Ingresos por la venta de Bio Abono	330,535.88	\$USD
Ahorros por energía eléctrica (autoconsumo)	413,910.00	\$ USD
Total	3,697,045.88	\$ USD

Fuente: Elaboración propia

4.3.6.4. Flujo de caja estimado con la tecnología del biogás

Tabla 52. Flujo de caja estimado para la planta de biogás

AÑO DE OPERACIÓN		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
INGRESOS POR VENTAS																		
Energía	MWh	0.00	221.71	220.71	220.04	219.38	218.71	218.05	217.38	216.72	216.05	215.39	214.72	214.06	213.39	212.73	212.06	
Rendimiento de equipos Gen-biogás / año	%	100.00%	99.70%	99.40%	99.10%	98.80%	98.50%	98.20%	97.90%	97.60%	97.30%	97.00%	96.70%	96.40%	96.10%	95.80%	95.50%	
Rendimiento de equipos Gen-biogás promedio / año	%		99.85%	99.55%	99.25%	98.95%	98.65%	98.35%	98.05%	97.75%	97.45%	97.15%	96.85%	96.55%	96.25%	95.95%	95.65%	
Precio energía (Pett Resto -3%)	\$/MWh		64.00	62.08	60.22	58.41	56.66	54.96	53.31	51.71	50.16	48.65	47.20	45.78	44.41	43.07	41.78	
Precio por MWh planta de biogás	\$/MWh		128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	
Precio por MWh planta SFV	\$/MWh		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Venta de energía	\$		28,378.37	28,250.67	28,165.53	28,080.40	27,995.26	27,910.12	27,824.99	27,739.85	27,654.72	27,569.58	27,484.45	27,399.31	27,314.18	27,229.04	27,143.91	
Descuento de Tarifa base	3.00%																	
INGRESOS POR VENTAS PRODUCTOS																		
Venta de huevo	\$ USD	0.00	349,650.00	419,580.00	503,496.00	604,195.20	725,034.24	870,041.09	1,044,049.31	1,252,859.17	1,503,431.00	1,804,117.20	2,164,940.64	2,597,928.77	3,117,514.52	3,741,017.43	4,489,220.91	
Venta de abono orgánico	\$ USD	0.00	74,441.25	89,329.50	107,195.40	128,634.48	154,361.38	185,233.65	222,280.38	266,736.46	320,083.75	384,100.50	460,920.60	553,104.72	663,725.66	796,470.79	955,764.95	
Total de Ventas Productos	\$ USD	0.00	424,091.25	508,909.50	610,691.40	732,829.68	879,395.62	1,055,274.74	1,266,329.69	1,519,595.62	1,823,514.75	2,188,217.70	2,625,861.24	3,151,033.49	3,781,240.18	4,537,488.22	5,444,985.87	
TOTAL INGRESOS	\$ USD	0.00	452,469.62	537,160.17	638,856.93	760,910.08	907,390.88	1,083,184.86	1,294,154.68	1,547,335.48	1,851,169.47	2,215,787.28	2,653,345.69	3,178,432.80	3,808,554.36	4,564,717.27	5,472,129.77	
COSTOS DE OPERACIÓN																		
Costos de O&M	\$ USD	0.00	-8,250.00	-8,344.88	-8,440.84	-8,537.91	-8,636.10	-8,735.41	-8,835.87	-8,937.48	-9,040.26	-9,144.23	-9,249.38	-9,355.75	-9,463.34	-9,572.17	-9,682.25	
Costos de Administración	\$ USD	0.00	-27,360.00	-27,674.64	-27,992.90	-28,314.82	-28,640.44	-28,969.80	-29,302.95	-29,639.94	-29,980.80	-30,325.58	-30,674.32	-31,027.08	-31,383.89	-31,744.80	-32,109.87	
Costo de energía eléctrica	\$ USD	0.00	-46,558.26	-47,093.68	-47,635.26	-48,183.06	-48,737.17	-49,297.65	-49,864.57	-50,438.01	-51,018.05	-51,604.76	-52,198.21	-52,798.49	-53,405.67	-54,019.84	-54,641.07	
Costo tratamiento de D.S.	\$ USD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TOTAL COSTOS DE OPERACIÓN	\$ USD	0.00	-82,168.26	-83,113.19	-84,069.00	-85,035.79	-86,013.70	-87,002.86	-88,003.39	-89,015.43	-90,039.11	-91,074.56	-92,121.92	-93,181.32	-94,252.90	-95,336.81	-96,433.18	
INGRESOS OPERATIVOS NETO	\$ USD	0.00	370,301.36	454,046.97	554,787.93	675,874.28	821,377.17	996,182.00	1,206,151.28	1,458,320.05	1,761,130.36	2,124,712.73	2,561,223.77	3,085,251.48	3,714,301.46	4,469,380.45	5,375,696.59	
GASTOS FINANCIEROS																		
Gasto Financiero (Intereses+capital)		0.00	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	-142,360.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Depreciación Equipos		0.00	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TOTAL GASTOS FINANCIEROS		0.00	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	-199,541.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
INGRESOS DESPUES DE EBITDA		0.00	170,759.51	254,505.13	355,246.09	476,332.44	621,835.33	796,640.16	1,006,609.44	1,258,778.20	1,561,588.52	1,925,170.88	2,561,223.77	3,085,251.48	3,714,301.46	4,469,380.45	5,375,696.59	
ISR El Salvador	30%	0.00	51,227.85	76,351.54	106,573.83	142,899.73	186,550.60	238,992.05	301,982.83	377,633.46	468,476.55	577,551.26	768,367.13	925,575.44	1,114,290.44	1,340,814.14	1,612,708.98	
Impuesto Sobre la Renta (ISR)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-768,367.13	-925,575.44	-1,114,290.44	-1,340,814.14	-1,612,708.98	
Estado de resultados			170,759.51	254,505.13	355,246.09	476,332.44	621,835.33	796,640.16	1,006,609.44	1,258,778.20	1,561,588.52	1,925,170.88	1,792,856.64	2,159,676.04	2,600,011.02	3,128,566.32	3,762,987.61	
Costo de energía eléctrica		0.00	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	
Costo tratamiento de D.S.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Depreciación Equipos		0.00	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ESTADO DE RESULTADOS PROYECTADOS		-1,067,374.72	274,499.57	358,245.18	458,986.14	580,072.49	725,575.38	900,380.21	1,110,349.49	1,362,518.26	1,665,328.57	2,028,910.93	1,839,414.90	2,206,234.30	2,646,569.28	3,175,124.58	3,809,545.87	
DISCOUNTED PAYBACK - PERÍODO DE RECUPERACIÓN DESCONTADO																		
Inversión inicial		-1,067,374.72																
Flujo descontado de cada año a valor presente		-1,067,374.72	258,547.20	317,816.70	383,525.39	456,535.97	537,865.21	628,658.86	730,208.66	843,971.52	971,591.21	1,114,922.83	952,049.89	1,075,548.07	1,215,233.24	1,373,204.84	1,551,836.45	
Flujo descontado acumulado		-1,067,374.72	-808,827.51	-491,010.81	-107,485.42	349,050.56	886,915.77	1,515,574.62	2,245,783.28	3,089,754.80	4,061,346.01	5,176,268.84	6,128,318.73	7,203,866.80	8,419,100.04	9,792,304.89	11,344,141.33	
Indicador			1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

En el flujo de caja detallado en la Tabla 52 se utilizó un ISR debido a que este es aplicado por el Ministerio de Hacienda para este tipo de proyectos y debido a la potencia del proyecto de 250 kW para autoconsumo. Esto le otorga un beneficio fiscal con la exención del Pago del ISR por periodo de diez (10) años en el caso de proyectos de menos de 10 Megavatios (MW). En ambos casos aplicará a partir de la entrada en operación comercial del proyecto. El flujo acumulado del proyecto para los diez años productivos es de \$ 668,314.96, El primer año se estima un resultado con menor utilidad debido a que se determinó una curva de aprendizaje entre 45% al 85% en los rendimientos de las actividades productivas de la planta.

4.3.7. Ahorros Económicos en el Consumo de Electricidad

De acuerdo con lo establecido en la sección 3.7, el 87% del total de la energía eléctrica generada se destina al autoconsumo para el funcionamiento de la planta. Esta cantidad representa un consumo eléctrico estimado de 221,706.00 kWh/año.

El cálculo del ahorro económico en el consumo de electricidad, es decir, la electricidad que se deja de comprar a la red para satisfacer las necesidades eléctricas de la planta plantea los siguientes conceptos: la energía comprada, el cargo de potencia, y otros cargos anexos al servicio eléctrico. En primer lugar, se considera el precio del kWh de compañía distribuidora. De \$ 0.21. De este modo el precio a pagar por la electricidad se transforma potencialmente en un ahorro o retorno económico por el consumo eléctrico. Con la tarifa del kWh se estima la cantidad monetaria en concepto de ahorro anual de:

$$\text{Generación de energía eléctrica} = 250 \text{ kW} * 7,884 \frac{\text{hrs}}{\text{año}} = 1,971,000.00 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$\text{Estimación de producción (\$USD)} = 1,971,000.00 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 0.21 \frac{\$}{\text{kWh}} = 413,910.0 \frac{\$}{\text{año}} (+)$$

Pago de energía eléctrica sin la planta de biogás.

$$\text{Estimación de pago (\$USD)} = 221,706.00 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 0.21 \frac{\$}{\text{kWh}} = 46,558.26 \frac{\$}{\text{año}} (-)$$

Se tendría un ahorro anual estimado en energía eléctrica de \$ 367,351.74

Con todos los cálculos previos, el ahorro anual en el consumo de electricidad asciende a la cantidad de \$345,344.58 gracias al autoconsumo de la electricidad generada por el sistema de

cogeneración de la planta biogás, la explotación o revalorización de biomasa cada año, reduce los gastos por compra de energía eléctrica a la compañía local, y para el área financiera de la planta es un potencial ahorro.

4.4. Análisis Técnica Económica del Proyecto

Todos los residuos y desechos de origen orgánico serán empleados para la generación de energía eléctrica y térmica. El biogás que se produce a partir de la fermentación de materia orgánica en determinadas condiciones: ausencia de oxígeno (anaerobia) y un PH entre 6.5 a 7.5. es, por tanto, un producto metabólico originado por bacterias específicas como:

- **Psicrófila:** temperatura entre 15 y 25 °C. periodo de fermentación de 90 a 120 días em promedio.
- **Mesófila:** temperatura entre 25 y 45 °C. periodo de fermentación de 25 a 30 días, donde la mayoría de los sistemas actuales operan dentro de este rango.
- **Termófila:** temperaturas entre 45 y 55 °C. periodo de fermentación de 10 días aproximado.

Como resultado obtenemos el biogás con un contenido principal de:

- **Metano:** 45% y 70%
- **CO₂:** entre 25% y 40%
- **Poder calorífico:** entre 4.5 y 7.0 kWh/Nm³.

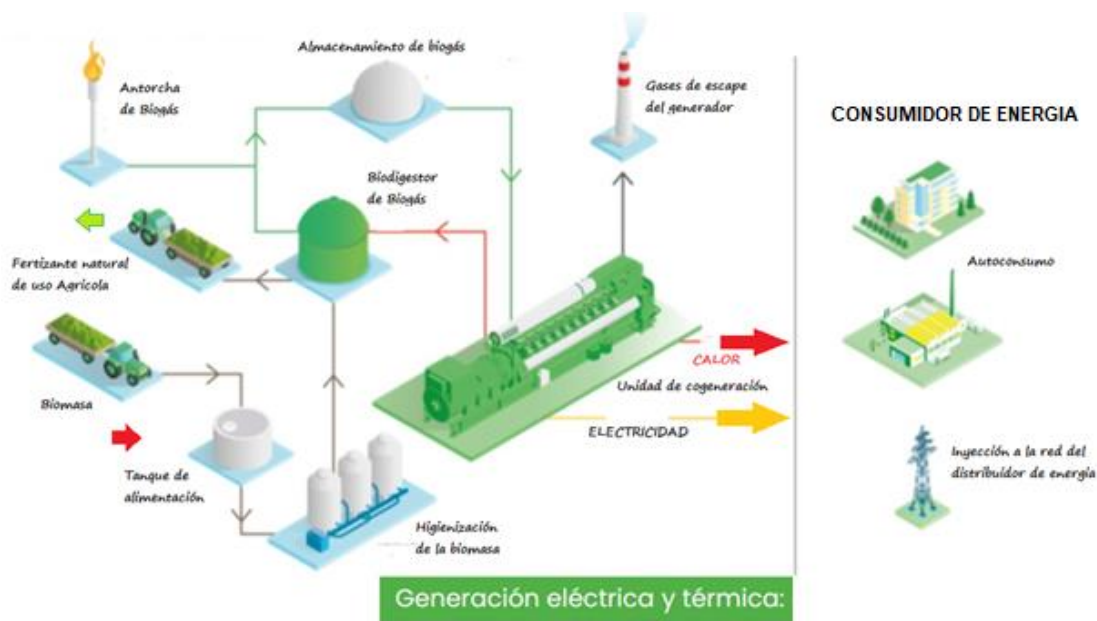


Figura 35. Distribución de las etapas de una planta de biogás (elaboración propia).

Como se describe en la sección 3.5.3, selección de la unidad de cogeneración, donde se requiere transformar de forma eficiente la energía del gas en electricidad y calor.



Figura 36. Parámetros estimados para cogeneración considerando la eficiencia en la transformación del biogás (Elaboración propia)

Se puede recuperar calor desde los sistemas auxiliares como sistema de gases de escape, de enfriamiento del motor, enfriamiento de la mezcla de aire-combustible y el sistema de enfriamiento de aceite.

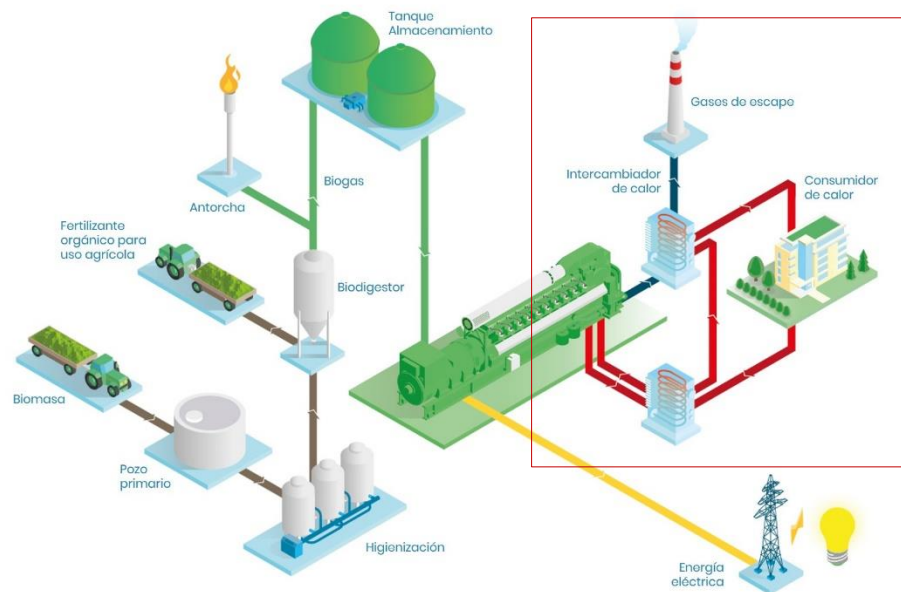


Figura 37. Aprovechamiento de los gases de escape y sistemas auxiliares para producir energía térmica (Elaboración propia).

4.4.1. Ventajas Convincentes Con la Planta de Biogás

Al invertir en la tecnología de cogeneración por medio de la planta biogás, podrá obtenerse impresionantes ventajas económicas y ecológicas al utilizar biogás para la generación de energía eléctrica y térmica, se tienen las siguientes:

4.4.1.1. Sostenibles

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (AIE), las aplicaciones ecológicas de conversión de residuos en energía contribuyen significativamente a la transición energética en la actualidad y está en sintonía con la emisión de cero emisiones de cara al 2030. Con el uso de esta biomasa que de otro modo se desperdiciarían o eliminarían a un coste elevado en su disposición final, una planta de cogeneración alimentada con biogás es mucho más económica y sostenible que las que producen energía de forma tradicional, al mismo tiempo que reduce las emisiones nocivas.

4.4.1.2. Económicas

Las centrales de cogeneración alimentadas con biogás proporcionan un rendimiento máximo total del combustible, que, combinado con un almacenamiento de gas y calor suficiente, permitirá que se pueda explotar estos activos de forma flexible y optimizar las ganancias. La planta puede poner a funcionar la central cuando los precios de la electricidad son altos y almacenar calor para compensar las diferencias en la producción y la demanda de energía térmica.

4.4.1.3. Preparados Para El Futuro

Varios países en sus mercados eléctricos han incentivado las centrales de cogeneración para cambiar de las operaciones de carga de base a las de compensación. En función de la dinámica de estas plantas hay disposiciones a nivel de país que valora esta tecnología en nuestra matriz energética, los expertos y academia han ayudado a identificar y adecuar la tecnología en las diferentes zonas de El Salvador, habitadas digitalmente bajo el concepto de la industrial 4.0 con soluciones informáticas para su tranquilidad, y adaptada a las disposiciones técnicas del mercado eléctrico.

4.4.1.4. Mayor Resiliencia

Durante los desastres naturales o causados por el hombre, los sistemas de cogeneración pueden dar apoyo a las operaciones más importantes de sus instalaciones o contener las posibles

pérdidas cuando la red eléctrica local o regional falla. Las centrales de cogeneración, equipadas con dispositivos de desacoplamiento para controlar la tensión, la frecuencia y las interrupciones cortas, proporcionan un nivel adicional de seguridad y continuidad energética. A petición, las centrales de cogeneración alimentadas con biogás pueden arrancar en “aislamiento del circuito de distribución de energía eléctrica” en caso de apagón y funcionar en modo isla.

4.4.1.5. Menos Residuos

Después de que el biogás se ha formado, el sustrato restante puede usarse como un fertilizante agrícola de alta calidad, caracterizado por un ácido neutralizado, un mayor valor de pH, nutrientes conservados y la ausencia de olor.

4.4.2. Generación de Energía Térmica

Como describe (Jenbacher, 2023) las explotaciones térmicas posibles dentro de la tecnología propia de la unidad de cogeneración, están las siguientes:

4.4.2.1. Integración Hidráulica a la Medida

Mediante variantes especiales de integración hidráulica, se permite la secuenciación flexible de las diferentes fuentes de calor de la unidad de cogeneración. Esto proporciona energía térmica a niveles de temperatura adaptados específicamente a sus necesidades, por ejemplo, en el área de incubadoras, nacedoras y criadoras de gallinas.

4.4.2.2. Sistemas de Calderas para el Almacenamiento del Calor

Combinar la planta de cogeneración con un sistema de calderas puede ayudarle a satisfacer los picos de demanda de calefacción, lo que conduce a una mayor flexibilidad y eficiencia de la planta, con la producción y el consumo de calor desacoplados.

4.4.2.3. Apoyo a los Procesos de Secado y Pre calentamiento

Las diferentes fuentes de calor de la central de cogeneración pueden utilizarse para dar apoyo a sus procesos productivos in situ como el secado o el pre calentamiento de agua sanitaria, de esterilización y de otros productos agrícolas, como el secado de bio abonos. Dependiendo de los niveles de temperatura requeridos en sus procesos, la unidad de cogeneración puede funcionar de forma independiente o ser coalimentada con otras fuentes de energía para obtener niveles de temperatura más elevados todavía.

4.4.2.4. Trigeneración para la Refrigeración

La trigeneración, o la combinación de refrigeración, calor y electricidad (CCHP), ofrece una ventaja sustancial sobre los métodos tradicionales de refrigeración. La trigeneración, una excelente solución para los sitios con requisitos de calefacción y refrigeración fluctuantes, le ofrece durante todo el año una fuente eficiente para sus necesidades de energía térmica y de refrigeración. Con un chiller de absorción conectado al sistema de cogeneración, el exceso de energía puede utilizarse para generar agua fría para el aire acondicionado.

4.4.3. Inversión Rentable

Con la transformación de la biomasa e implementar la planta alimentada con biogás, se gana desde el punto de vista económico y el medio ambiente también.

Por eso ahora, existen leyes de incentivos gubernamentales que subvencionan a las plantas de biogás actuales que proporcionan capacidades adicionales de energía a los sistemas de distribución, El caso de la planta de cogeneración de 250 kW, que funciona en carga de base permanentemente (autoconsumo) los siete días de la semana, con una demanda estimada de 326,502 kWh a la red pública, tiene los ahorros económicos calculados en la sección 4.3.7 de este documento.

La planta tiene un enfoque flexible y orientado al autoconsumo e inyectar energía a la red de distribución eléctrica, es tanto el presente como el futuro de toda planta de biogás. El diseño flexibiliza gradualmente la planta de biogás y transformarla en una minicentral eléctrica de almacenamiento renovable basada en la tecnología de cogeneración al tener mayor generación de residuos. Eso nos permite optimizar el potencial de ingresos y, al mismo tiempo, utilizar de forma óptima las materias primas o biomasa residual del proyecto. Mediante la producción de energía sostenible de la fuente de energía del biogás y funcionamiento flexible, la planta contribuye sustancialmente a la estabilidad y continuidad del consumo propio. Y de la red pública de distribución en apoyo a la transición energética.

4.4.4. Beneficios Económicos de la Planta Avícola

En la Tabla 53 se detalla las estimaciones de todos los ingresos económicos que genera la planta de biogás.

Tabla 53. Ingresos estimados de la planta en actividades principales en el 2do año

Rubro o actividad	Ingreso estimado [USD]
Venta de huevos	3,108,000.00
Venta de Bio abono	330,535.88
Ahorro por generación de energía eléctrica	367,351.74

4.4.5. PAYBACK.

El PAYBACK representa los años que serán necesarios para recuperar la inversión inicial de un proyecto. De acuerdo con el flujo de caja detallado en la Tabla 52, el periodo de recuperación de la inversión inicial es de dos años y tres meses, si el sistema de cogeneración en conjunto con las actividades principales que mantendrá la planta en un periodo de diez años.

4.4.6. VAN (Valor Actual Neto)

El VAN, o Valor Actual Neto, es un parámetro que permite valorar la rentabilidad del proyecto, actualizando a valor de hoy (tiempo actual) los flujos de caja futuros generados por la inversión inicial. El método para calcularlo es el siguiente:

$$VAN = -Inv_0 + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+r)^i}$$

Siendo:

Inv_0 : Inversión inicial

i : número de periodos

Q_i : Flujo de efectivo en cada periodo

r : tipo de interés o tasa de descuento.

Se establece un tipo de interés del 6.17% que corresponde al préstamo bancario. Considerando el estado de resultados de los proyectos de flujo de caja en la Tabla 54 y el interés del 6.17% se obtiene un VAN de \$2,817.599.04 (VAN > 0.00). Al ser positivo la rentabilidad del proyecto es superior a la tasa de interés o tasa de descuento, por lo que se puede aceptar la realización del proyecto.

4.4.7. TIR (Tasa Interna de Retorno)

Al igual que los parámetros analizados previamente, la TIR es un indicador de la rentabilidad del proyecto. Es la tasa de descuento con la que el valor actual neto (VAN) es nulo. A mayor TIR, mayor rentabilidad, por tanto, si la TIR es superior a la tasa de descuento aplicada al calcular el VAN, el proyecto es viable y se debe aceptar la inversión. En este caso la TIR es aproximadamente 21.17%, superior a la tasa de descuento aplicada al calcular el VAN (6.17%). Por tanto, se debe aceptar el proyecto, ya que su rentabilidad es mayor que la rentabilidad mínima requerida.

La fórmula para calcular el TIR es la siguiente:

$$TIR = \sum \frac{Q_i}{(1+r)^i} - Inv_0 = 0$$

Donde:

Q_i : Flujo de efectivo en cada periodo

r : Tipo de interés o tasa de descuento.

i : Número de periodos

Inv_0 : Inversión inicial

4.4.8. Relación Beneficio Costo

Esta relación ayuda a determinar la viabilidad del proyecto, con ella se puede identificar si el beneficio obtenido es mayor al costo o viceversa, bajo este enfoque, se hace la relación B/C hallada en comparación con 1, así tenemos lo siguiente:

$B/C > 1$ Indica que los beneficios superan los costes, el proyecto se acepta

$B/C = 1$ No obtiene utilidades, los beneficios son iguales a los costes.

$B/C < 1$, Indica que los costes son mayores que los beneficios, el proyecto no se acepta.

Determinaremos la relación B/C por medio de la siguiente formula

$$B/C = \frac{VAN_{proy} - Inv_0}{Inv_0}$$

La relación B/C de proyecto esta detallada en la Tabla 52 con un valor de 3.64 ($B/C > 1$), mayor que uno. Proyecto es rentable, los beneficios serán mayores que los costos de inversión.

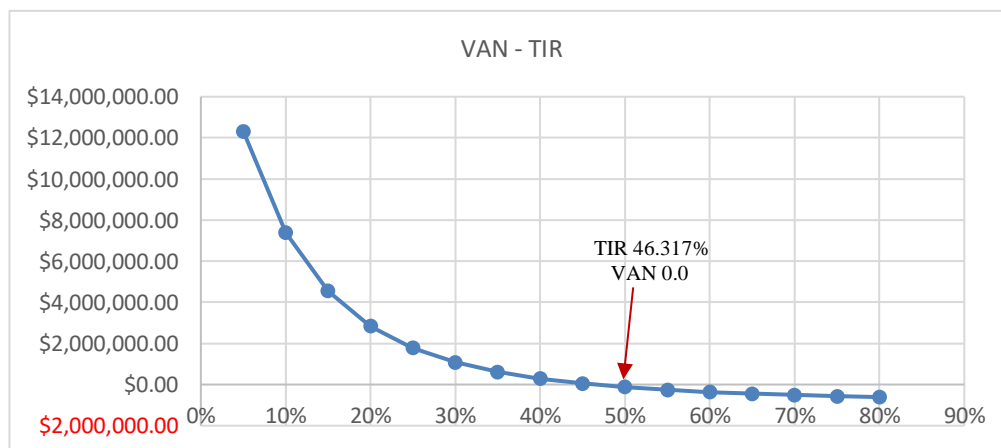


Figura 38. Representación gráfica del VAN y TIR del proyecto.

4.4.9. Análisis de Sensibilidad Financiera

Para el análisis de sensibilidad se analizaron los rendimientos y las fluctuaciones máximas y mínimas que han tenido los parámetros de evaluación como el VAN, TIR, B/C y PAYBACK. Para la estimación de la variabilidad en el monto de financiamiento y la tasa de interés, a través de representación gráfica podemos observar la interpolación de los parámetros, ver Tabla 54 y Figura 39. Empleando la Tabla 55 se compara las variaciones y los diferentes escenarios al variar el monto a financiar y la tasa de interés.

Tabla 54. Análisis de Sensibilidad Financiera

Tasa Interés	VAN	TIR	B/C	PAYBACK
	\$12,373,843.34	46.31%	12.59	3.00
0%	\$ 23,510,756.07	46.31%	23.03	3
1%	\$ 21,058,193.27	46.31%	20.73	3
2%	\$ 18,906,997.64	46.31%	18.71	3
3%	\$ 17,016,090.12	46.31%	16.94	3
4%	\$ 15,350,454.65	46.31%	15.38	3
5%	\$ 13,880,182.22	46.31%	14.00	3
6.17%	\$ 12,373,843.34	46.31%	12.59	3
7.00%	\$ 11,426,979.42	46.31%	11.71	3
9.00%	\$ 9,492,200.79	46.31%	9.89	3
11.00%	\$ 7,954,144.88	46.31%	8.45	3
13.00%	\$ 6,721,969.53	46.31%	7.30	4
15.00%	\$ 5,727,366.81	46.31%	6.37	4
17.00%	\$ 4,918,604.61	46.31%	5.61	4
19.00%	\$ 4,256,230.64	46.31%	4.99	4
21.00%	\$ 3,709,952.96	46.31%	4.48	4
23.00%	\$ 3,256,358.87	46.31%	4.05	4
25.00%	\$ 2,877,235.88	46.31%	3.70	5
27.00%	\$ 2,558,327.47	46.31%	3.40	5
29.00%	\$ 2,288,405.33	46.31%	3.14	5
31.00%	\$ 2,058,573.24	46.31%	2.93	6
33.00%	\$ 1,861,741.56	46.31%	2.74	6
35.00%	\$ 1,692,228.21	46.31%	2.59	6
37.00%	\$ 1,545,454.00	46.31%	2.45	7
39.00%	\$ 1,417,708.51	46.31%	2.33	7
41.00%	\$ 1,305,969.52	46.31%	2.22	8
43.00%	\$ 1,207,762.64	46.31%	2.13	9
45.00%	\$ 1,121,051.92	46.31%	2.05	12
47.00%	\$ 1,044,153.95	46.31%	1.98	15
49.00%	\$ 975,670.25	46.31%	1.91	15
51.00%	\$ 914,433.66	46.31%	1.86	15

Fuente: Elaboración propia

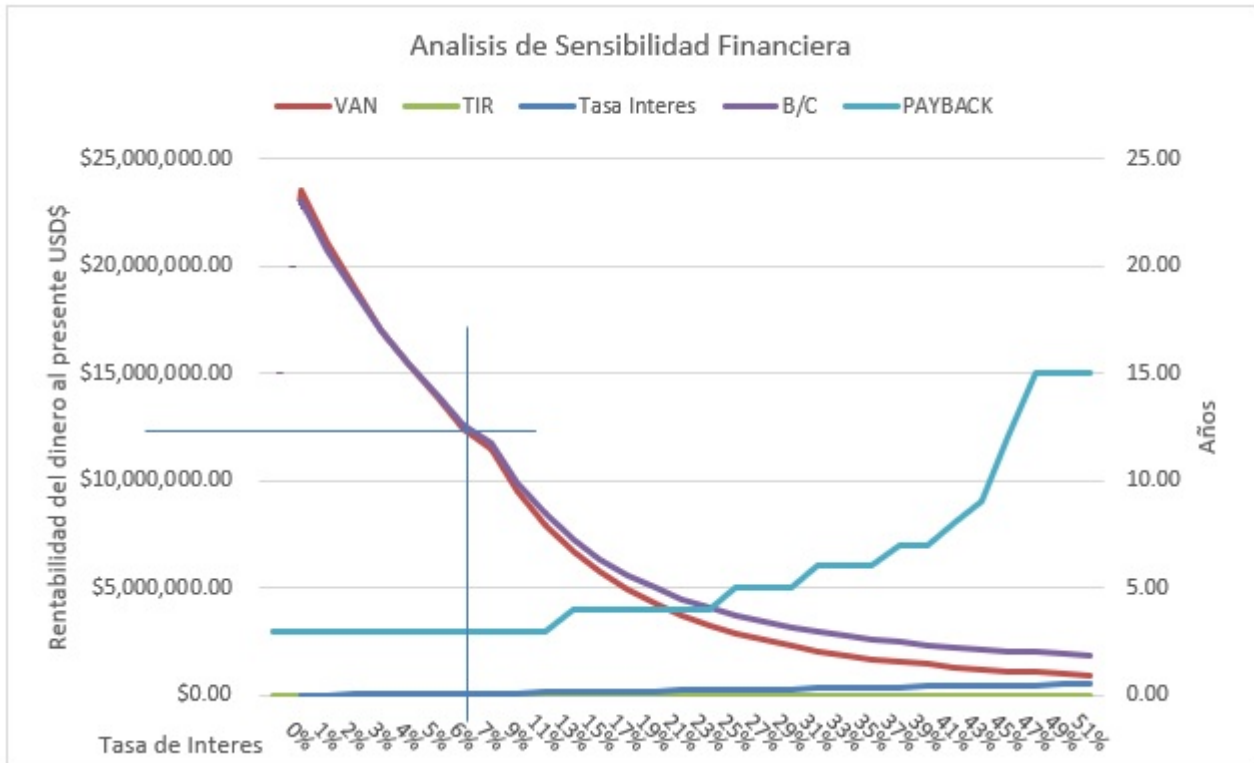


Figura 39. Análisis de Sensibilidad Financiera

Tabla 55. VAN con mínimos y máximos en montos a financiar y tasa de interés

VAN DEL PROYECTO			Financiamiento Bancario						
↓Dato ↓			70.00%	80.00%	90.00%	100%	110.00%	120.00%	130.00%
VAN DEL PROYECTO		12,373,843.34	747,162.30	853,899.77	960,637.24	1,067,374.72	1,174,112.19	1,280,849.66	1,387,587.13
Tasa de Interés	0.00%	0.00%	23,510,756.07	23,510,756.07	23,510,756.07	23,510,756.07	23,510,756.07	23,510,756.07	23,510,756.07
	25.00%	1.54%	19,856,545.10	19,856,545.10	19,856,545.10	19,856,545.10	19,856,545.10	19,856,545.10	19,856,545.10
	50.00%	3.09%	16,866,203.44	16,866,203.44	16,866,203.44	16,866,203.44	16,866,203.44	16,866,203.44	16,866,203.44
	75.00%	4.63%	14,406,734.90	14,406,734.90	14,406,734.90	14,406,734.90	14,406,734.90	14,406,734.90	14,406,734.90
	100%	6.17%	12,373,843.34	12,373,843.34	12,373,843.34	12,373,843.34	12,373,843.34	12,373,843.34	12,373,843.34
	125.00%	7.71%	10,685,348.30	10,685,348.30	10,685,348.30	10,685,348.30	10,685,348.30	10,685,348.30	10,685,348.30
	150.00%	9.26%	9,276,192.85	9,276,192.85	9,276,192.85	9,276,192.85	9,276,192.85	9,276,192.85	9,276,192.85
	175.00%	10.80%	8,094,640.45	8,094,640.45	8,094,640.45	8,094,640.45	8,094,640.45	8,094,640.45	8,094,640.45
	200.00%	12.34%	7,099,363.69	7,099,363.69	7,099,363.69	7,099,363.69	7,099,363.69	7,099,363.69	7,099,363.69
	225.00%	13.88%	6,257,205.71	6,257,205.71	6,257,205.71	6,257,205.71	6,257,205.71	6,257,205.71	6,257,205.71
	250.00%	15.43%	5,541,451.01	5,541,451.01	5,541,451.01	5,541,451.01	5,541,451.01	5,541,451.01	5,541,451.01

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Beneficio/Costo con mínimos y máximos en montos a financiar y tasa de interés.

BENEFICIO/COSTO DEL PROYECTO			Financiamiento Bancario						
↓Dato ↓			70.00%	80.00%	90.00%	100%	110.00%	120.00%	130.00%
BENEFICIO/COSTO DEL PROYECTO		12.59	747,162.30	853,899.77	960,637.24	1,067,374.72	1,174,112.19	1,280,849.66	1,387,587.13
Tasa de Interés	0.00%	0.00%	23.03	23.03	23.03	23.03	23.03	23.03	23.03
	25.00%	1.54%	19.60	19.60	19.60	19.60	19.60	19.60	19.60
	50.00%	3.09%	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80
	75.00%	4.63%	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50
	100%	6.17%	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59
	125.00%	7.71%	11.01	11.01	11.01	11.01	11.01	11.01	11.01
	150.00%	9.26%	9.69	9.69	9.69	9.69	9.69	9.69	9.69
	175.00%	10.80%	8.58	8.58	8.58	8.58	8.58	8.58	8.58
	200.00%	12.34%	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65
	225.00%	13.88%	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
	250.00%	15.43%	6.19	6.19	6.19	6.19	6.19	6.19	6.19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57. Periodo de Recuperación con mínimos y máximos en montos a financiar y tasa de interés.

PAYBACK			Financiamiento Bancario						
↓Dato ↓			70.00%	80.00%	90.00%	100%	110.00%	120.00%	130.00%
PAYBACK		3.00	747,162.30	853,899.77	960,637.24	1,067,374.72	1,174,112.19	1,280,849.66	1,387,587.13
Tasa de Interés	0.00%	0.00%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	25.00%	1.54%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	50.00%	3.09%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	75.00%	4.63%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	100%	6.17%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	125.00%	7.71%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	150.00%	9.26%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	175.00%	10.80%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	200.00%	12.34%	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	225.00%	13.88%	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	250.00%	15.43%	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

Fuente: Elaboración propia

4.4.10. Sensibilidad Financiera con Capital Propio.

La financiación propia, como capital propio del proyecto busca tener una relación de porcentajes idóneos, donde la búsqueda de financiamiento en la banca local sea factible para el banco y el proyecto. Siendo crucial estimar estos porcentajes de capital propio y del financiamiento, dado que las entidades bancarias enfocadas para este tipo de proyectos como las energías renovables y eficiencia energética. Financian entre el 70% - 80% de la inversión inicial total del proyecto.

Para su análisis se presenta la Tabla 58 , donde se detallan el comportamiento del capital propio y del financiamiento. Ver Figura 40 para su grafico-

Tabla 58. Análisis del incremento en capital propio y del financiamiento del proyecto.

Aporte de capital - Financiamiento (%)	Fondos Propios	Financiamiento
2% - 98%	\$ 27,800.00	\$ 1,556,894.71
5% - 95%	\$ 79,243.74	\$ 1,505,630.98
10% - 90%	\$ 158,487.47	\$ 1,426,387.24
15% . 85%	\$ 237,731.21	\$ 1,347,143.51
20% - 80%	\$ 316,974.94	\$ 1,267,899.77
25% - 75%	\$ 396,218.68	\$ 1,188,656.04
30% - 70%	\$ 475,462.41	\$ 1,109,412.30
35% - 65%	\$ 554,706.15	\$ 1,030,168.57
40% - 60%	\$ 633,949.89	\$ 950,924.83

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 59 detalla el comportamiento de gastos financieros de acuerdo al incremento en capital propio y la disminución en el financiamiento del proyecto. Ver Figura 41 para su gráfico.

Tabla 59. Análisis de los gastos económicos con el aumento del capital propio vs el financiamiento.

Aporte de capital - Financiamiento (%)	Cuota mes	Cuota año	Interes	Capital	I + C
2% - 98%	\$ 17,417.94	\$ 213,239.19	\$ 575,496.55	\$ 1,556,895.34	\$ 2,132,391.89
5% - 95%	\$ 16,844.42	\$ 206,217.80	\$ 556,547.01	\$ 1,505,630.98	\$ 2,062,177.99
10% - 90%	\$ 15,957.87	\$ 195,364.23	\$ 527,255.06	\$ 1,426,387.24	\$ 1,953,642.30
15% . 85%	\$ 15,071.32	\$ 184,510.66	\$ 497,963.11	\$ 1,347,143.51	\$ 1,845,106.62
20% - 80%	\$ 14,184.77	\$ 173,657.09	\$ 468,671.16	\$ 1,267,899.77	\$ 1,736,570.94
25% - 75%	\$ 13,298.22	\$ 162,803.53	\$ 439,379.22	\$ 1,188,656.04	\$ 1,628,035.25
30% - 70%	\$ 12,411.67	\$ 151,949.96	\$ 410,087.27	\$ 1,109,412.30	\$ 1,519,499.57
35% - 65%	\$ 11,525.13	\$ 141,096.39	\$ 380,795.32	\$ 1,030,168.57	\$ 1,410,963.89
40% - 60%	\$ 10,638.58	\$ 130,242.82	\$ 351,503.37	\$ 950,924.83	\$ 1,302,428.20

Nota: I+C, suma total de interés más capital, Fuente: Elaboración propia

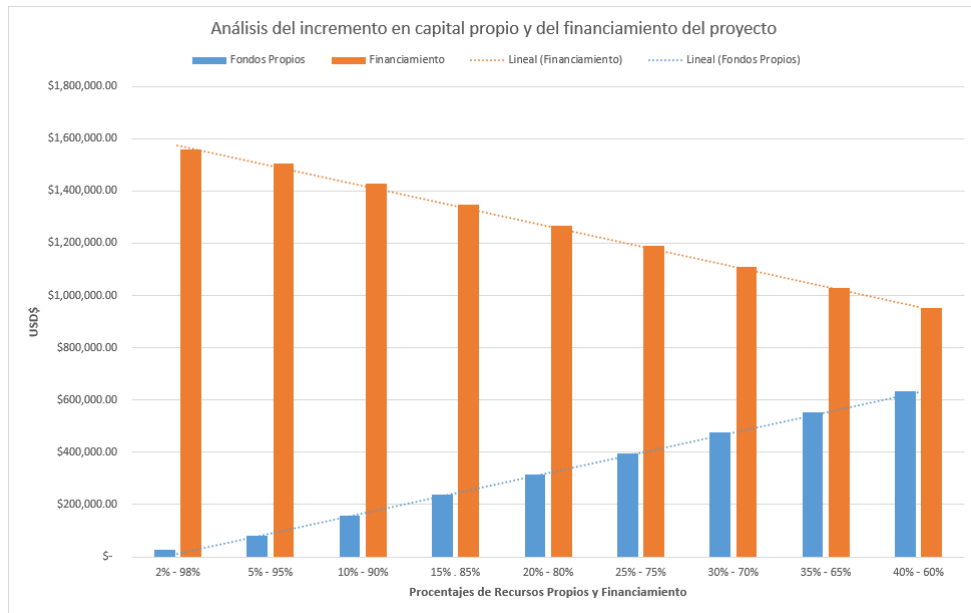


Figura 40. Detalla el comportamiento de acuerdo al incremento en capital propio y en el financiamiento

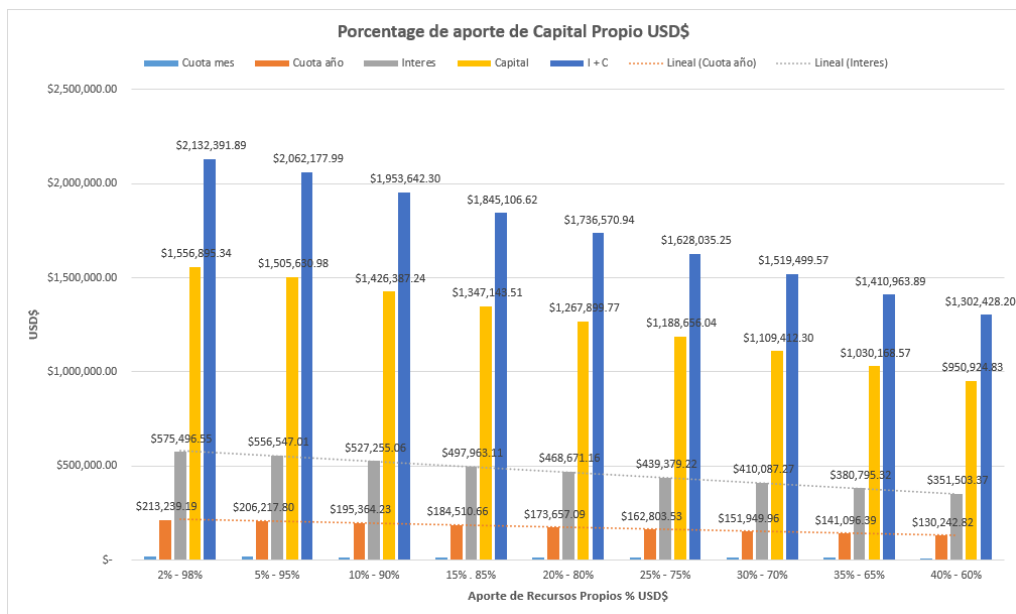


Figura 41. Detalla el comportamiento de gastos financieros acuerdo al incremento en capital.

Dentro de los indicadores económicos que se han establecidos, la Tabla 60 detalla el comportamiento de estos ante el incremento del capital propio en el proyecto. Ver Figura 42 para su respectivo gráfico.

Tabla 60. Análisis de los indicadores económicos con el aumento del capital propio.

Aporte de capital (%)	VAN	TIR	B/C	PAYBACK
2%	\$13,611,146.46	40.40%	9.59	2.11
5%	\$13,662,410.81	40.68%	9.62	2.11
10%	\$13,741,654.55	41.11%	9.67	2.10
15%	\$13,820,898.28	41.55%	9.72	2.9
20%	\$13,900,142.02	42.00%	9.77	2.8
25%	\$13,979,385.76	42.44%	9.82	2.8
30%	\$14,058,629.49	42.90%	9.87	2.7
35%	\$14,137,873.23	43.35%	9.92	2.6
40%	\$14,217,116.96	43.81%	9.97	2.5

Fuente: Elaboración propia

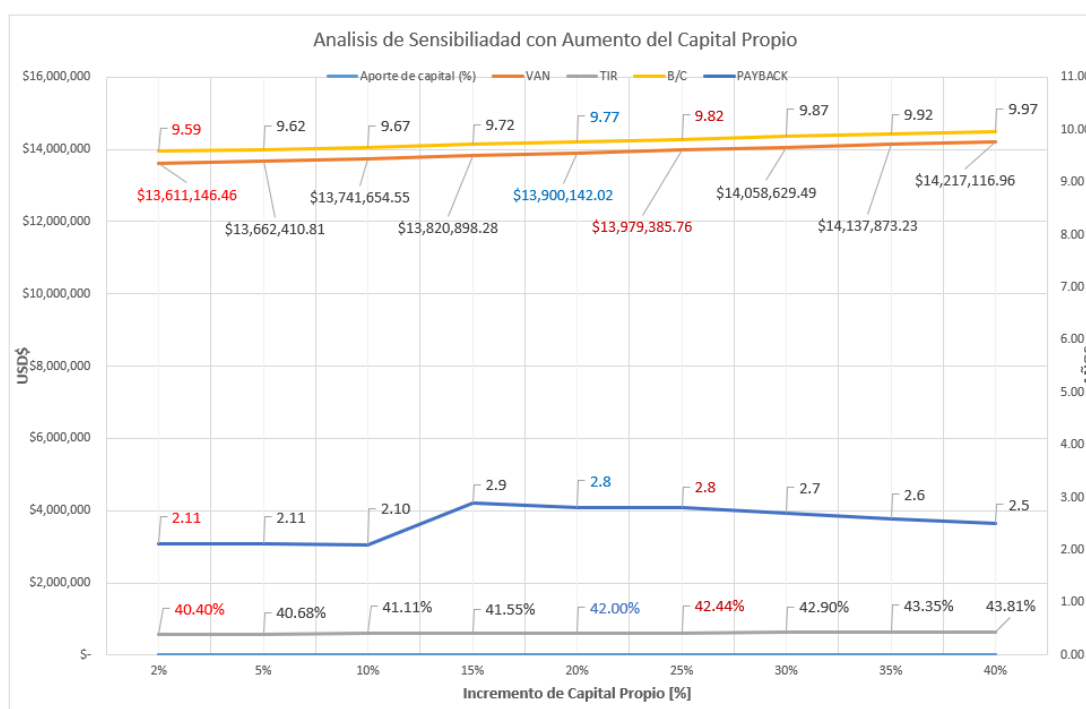


Figura 42. Análisis de Sensibilidad Financiera ante el incremento en capital propio.

Según la Figura 42, los porcentajes más adecuado de capital propio como inversión inicial en el proyecto son del 20% -25%, con ello tenemos porcentajes del 75%-80% idóneos para buscar financiamiento en la banca local. Como beneficios tenemos menos cargos por interés a pagar y el PAYBACK se mantiene debajo de los tres años para el pago del prestamos pactado a 10 años.

El área con potencial se estima en 2,784.60 m² y, empleando un software especializado para diseño, en la Tabla 61 se detalla los parámetros fundamentales que describen la factibilidad del SFV.

Tabla 61. Parámetros primarios del sistema fotovoltaico en la planta avícola.

Área potencial	2,785 m ²
Número de módulos	1008
Área de módulos	2,756 m ²
Números de inversores	6
Potencia FV nominal	575 kWp
Potencia AC nominal	450 kWCA
Ratio	1.28

Fuente: Elaboración propia

En el dimensionamiento se obtiene los siguientes resultados primarios. Detalles en la Tabla 62

Tabla 62. Resultados principales en la producción del sistema.

Energía producida	1,056,195 kWh/año	Producción específica	1,838 kWh/kWp/año
Energía usada	5,396,160 kWh/año	Producción rend. (PR)	79.84%
		Fracción solar (SF)	19.57%

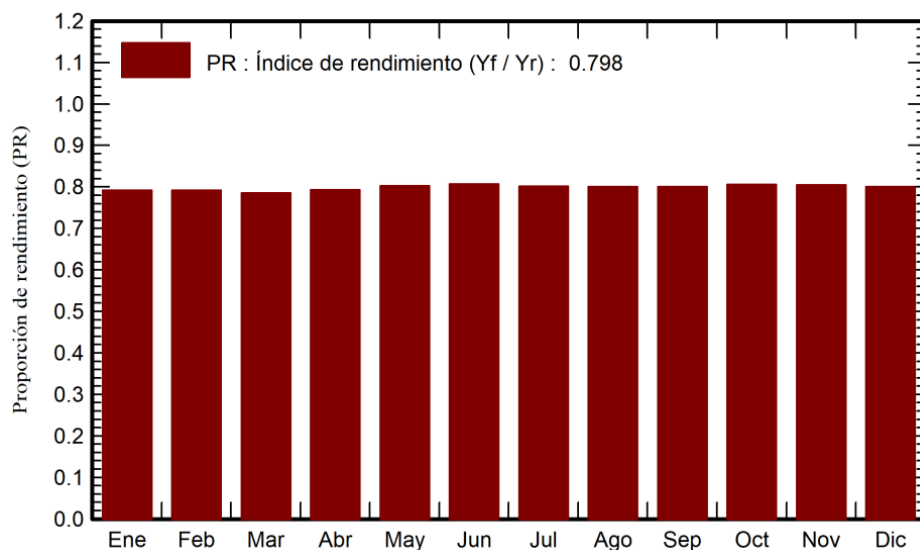


Figura 44. Proporción de rendimiento del sistema fotovoltaico

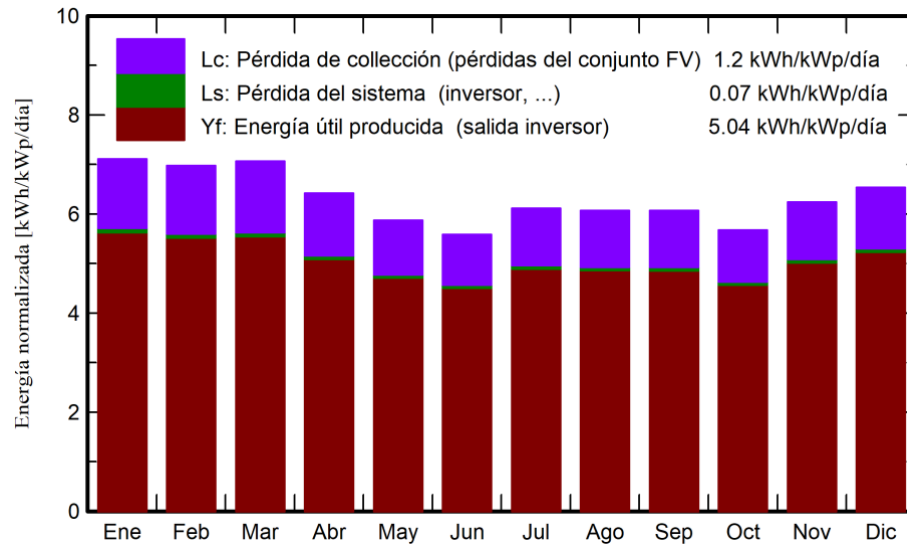


Figura 45. Producciones normalizadas (por kWp instalado)

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_User kWh	E_Solar kWh	E_Grid kWh	EFrGrid kWh
Enero	186.1	35.30	24.79	220.4	206.2	101802	458304	100344	-4.896	357960
Febrero	174.5	47.66	25.76	195.3	182.5	90102	413952	88805	-4.272	325147
Marzo	209.4	63.79	26.50	218.9	204.1	100277	458304	98832	-4.464	359472
Abril	196.8	74.27	26.56	192.7	178.6	89042	443520	87799	-4.320	355721
Mayo	195.5	79.50	26.20	182.1	168.4	85087	458304	83930	-4.452	374374
Junio	184.0	75.51	25.21	167.4	154.6	78718	443520	77673	-4.320	365847
Julio	207.2	72.10	25.99	189.4	175.0	88423	458304	87224	-4.464	371080
Agosto	196.7	72.49	25.68	188.3	174.4	87840	458304	86633	-4.464	371671
Septiembre	179.6	65.74	24.68	182.1	169.2	84941	443520	83769	-4.368	359751
Octubre	163.9	73.61	24.87	175.9	163.3	82589	458304	81479	-4.668	376825
Noviembre	162.2	52.00	24.43	187.1	174.5	87704	443520	86499	-4.680	357021
Diciembre	169.2	40.16	24.89	202.7	189.5	94590	458304	93263	-4.884	365041
Año	2225.1	752.13	25.46	2302.3	2140.3	1071117	5396160	1056250	-54.252	4339910

Figura 46. Balances y resultados principales

Leyendas:

GlobHor: Irradiación horizontal global

DiffHor: Irradiación difusa horizontal

T_Amb: Temperatura ambiente

GlobInc: Global incidente plano receptor

GlobEff: Global efectivo, corr. para IAM y sombreados

EArray: Energía efectiva a la salida del conjunto

E_User: Energía suministrada al usuario

E_Solar: Energía del sol

E_Grid: Energía inyectada en la red

EFrGrid: Energía de la red

4.5.1. Normas y Estándares de Instalación

El diseño de la planta SFV, los equipos y materiales, así como sus instalaciones, incluyendo la subestación de conexión para comercializar excedentes de electricidad, deben cumplir con las normas técnicas y legales aplicables por distribuidora local y SIGET que se encuentren vigentes en el país. Con los equipos y materiales deberán cumplir con los estándares internacionales con sus modificaciones a la fecha.

Dentro de las normativas locales vigentes y aplicable para la generación con biogás y el sistema fotovoltaico, se encuentran las siguientes normas y leyes:

- Norma para usuarios finales productores de energía eléctrica con recursos renovables, UPR ACUERDO 367-E-2017.
- Norma Técnica de Interconexión eléctrica y Acceso de Usuarios finales a la red de transmisión del SIGET.
- Ley General de Electricidad
- Reglamento aplicable a las Actividades de Comercialización de Energía Eléctrica
- Normas Técnicas de Diseño, Seguridad y operación de las Instalaciones de distribución Eléctrica.
- Estándares para la Construcción de Líneas Aéreas de Distribución de Energía Eléctrica.
- Manual de Especificaciones Técnicas de los Materiales y Equipos Utilizados para la Construcción de Líneas Aéreas de Distribución de Energía Eléctrica.
- Normas de Calidad de Servicio de los Sistemas de Distribución.
- Ley de incentivos fiscales del Ministerio de Hacienda para energías renovables alternativas.

4.5.2. Configuración de la instalación

A partir de los resultados obtenidos del software PVSyst, las características del SFV son las siguientes:

1,008 módulos fotovoltaicos policristalinos Jinko Solar JKM570M-7RL4-V de 570 Wp, con una potencia FV total de 575 kWp, que cubre un área total de 2,756 m²; la orientación de las estructuras en los techos para los MFV corresponde a 16° de inclinación y un azimut variable según se muestra el área de tocos de la figura 40. En cuanto a la configuración de los módulos

fotovoltaicos, es de 56 strings (cadenas) de 18 módulos conectados en serie, así como también seis inversores tipo string (cadenas) SUN2000-75KTL-C1, de 75 kWe de potencia nominal y 495 kWca de potencia máxima, que hacen un total de 450 kW de potencia nominal AC.

Normativas por considerar por el estructurista en la instalación de estructuras y montaje mecánico sobre los techos como: NTDS-1997 Norma Técnica para Diseño por Sismo. El Salvador (1997), Norma Técnica para Diseño por Viento (El Salvador, 1997), Aceros conformados: AISI S100-2016 (LRFD), Aceros laminados y armados: ANSI/AISC 360-16 (LRFD).

4.5.3. Generación de energía eléctrica

El sistema fotovoltaico tendrá una generación de energía de 1,056,228.00 kWh/año, la cual podrá inyectar toda la generación a la distribuirá de energía local, a través de un contrato de venta (PPA) con un estimado de \$0.13 por kWh con lo cual se tendrá un ingreso económico estimado de \$137,309.64 anuales. Por lo anterior, la planta tendrá dos sistemas de generación de electricidad, una con el biogás con 1,971,000.00 kWh/año del biodigestor y la otra con la planta fotovoltaica con 1,056,228.00 kWh/año sobre techos. Con ambos sistemas en operación, la planta tendrá una capacidad de generación eléctrica híbrido (biogás y SFV) de 3,027.228.00 kWh/año (3.02GWh/año) y un autoconsumo de energía anual de 221,706 kWh/año, lo cual deja un excedente para comercialización de 2,805,522.00 kWh/año.

4.5.3.1. Beneficios e Indicadores Económicos del Sistema Híbrido

Actualmente la planta tiene una inversión inicial de \$ 1,067,374.72 detallado en la sección 4.3.3. y la Tabla 37. Con la implementación del sistema fotovoltaico el financiamiento inicial haciende a \$1,556,894.78 (ver Tabla 63), que representa un aumento de \$ 517,500.00 respecto al inicial lo cual da un costo específico de 0.9 \$/kWp. lo cual traerá un incremento en capital e interés con la misma tasa de interés 6.17%. Adicionalmente el costo de mantenimiento anual se estima en 5.00 por kWp, lo cual da una moto de \$ 2,875.00 al año.

Con lo anterior, el análisis económico de la instalación FV queda de la manera siguiente:

Tabla 63. Distribución para el financiamiento de la construcción del sistema híbrido (Biogás/SFV)

INVERSION INICIAL	\$1,584,874.72
Fondos Propios	\$27,980.00
Financiamiento - Prestamo - Bandensal	\$1,556,894.72

El alcance económico que presenta la instalación del sistema fotovoltaico como la inversión y egresos por operación y mantenimiento serán asumidos por el flujo de caja general estimado de toda la planta avícola, reflejado en el flujo descontado de cada año a valor presente, esto tendrá una incidencia en los parámetros económicos y el análisis de sensibilidad financiera detallados en la sección 4.4.9.

El sistema fotovoltaico en forma individual presenta un flujo descontado de cada año a valor presente con un PAYBACK de 10 años y 9 meses para el repago de \$517,500.00. Considerando gastos financieros en cuotas anuales de \$70,879.00, costos por operación y mantenimiento de \$2,875.00 y como ingresos la venta de energía por \$137,309.64 en un plazo de 10 años. En el año 11 no presenta gastos por financiamiento y se inicia el pago por ISR del 30% sobre los ingresos por venta de energía; manteniendo los egresos por operación y mantenimiento.

4.5.3.2. Indicadores Económicos con El Sistema Híbrido

La planta avícola híbrida traerá beneficios económicos al integrar las dos tecnologías para producir más energía y gestionarlas de forma eficiente. Un efecto multiplicador en ingresos monetarios con el biogás auto gestionable y al aprovechar la superficie disponible en techos para la planta fotovoltaica, asegurando la cogeneración o autoconsumo en electricidad, clave de un futuro energético más sostenible y resiliente para la planta.

Con el sistema híbrido, el flujo de caja es estimado en el detalle del flujo descontado de cada año a valor presente; la planta fotovoltaica se paga en 8 meses. Previamente con la tecnología del biogás se tenía un PAYBACK de 2 años y 3 meses. El sistema híbrido genera un nuevo PAYBACK de 2 años y 11 meses. En la Tabla 64 recopila las variaciones que tienen los indicadores ante los escenarios de aplicación de un sistema híbrido y de forma individual el biogás.

Tabla 64. Variación de los indicadores económicos con un sistema híbrido de generación eléctrica.

Indicadores	Tecnología Biogás	Tecnología Híbrida	Variación
Inversión inicial	\$ 1,067,374.72	\$ 1,584,874.72	\$ 517,500.00 ↑
Tasa de Interés	6.17%	6.17%	0% =
VAN	\$ 12,821,048.04	\$ 13,611,147.02	\$ 790,098.98 ↑
TIR	49.04%	40.40%	8.64% ↓
B/C	13.01	9.59	3.42 ↓
PAYBACK	2 años, 3 meses	2 años, 11 meses	8 meses ↑

Fuente: Elaboración propia

Con la implementación del sistema híbrido, usando el biogás y el sistema fotovoltaico obtenemos un periodo de recuperación de toda la inversión inicial (\$1,584,874.72) en 2 años y 11 meses. En la Tabla 65 se detalla la factibilidad de instalar paneles fotovoltaicos en los techos idóneos de la planta avícola. Cubriendo el autoconsumo en electricidad y comercializando los excedentes con la distribuidora de energía local, trayendo beneficios económicos con efecto multiplicador, suministro energético más estable, fiable, mayor eficiencia, uso compartido de infraestructuras y mejor capacidad de adaptación a las variaciones climáticas.

4.6. Propuesta técnica del biodigestor

La metodología y los criterios de la propuesta en la implementación del biodigestor se han detallado en las secciones previas de este documento, centrándose en el potencial impacto ambiental que tiene el proyecto con las aguas residuales y residuos orgánicos que generará las actividades de producción, así como también en la revalorización de los desechos para emplearlos como biomasa para alimentar al biodigestor para la obtención de metano por medio del proceso anaeróbico. El biogás es tratado previamente para poder quemarlo en un motor generador y transformarlo finalmente en energía eléctrica y térmica de autoconsumo en las actividades productivas de la planta.

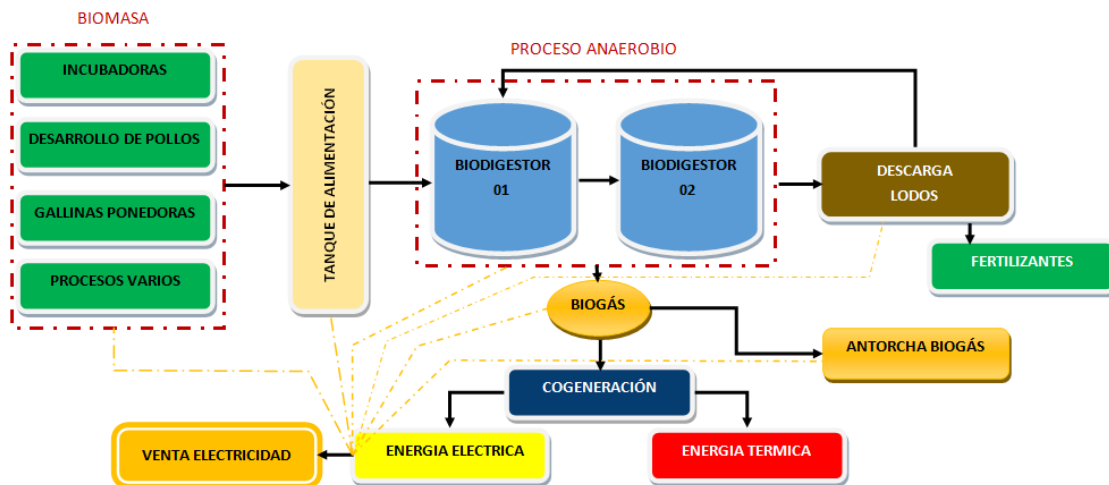


Figura 47. Esquemas de los procesos para el tratamiento biológico de la biomasa residual de la planta (Elaboración propia).

4.6.1. Evaluación del lugar para llevar a cabo la propuesta de proyecto piloto de biodigestores

Una vez realizadas las visitas de campo, se evaluó el lugar tomando en cuenta tres categorías: recursos disponibles, vulnerabilidad e información técnica. Los aspectos que se tomaron en cuenta para evaluar los recursos disponibles fueron: fuentes de agua, fuentes de agua potable, fuentes de agua no potable, distancia de las fuentes de agua no potables, energía eléctrica en la zona, acceso a internet en la zona, alianzas con otras organizaciones, acceso al lugar.

A la etapa de vulnerabilidad, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos: inundaciones, sequías, deslizamientos, incendios forestales, seguridad pública.

Etapa de la información técnica evaluada fue la siguiente: generación de excretas de gallinaza, residuos de cama avícola, excretas de ganado bovino, las aguas residuales, generación de residuos de procesos agroindustriales, generación de residuos de actividad humana, consumo de energía eléctrica, generación de biogás con la biomasa disponible, Supervisión del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) por emplazamiento de la planta,

conocimiento sobre biodigestores, conocimiento sobre abonos orgánicos, área disponible para el proyecto, condiciones de suelo para excavación.

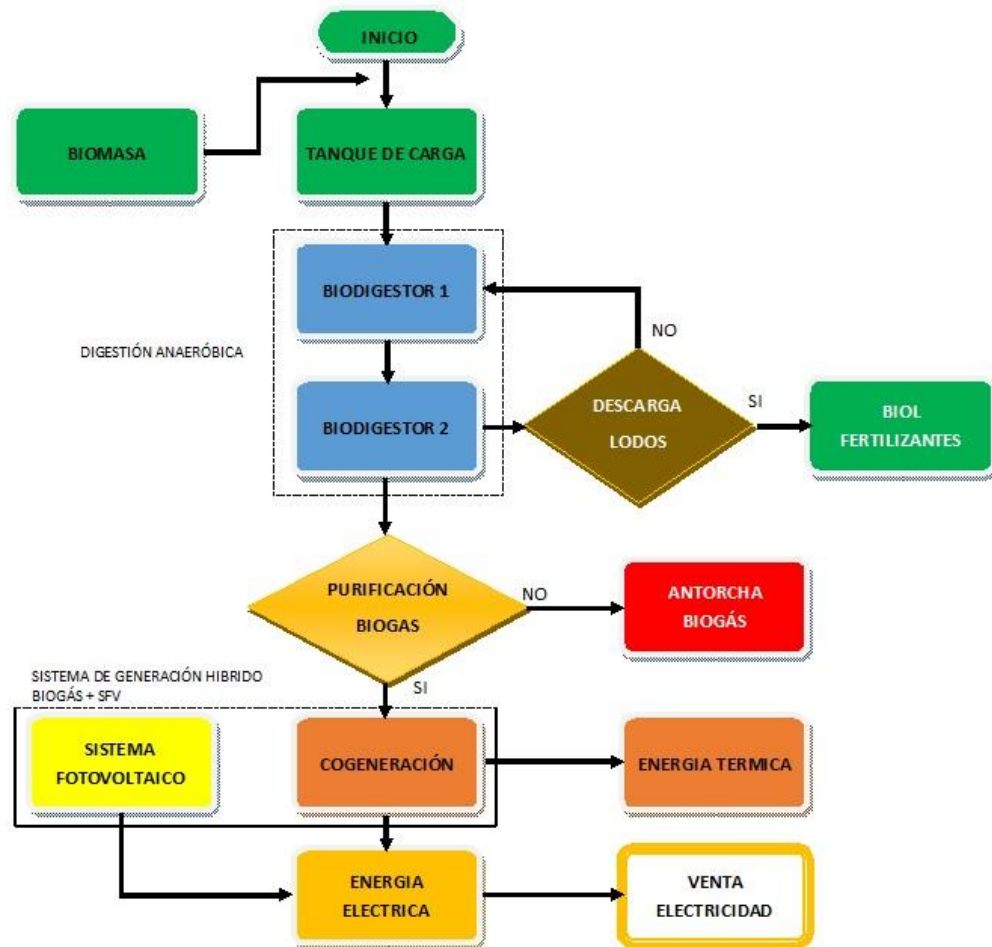


Figura 48. Diagrama de procesos de la planta avícola (Elaboración propia).

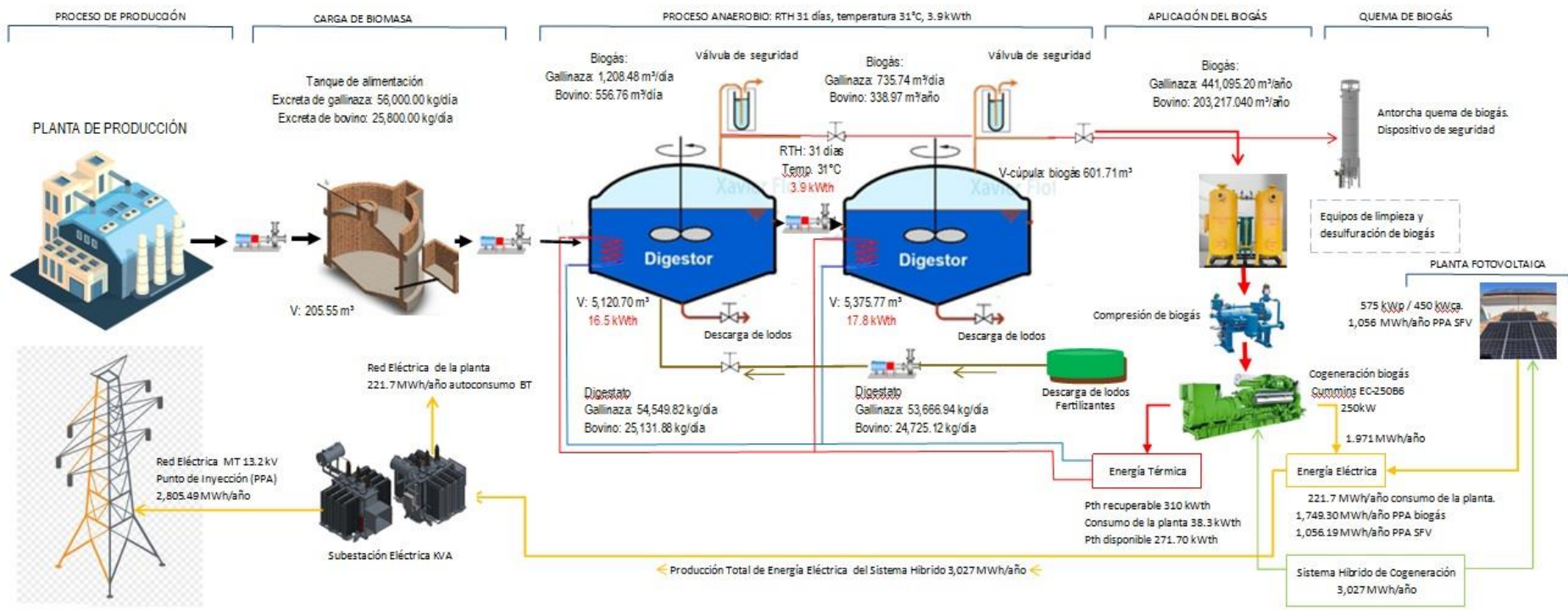


Figura 49. Diagrama del sistema de tratamiento anaerobio de la biomasa residual de la planta avícola (Elaboración propia)

Flujo de caja estimado con tecnología híbrida (Biogás y SFV)

Tabla 65. Flujo de caja estimado para la planta híbrida (Biogás y SFV)

AÑO DE OPERACIÓN		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
INGRESOS POR VENTAS																		
Energía	MWh	0.00	221.71	220.71	220.04	219.38	218.71	218.05	217.38	216.72	216.05	215.39	214.72	214.06	213.39	212.73	212.06	
Rendimiento de equipos Gen-biogás / año	%	100.00%	99.70%	99.40%	99.10%	98.80%	98.50%	98.20%	97.90%	97.60%	97.30%	97.00%	96.70%	96.40%	96.10%	95.80%	95.50%	
Rendimiento de equipos Gen-biogás promedio / año	%		99.85%	99.55%	99.25%	98.95%	98.65%	98.35%	98.05%	97.75%	97.45%	97.15%	96.85%	96.55%	96.25%	95.95%	95.65%	
Precio energía (Pett Resto -3%)	S/MWh		64.00	62.08	60.22	58.41	56.66	54.96	53.31	51.71	50.16	48.65	47.20	45.78	44.41	43.07	41.78	
Precio por MWh planta de biogás	S/MWh		128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	
Precio por MWh planta SFV	S/MWh		135,192.96	134,787.38	134,517.00	134,246.61	133,976.22	133,705.84	133,435.45	133,165.07	132,894.68	132,624.29	132,353.91	132,083.52	131,813.14	131,542.75	131,272.36	
Venta de energía	\$		163,571.33	163,038.05	162,682.53	162,327.00	161,971.48	161,615.96	161,260.44	160,904.92	160,549.40	160,193.88	159,838.36	159,482.84	159,127.32	158,771.79	158,416.27	
Descuento de Tarifa base	3.00%																	
INGRESOS POR VENTAS PRODUCTOS																		
Venta de huevo	\$ USD	0.00	349,650.00	419,580.00	503,496.00	604,195.20	725,034.24	870,041.09	1,044,049.31	1,252,859.17	1,503,431.00	1,804,117.20	2,164,940.64	2,597,928.77	3,117,514.52	3,741,017.43	4,489,220.91	
Venta de abono orgánico	\$ USD	0.00	74,441.25	89,329.50	107,195.40	128,634.48	154,361.38	185,233.65	222,280.38	266,736.46	320,083.75	384,100.50	460,920.60	553,104.72	663,725.66	796,470.79	955,764.95	
Total de Ventas Productos	\$ USD	0.00	424,091.25	508,909.50	610,691.40	732,829.68	879,395.62	1,055,274.74	1,266,329.69	1,519,595.62	1,823,514.75	2,188,217.70	2,625,861.24	3,151,033.49	3,781,240.18	4,537,488.22	5,444,985.87	
TOTAL INGRESOS	\$ USD	0.00	587,662.58	671,947.55	773,373.93	895,156.68	1,041,367.10	1,216,890.70	1,427,590.13	1,680,500.54	1,984,064.15	2,348,411.58	2,785,699.60	3,310,516.32	3,940,367.50	4,696,260.02	5,603,402.14	
COSTOS DE OPERACIÓN																		
Costos de O&M	\$ USD	0.00	-16,875.00	-17,069.06	-17,265.36	-17,463.91	-17,664.74	-17,867.89	-18,073.37	-18,281.21	-18,491.45	-18,704.10	-18,919.19	-19,136.77	-19,356.84	-19,579.44	-19,804.61	
Costos de Administración	\$ USD	0.00	-27,360.00	-27,674.64	-27,992.90	-28,314.82	-28,640.44	-28,969.80	-29,302.95	-29,639.94	-29,980.80	-30,325.58	-30,674.32	-31,027.08	-31,383.89	-31,744.80	-32,109.87	
Costo de energía eléctrica	\$ USD	0.00	-46,558.26	-47,093.68	-47,635.26	-48,183.06	-48,737.17	-49,297.65	-49,864.57	-50,438.01	-51,018.05	-51,604.76	-52,198.21	-52,798.49	-53,405.67	-54,019.84	-54,641.07	
Costo tratamiento de D.S.	\$ USD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TOTAL COSTOS DE OPERACIÓN	\$ USD	0.00	-90,793.26	-91,837.38	-92,893.51	-93,961.79	-95,042.35	-96,135.34	-97,240.89	-98,359.16	-99,490.29	-100,634.43	-101,791.73	-102,962.33	-104,146.40	-105,344.08	-106,555.54	
INGRESOS OPERATIVOS NETO	\$ USD	0.00	496,869.32	580,110.16	680,480.41	801,194.90	946,324.75	1,120,755.37	1,330,349.24	1,582,141.38	1,884,573.86	2,247,777.15	2,683,907.87	3,207,553.99	3,836,221.10	4,590,915.93	5,496,846.60	
GASTOS FINANCIEROS																		
Gasto Financiero (Intereses+capital)		0.00	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	-213,239.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Depreciación Equipos		0.00	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	-57,181.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TOTAL GASTOS FINANCIEROS		0.00	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	-270,420.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
INGRESOS DESPUES DE EBITDA		0.00	226,448.41	309,689.26	410,059.51	530,773.99	675,903.85	850,334.46	1,059,928.33	1,311,720.48	1,614,152.95	1,977,356.24	2,683,907.87	3,207,553.99	3,836,221.10	4,590,915.93	5,496,846.60	
ISR El Salvador	30%	0.00	67,934.52	92,906.78	123,017.85	159,232.20	202,771.15	255,100.34	317,978.50	393,516.14	484,245.89	593,206.87	805,172.36	962,266.20	1,150,866.33	1,377,274.78	1,649,053.98	
Impuesto Sobre la Renta (ISR)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-805,172.36	-962,266.20	-1,150,866.33	-1,377,274.78	-1,649,053.98	
Estado de resultados			226,448.41	309,689.26	410,059.51	530,773.99	675,903.85	850,334.46	1,059,928.33	1,311,720.48	1,614,152.95	1,977,356.24	1,878,735.51	2,245,287.79	2,685,354.77	3,213,641.15	3,847,792.62	
Costo de energía eléctrica		0.00	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	46,558.26	
Costo tratamiento de D.S.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Depreciación Equipos		0.00	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	57,181.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ESTADO DE RESULTADOS PROYECTADOS		-1,584,874.72	330,188.47	413,429.31	513,799.56	634,514.04	779,643.90	954,074.51	1,163,668.38	1,415,460.53	1,717,893.00	2,081,096.29	1,925,293.77	2,291,846.05	2,731,913.03	3,260,199.41	3,894,350.88	
DISCOUNTED PAYBACK - PERÍODO DE RECUPERACIÓN DESCONTADO																		
Inversión inicial		-1,584,874.72																
Flujo descontado de cada año a valor presente		-1,584,874.72	310,999.78	366,773.23	429,327.07	499,383.25	577,945.91	666,149.02	765,273.22	876,765.04	1,002,258.52	1,143,599.62	996,499.34	1,117,284.14	1,254,420.79	1,409,998.73	1,586,382.16	
Flujo descontado acumulado		-1,584,874.72	-1,273,874.94	-907,101.71	-477,774.63	21,608.62	599,554.53	1,265,703.55	2,030,976.76	2,907,741.80	3,910,000.32	5,053,599.94	6,050,099.27	7,167,383.41	8,421,804.21	9,831,802.94	11,418,185.10	
Indicador			1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

1. Dentro del objetivo general de evaluar la viabilidad técnica y económica de una propuesta de diseño de un biodigestor para aprovechar la biomasa generada en el proyecto, se ha alcanzado el objetivo con el diseño y dimensionamiento de los biodigestores de acuerdo al tipo, cantidad, temperatura. Además, con el biogás disponible se dimensiono la unidad de cogeneración, donde será transformado el biogás en energía eléctrica y térmica.
2. Como uno de los objetivos específicos era determinar el potencial energético de la biomasa residual y bajo el principio de revalorizar la biomasa que producirá la planta, y en el caso específico de la tecnología de aprovechamiento del biogás, el proyecto inició desarrollándose como una medida exclusiva para mitigar el impacto de la contaminación ambiental producida por las aguas residuales producidas en los procesos y el estiércol producido con el fin de mitigar los efectos de los gases invernadero y del compromiso de preservación del medio ambiente, no obstante, se identificó diferentes oportunidades para aprovechar un subproducto directo de la biodigestión, biogás, el cual puede ser utilizado como energía primaria para la producción de energía eléctrica y térmica mediante la tecnología de motores de combustión interna especialmente diseñados para aprovechar dicho gas con capacidad nominal de 250 kWe.
3. Otro objetivo específico era que la producción de biogás es de uso en cogeneración en una granja avícola según el recurso de biomasa disponible. La biomasa se convertido en la fuente de electricidad, permitiendo la cogeneración y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, al diversificar las fuentes de energía, se disminuye la presión sobre los recursos no renovables y se contribuye a la seguridad energética. Estos beneficios hacen de la biomasa una opción atractiva para la transición hacia una economía más verde y sostenible.
4. Dado que la propuesta es de una nueva planta, en el diseño de la infraestructura de la planta se consideró la orientación de techos y la capacidad de carga adicional para que estos se pueda instalar un generador fotovoltaico, cuya potencia se estima en 575 kWp. Con lo anterior, la planta tendrá una generación híbrida (Biogás y fotovoltaica).

5. Este objetivo específico planteaba evaluar las principales tecnologías para el aprovechamiento del biogás procedente de biomasa residual de granjas avícolas para cogeneración. Dentro de las tecnologías que transforman el biogás en energía, se eligen los motores de combustión interna como la mejor oportunidad ante las calderas y su equipamiento auxiliar, esto baja los costes de mantenimientos y simplicidad en la operación de los motores a biogás.
6. La solución integral planteada en este documento presenta una opción práctica de revalorizar los subproductos de una planta de tratamiento de aguas residuales, una instalación obligada en este tipo de industrias dadas las medidas ambientales que se deben cumplir, pero que al mismo tiempo es aprovechada como una planta de generación y aprovechamiento de biogás para la producción de electricidad. Por lo anterior, la producción de electricidad y venta de energía mitiga el impacto económico generado por la construcción de la planta de tratamiento.
7. Otros de los objetivos específicos tenían un enfoque en evaluar la viabilidad económica de la cogeneración a través de un biodigestor para abastecer parcialmente la demanda energética de la granja avícola. Este alcance de detalla en el siguiente literal.
8. En cuanto los indicadores económicos y financieros del proyecto, esta muestra tener una viabilidad dado que, solo para la planta de biogás, su VAN y TIR es de \$2,817.599.04 y 21.17 %, respectivamente, mientras que su B/C es 13.01, lo cual indica un proyecto muy rentable. Para el caso de la planta híbrida, el VAN, TIR y B/C cambian a \$13,611,147.02, 40.40 % y 9.59, respectivamente. Lo anterior demuestra la ventaja del aprovechamiento híbrido.
9. La implementación de una planta híbrida permitirá, por un lado, el abastecimiento de energía eléctrica durante las horas diurnas o de Sol, mientras que se guarda el biogás para el periodo nocturno o, como el caso de los días de poca irradiancia, poder generar durante el día con lo cual se conseguirá que la planta pueda gestionar la cantidad de energía que es vertida a la red.
En ambos casos, la planta podrá ser autosostenible energéticamente y a demás poder gestionar la cantidad de energía inyectada a la red eléctrica.
10. Por todo lo anterior, la planta ofrecerá una serie de beneficios económicos, energéticos, medioambientales y socioeconómicos, pues no solo permite reducir los costos

energéticos y obtener una fuente de energía verde, sino también contribuye a la protección del medio ambiente, previniendo la contaminación del aire, el agua y el suelo. Además, el aprovechamiento de la biomasa como producto de alto valor fortalece la competitividad de la planta, mejora su imagen con soluciones sostenibles y responsabilidad social.

RECOMENDACIONES

Este proceso ofrece numerosos beneficios económicos, ambientales y energéticos que lo convierten en una opción atractiva para planta avícola y comunidades en busca de una fuente de energía renovable y una forma de gestionar sus residuos de manera responsable.

Es importante considerar:

- Un mantenimiento frecuente para evitar problemas de obstrucciones, asegurando un rendimiento óptimo. Limpieza los filtros y válvulas periódicamente para evitar acumulaciones que puedan afectar el rendimiento
- Gestionar adecuadamente la biomasa generada en la planta, ya que esta genera olores desagradables.
- Gestionar el tipo, calidad y cantidad de la biomasa ingresada al biodigestor, esto permitirá que no varíe la eficiencia en la producción de biogás.
- Mantener un control óptimo de la temperatura en el tiempo de residencia de la biomasa para maximizar la producción de biogás (Temperaturas 35-40°C)
- Monitoreo y ajuste del pH (entre 6.5-7.5), utilizar aditivos en caso de ser necesario.
- Supervisión de las canalizaciones y dispositivos, asegurando una correcta ventilación ante la presencia de fugas, así evitar la acumulación de gases inflamables.

BIBLIOGRAFÍA

Botero, R. (1987). *BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA LA PRODUCCION DE COMBUSTIBLE Y FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCRETAS.*

Consultores, E. (2021, mayo 30). *Diseño Planta Biogas.*
<https://www.eccentralamerica.com/disenoplanta-biogas>

Engineering, A. (s/f). *BD Hacienda San Ramon.*

Engineering e.K., A. (2020, septiembre 1). *Biodigestores—Plantas de biogás.* Biodigestores - plantas de biogas - generadores - energia. <https://www.aqualimpia.com/>

Frigon, J.-C. (2014). *Anaerobic co-digestion of dairy manure with mulched switchgrass for improvement of the methane yield.* <https://doi.org/10.1007/s00449-011-0572-5>

Fuente: Aqualimpia, E. (2015, junio 10). *APROVECHAMIENTO DE ESTIERCOL DE GANADO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGIA UBICACIÓN BIODIGESTOR - HACIENDA SAN RAMON - PDF Descargar libre.* <https://docplayer.es/48906713-Aprovechamiento-de-estiercol-de-ganado-para-la-produccion-de-energia-ubicacion-biodigestor-hacienda-san-ramon.html>

Granjas avícolas salvadoreñas producen biogás y alivian conflictos socioambientales. (2024, febrero 29). *El Independiente.* <https://www.elindependiente.sv/2024/02/29/granjas-avicolas-salvadorenas-producen-biogas-y-alivian-conflictos-socioambientales/>

Jenbacher. (2023). *Transformar el biogás en calor y energía.*
<https://www.jenbacher.com/es/soluciones/generacion-de-energia/biogas>

Jiménez, D. de la M. (2012). *Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio tipo Continuo.*

Magaña, Y. (2024, febrero 19). *Autorizan préstamo de \$83 millones de Arabia Saudita para planta de biogás en el río Acelhuate.* Diario El Mundo.

<https://diario.elmundo.sv/politica/autorizan-prestamo-de-83-millones-de-arabia-saudita-para-planta-de-biogas-en-el-rio-acelhuate>

Moncayo Romero, Ing. G. (2013). *Biodigestores* (Aqualimpia Engineering e.K.).

Redacción. (2016, abril 8). *Biodigestores reducen emisión de gases contaminantes* | *Comunica*.

<https://comunica.edu.sv/archivo/biodigestores-reducen-emision-de-gases-contaminantes/>

