



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**Propuesta de la producción energética de una planta
de biogás a partir de la digestión anaerobia de
estiércol de cerdo codigerido con los residuos grasos
de la industria pesquera en el distrito de Huacho**

Autor:

Bach. Antony Ivan Cabanillas Guerrero

Asesor:

Ing. Robinson Tapia Asenjo

Lambayeque - Perú

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Propuesta de la producción energética de una planta
de biogás a partir de la digestión anaerobia de
estiércol de cerdo codigerido con los residuos grasos
de la industria pesquera en el distrito de Huacho**

Autor:

Bach. Antony Ivan Cabanillas Guerrero

Aprobado por el jurado Examinador:

PRESIDENTE: Mg. Ing. Norman Osvaldo Aguirre Zaquinaula

SECRETARIO: Mg. Ing. Carlos Yupanqui Rodriguez

VOCAL: Ing. Hector Antonio Oliden Nuñez

ASESOR: Ing. Robinson Tapia Asenjo

Lambayeque - Perú

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

TÍTULO

Propuesta de la producción energética de una planta de biogás a partir de la digestión anaerobia de estiércol de cerdo codigerido con los residuos grasos de la industria pesquera en el distrito de Huacho

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

AUTOR: BACH. ANTONY IVAN CABANILLAS GUERRERO

M.Sc. Ing. NORMAN OSVALDO AGUIRRE ZAQUINAULA

PRESIDENTE

Ing. HÉCTOR ANTONIO OLIDEN NUÑEZ

MIEMBRO

M.Sc. Ing. CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ

SECRETARIO

Ing. ROBINSON TAPIA ASENJO

ASESOR

Lambayeque - Perú

2022

DEDICATORIA

De manera especial a Dios por darme la salud y fortaleza para superar los tropiezos en el camino de la vida.

A mis padres Marco Antonio Cabanillas Gálvez y María Eliza Guerrero Valdez por brindarme su apoyo incondicional, creer siempre en mí a pesar de los errores cometidos, por sus consejos y valores inculcados que me han convertido en un hombre de bien.

A mis hermanos Humberto y Kevin, por ser mis ejemplos a seguir, brindarme su apoyo y consejos en mis momentos de flaqueza.

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la salud mental y física para poder disfrutar de la vida, a mi familia por comprenderme, motivarme a mejorar cada día y ser mi pilar en mis momentos más difíciles.

A mi prestigiosa Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, mi alma mater, que me acogió en mis 5 años de formación profesional, en especial a mi facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica que a través de sus docentes me guiaron y me enseñaron lo hermoso de esta carrera.

Deseo expresar mi agradecimiento a mi asesor de tesis por brindarme su tiempo, conocimientos y experiencia para la realización de este proyecto.

A mi familia, la cual me brinda su apoyo incondicional y me impulsa a seguir logrando mis metas propuestas.

RESUMEN

La presente tesis tiene como finalidad determinar la producción energética que se obtiene de la instalación de una central de biogás a partir de la codigestión de purín porcino y residuos de la industria conservera de pescado en el distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima, asimismo, encontrar las mejores condiciones de operación de la central para obtener el mayor volumen y porcentaje de metano en el biogás producido.

El tipo de investigación utilizado en la presente tesis fue descriptivo, los datos sobre la biomasa disponible para la codigestión en la planta fueron extraídos del último Censo Nacional Agropecuario 2012 realizado por INEI (purín porcino), específicamente de 2 granjas, las cuales son las de mayor tamaño en el distrito de Huacho y del Anuario Estadístico Pesquero y Acuícola 2019 (residuos de la industria pesquera).

De los resultados se obtiene lo siguiente: La energía eléctrica y térmica producida en la central de biogás es de $1,7\text{ GWh}$ y $1,921\text{ GWh}$ respectivamente. Se ha seleccionado un sistema de trituración, tanque de alimentación de sustrato con un volumen de $302,74\text{ m}^3$, digestor de hormigón armado con una altura de $7,9\text{ m}$ y un diámetro de 27 m , gasómetro de jebe de EPDM con un volumen de $549,677\text{ m}^3$, aislamiento térmico de espuma de polietileno y una unidad de cogeneración con una potencia instalada de $508,355\text{ kW}$. Además de un biodigestor que opera en un régimen de operación continuo a una temperatura de 35°C de digestión en una sola fase y por vía húmeda, siendo todas estas condiciones las más idóneas para la mayor producción de metano en el biogás.

Palabras claves: Central de biogás, Generación de energía, Energía renovable

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to determine the energy production obtained from the installation of a biogas plant from the co-digestion of pig slurry and waste from the fish canning industry in the district of Huacho, province of Huaura, department of Lima. Likewise, find the best operating conditions for the plant to obtain the highest volume and percentage of methane in the biogas produced.

The type of research used in this thesis was descriptive, the data on the biomass available for co-digestion in the plant were extracted from the last National Agricultural Census 2012 carried out by INEI (swine slurry), specifically from 2 farms, which are those of larger size in the district of Huacho and the Fisheries and Aquaculture Statistical Yearbook 2019 (residues of the fishing industry).

The following is obtained from the results: The electrical and thermal energy produced in the biogas plant is 1.7 GWh and 1.921 GWh, respectively. A crushing system has been selected, a substrate feed tank with a volume of 302.74 m³, a reinforced concrete digester with a height of 7.9 m and a diameter of 27 m, an EPDM rubber gas holder with a volume of 549,677 m³, thermal insulation of polyethylene foam and a cogeneration unit with an installed capacity of 508,355 kW. In addition to a biodigester that operates in a continuous operating regime at a temperature of 35°C for digestion in a single phase and by wet method, all of these conditions being the most suitable for the greatest production of methane in the biogas.

Keywords: Biogas Plant, Power Generation, Renewable Energy

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	13
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.1 Realidad Problemática	15
1.1.1 Contexto Internacional	16
1.1.2 Contexto Nacional.....	17
1.1.3 Contexto Local	18
1.2 Formulación del Problema.....	18
1.3 Delimitación de la Investigación	19
1.3.1 Delimitación Espacial	19
1.3.2 Delimitación Temporal.....	20
1.3.3 Delimitación Temática	20
1.4 Justificación e Importancia de la Tesis.....	20
1.4.1 Justificación Técnica.....	20
1.4.2 Justificación Ambiental	22
1.4.3 Justificación Tecnológica.....	22
1.4.4 Justificación Social	22
1.5 Limitación de la Investigación	22
1.6 Objetivos de la Investigación	23
1.6.1 Objetivo General	23
1.6.2 Objetivos específicos	23
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	24
2.1 Antecedentes de Estudios	24
2.1.1 Contexto Internacional	24
2.1.2 Contexto Nacional.....	25
2.1.3 Contexto Local	26
2.2 Desarrollo de la Temática Correspondiente al Tema Investigado.....	26
2.2.1 Energías renovables	26
2.2.2 Digestión Anaeróbica	27
2.2.3 Biogás	38
2.2.4 Digestato	46
2.2.5 Plantas de Biogás	47
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	67
3.1 Tipo y diseño de investigación	67
3.1.1 Tipo de investigación	67

3.1.2 Diseño de investigación	67
3.2 Población y muestra	67
3.3 Hipótesis	67
3.4 Operacionalización de Variables.....	68
Fuente: Elaboración propia.....	68
3.5 Métodos y técnicas de Investigación	69
3.6 Descripción de los Instrumentos Utilizados.....	69
3.7 Análisis Estadístico e Interpretación de los Datos	70
CAPITULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN.....	71
CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	72
5.1 Caracterización de los Sustratos	72
5.1.1 Purín Porcino.....	72
5.1.2 Residuos de la Industria Pesquera	74
5.1.3 Mezcla de Purín Porcino con los Residuos de la Industria Pesquera.....	76
5.2 Cuantificación de la Biomasa	79
5.2.1 Cuantificación de Purín de Cerdo	79
5.2.2 Cuantificación de los Residuos de la Industria Pesquera.....	89
5.2.3 Cuantificación de Residuos de la Mezcla	90
5.3 Dimensionamiento y Diseño de la Planta de Biogás.....	91
5.3.1 Sistema de Digestión Anaerobia	91
5.3.2 Tanque de Alimentación	92
5.3.3 Biodigestor	96
5.3.4 Acondicionamiento del Biogás.....	121
5.3.5 Unidad de Cogeneración.....	122
5.4 Estudio Económico.....	127
5.4.1 Coste Total de la Instalación	127
5.4.2 Ingreso por la venta de energía eléctrica	131
5.4.3 Viabilidad económica.....	132
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
Conclusiones	135
Recomendaciones.....	137
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
ANEXOS	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Inhibidores Presentes en el Proceso de Descomposición Anaeróbica	31
Tabla 2	Intervalos de Temperaturas en el que Trabajan las Bacterias Anaeróbicas	32
Tabla 3	Caracterización Relativa para la Co-digestión de Diferentes Residuos Orgánicos.....	36
Tabla 4	Comparación de Valores Caloríficos para Diferentes Combustibles.....	38
Tabla 5	Residuos Orgánicos Potencialmente Utilizables en una Planta de Biogás.....	40
Tabla 6	Componentes del Biogás en Función del Substrato Utilizado	40
Tabla 7	Composición del Biogás	41
Tabla 8	Especificaciones de Calidad del Biogás para usos en Motores de Combustión Interna y Microturbinas	42
Tabla 9	Propuesta de Valores de Calidad de Biometano para su Inyección a la Red en Europa	43
Tabla 10	Sustancias Contaminantes en el Biogás y sus Efectos	45
Tabla 11	Clasificación de los Reactores de Digestión Anaerobia.....	51
Tabla 12	Propiedades de los Biodigestores de Mezcla Completa	53
Tabla 13	Propiedades de los Biodigestores Flujo Pistón	55
Tabla 14	Valores Característicos y Parámetros del Proceso de los Sistemas Integrados de Calentamiento	56
Tabla 15	Valores Característicos y Parámetros del Proceso de los Intercambiadores de Calor Externo	57
Tabla 16	Valores Característicos y Consideraciones Especiales de los Materiales de Aislamiento	64
Tabla 17	Valores Característicos y Parámetros de las Coberturas con Planchas Plásticas.....	65
Tabla 18	Valores Característicos y Parámetros del Proceso de los Tanques Externos de Almacenamiento de Biogás	66
Tabla 19	Operacionalización de variables	68
Tabla 20	Técnica e instrumentos utilizados.....	69
Tabla 21	Características Físicoquímicas del Purín Porcino	72
Tabla 22	Características físico-Químicas de los Residuos de Pescado	76
Tabla 23	Parámetros operativos del co- digestor y digestor anaeróbico.....	78
Tabla 24	Características de la mezcla de PM – FW.....	79
Tabla 25	Clasificación y Población del Ganado Porcino.....	83

Tabla 26 Coeficiente de Generación de Purines	83
Tabla 27 Encuadre de las categorías según INEI.....	84
Tabla 28 Consideraciones para el cálculo del potencial accesible	85
Tabla 29 Coeficiente de Accesibilidad de las Agropecuarias en el Distrito de Huacho	86
Tabla 30 Potencial accesible de purín en el distrito de Huacho	87
Tabla 31 Rango de valores orientativos para hallar el C_D	88
Tabla 32 Potencial disponible de purín en el distrito de Huacho	88
Tabla 33 Residuos de Pescado en el Proceso de Enlatados en el Distrito de Huacho.....	90
Tabla 34 Cuantificación de la mezcla a codigerir.....	90
Tabla 35 Sistema de Digestión Anaerobia de la Planta de Biogás	92
Tabla 36 Ventajas y Consideraciones del Dispositivo de Triturado	94
Tabla 37 Mezcla Total de residuos.....	95
Tabla 38 Características del Tanque de Alimentación del Sustrato	96
Tabla 39 Parámetros Operacionales Base	97
Tabla 40 Resumen de los Parámetros Operacionales del Funcionamiento del Digestor.....	101
Tabla 41 Dimensiones del digestor anaeróbico.....	104
Tabla 42 Especificaciones del gasómetro	105
Tabla 43 Temperatura y Velocidad del Viento	107
Tabla 44 Propiedades de la espuma de poliuretano	118
Tabla 45 Porcentaje de pérdida de calor respecto al coeficiente de calor con diferentes espesores de aislamiento.....	119
Tabla 46 Pérdidas de calor en el digestor	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Delimitación espacial de Huacho	19
Figura 2 Descomposición de las Bacterias Metanogénicas	29
Figura 3 Correlación entre la Tasa de Carga Orgánica y el Tiempo de Retención Hidráulica para Diversas Concentraciones de Sustrato	34
Figura 4 Aprovechamiento Energético de Biogás	44
Figura 5 Diagrama de Flujo de una Planta de Biogás Agroindustrial	47
Figura 6 Clasificación de los sistemas de digestión anaerobia	48
Figura 7 Diagrama de Flujo del Sistema de una sola Etapa	50
Figura 8 Diagrama de Flujo del Sistema de dos Etapas	51
Figura 9 Diagrama de Biodigestor de mezcla completa	53
Figura 10 Diagrama de Biodigestor Flujo Pistón	54
Figura 11 Conducción radial del calor	58
Figura 12 Transferencia de Calor Global a Través de una Pared Plana	61
Figura 13 Proceso Productivo de la Elaboración Conservas de Pescado	75
Figura 14 Transferencia de calor en la pared del digestor	111
Figura 15 Flujograma de planta de biogás	111

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como objetivo determinar la producción energética de la instalación de una central de biogás, generando energía eléctrica y térmica a partir de la codigestión de purín de cerdo y la industria pesquera en el distrito de Huacho, provincia de Huará, departamento de Lima. El desarrollo de esta tesis consigna una serie de capítulos que se presentan a continuación.

En el primer capítulo, se relata la evolución en el contexto internacional, nacional y local del uso del biogás como fuentes de energía en centrales eléctricas, además se formula el problema y se plantea los objetivos de la investigación.

Por ello, **en el segundo capítulo** se detalla los estudios e investigaciones relacionados al uso de biogás como fuente de energía en una central eléctrica, con el objetivo de comparar, analizar y adaptar esta tecnología al contexto nacional, de esta manera logrando aprovechar los residuos de la explotación ganadera e industria pesquera para su posterior uso como sustrato en la central de biogás.

Además, se explica el proceso de digestión anaerobia que se lleva a cabo para la formación del biogás y los sistemas funcionales necesarios de una central de biogás para poder generar energía eléctrica.

En el tercer capítulo, se ha planteado la siguiente hipótesis:

“Mediante la instalación de una planta de biogás a partir de la codigestión de purín de ganado porcino y los residuos de la industria conservera de pescado en el distrito de Huacho, se producirá anualmente más de 1 GWh de energía eléctrica y un 1 GWh de energía térmica”

Iniciando la investigación a través de un enfoque exploratorio estableciendo una variable independiente y dependiente, las cuales son el biogás y la producción energética respectivamente, además la población está definida por el total de purín de cerdo y residuos de la industria pesquera en

el distrito de Huacho, donde los datos se obtienen mediante un método de investigación deductiva utilizando la técnica de análisis de contenido para el posterior análisis estadístico de estos datos.

En el cuarto capítulo, se realiza la propuesta de la instalación de una central de biogás, enfocándose en determinar el potencial energético que se podrá producir si se instalara dicha central aprovechando los residuos de la explotación ganadera y la industria pesquera.

En el quinto capítulo, inicia con la identificación de las características de los sustratos que se utilizará como biomasa para la producción de biogás, además de cuantificar el purín de cerdo y residuos de la industria pesquera finalizando con el dimensionamiento y diseño de la planta de biogás

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Realidad Problemática

En el transcurso del tiempo las energías renovables (ER) o también llamadas energías limpias han tomado una gran importancia y relevancia en la matriz energética de diversos países del mundo.

En el año 2008, la contribución de las energías renovables con respecto a la energía total producida a nivel mundial fue de aproximadamente del 8% y en Europa del 6%; siendo la energía hidráulica y de biomasa las que contribuyen casi con el total de energía renovable producida (Schallenberg et al., 2008).

La asamblea general de las Naciones Unidas declaró en el 2014 que aumentará la participación de las energías llamadas limpias en la matriz energética, proyectándose duplicar la participación de las Energías renovables (E.R) en el sistema energético, logrando en el 2030 que las E.R representen el 36% del sistema energético (Robles y Rodríguez, 2018).

A partir de todo esto se deduce que la generación de energía eléctrica a partir de la biomasa es una de las principales energías renovables que se utilizan en la actualidad, además de su alto potencial de utilización como fuente de energía renovable en el futuro.

El biogás se produce a partir de un proceso biológico en ausencia de oxígeno de biomasa, donde la materia orgánica se descompone y da origen a una mezcla de gases llamado biogás (Cuesta, s.f.).

1.1.1 Contexto Internacional

1.1.1.1 Europa. La producción total de biogás producido en Europa entre los años 2006 y 2008 se incrementó en un 54%, siendo la energía generada en plantas centralizadas de codigestión donde los sustratos eran residuos agropecuarios la que presentó un aumento más significativo (Barometer on the estate of renewable energies in Europe, 2009, citado en Pascual, et al., 2011).

A partir del año 2006, Alemania encabezó la lista de países con mayor generación de biogás en Europa, debido a la gran cantidad de instalaciones de minicentrales de tratamiento de residuos agropecuarios, generando energía eléctrica y térmica mediante la cogeneración (Pascual, et al., 2011).

El estudio realizado por la European Biomass Association (AEBIOM) reveló que en el año 2020 se podría generar 39,5 Mtep procedente de biogás en la Unión Europea, además que los residuos generados de toda actividad relacionada al sector agrícola representarán el 80% de la biomasa utilizada para generar el biogás (Pascual, et al., 2011).

1.1.1.2 Asia. China es el país que ha desarrollado ampliamente la tecnología del biogás, en el año 2010 se construyó acerca de 5 millones de nuevos biodigestores, alcanzando un total de 40 millones de biodigestores. Además, en el año 2011 se reportó que, en India se encontraban acerca 4,4 millones de biodigestores en operación, con el apoyo del Programa Nacional para la gestión de Biogás y Fertilizantes (Mwuirigi, 2014, citado en Acosta y Pasqualino, 2014).

1.1.1.3 África. Se ha fomentado esta tecnología a partir de la iniciativa de la Asociación Africana de Biogás, logrando promover la instalación de 70 000 plantas de biogás en Ruanda, Tanzania, Kenia, Uganda, Etiopía, Camerún, Benín y Burkina Faso (Orskov, 2014; Mwirigi, 2014, citado en Acosta y Pasqualino, 2014).

1.1.1.4 Latinoamérica. La falta de conocimientos sobre el uso del biogás y del proceso para obtenerlo, además de los costos y la facilidad de obtener madera como combustible en zonas rurales, la producción de biogás se ha desarrollado escasamente en Latinoamérica. A pesar de todas estas limitaciones se ha logrado implementar pequeñas instalaciones en zonas rurales de Perú, Colombia, Bolivia y Costa Rica (Cendales, 2011; Ferrer 2011; Pérez, 2014, citado en Acosta y Pasqualino, 2014).

1.1.2 Contexto Nacional

En el Perú el desarrollo de la generación de biogás se ha venido dando en menor escala que en el resto del mundo, implementando principalmente pequeñas instalaciones de biogás para la generación de energía eléctrica en zonas rurales y autoabastecimiento de pequeñas granjas.

El Perú, es un país con un alto potencial para la producción de biogás, sin embargo, dichos sustratos no son aprovechados. Se ha estimado acerca de 13 tipos de cultivos que generan residuos que se puede utilizar para la producción de energía eléctrica. Generando aproximadamente, 31 millones de toneladas de residuos que no son aprovechados debido a que son quemados o dejados en los campos (Osinermin, 2019).

Perú, si aprovechara en mayor medida su potencial de residuos orgánicos originados de la agricultura, la ganadería, las industrias pesqueras y las zonas urbanas podría instalar centrales de biogás con un total de 5 151 MW de capacidad (Mendoza, 2012, citado en Osinermin, 2019).

Hoy en día las centrales de biogás instaladas en el Perú son las siguientes: Huaycoloro (4,4 MW), La Gringa V (2MW), El Callao (2MW) y Huaycoloro II (2MW) con la capacidad de generar el 0.08% del total de energía eléctrica producida en el Perú (Osinerghmin, 2016).

Debido al insuficiente desarrollo de la generación de energía eléctrica a partir del biogás en el Perú y la difusión de esta tecnología, es fundamental fomentar más investigaciones, proyectos donde se lleve a cabo un correcto manejo de residuos orgánicos. A partir del uso de esta tecnología la contaminación disminuirá, además se podrá producir energía renovable y se podrá aumentar la diversidad de la matriz energética del Perú.

1.1.3 Contexto Local

Por lo anteriormente planteado el presente trabajo representa el resultado de una investigación sobre los diversos puntos que involucran la utilización de la biodigestión para la obtención de biogás, además con el propósito de mitigar la contaminación medioambiental por los desechos orgánicos expuestos en el medio ambiente y la producción de energía a partir del biogás.

Por lo tanto, se presenta un estudio del potencial de generación de energía eléctrica y térmica, teniendo como recurso energético base el biogás, generado por la codigestión entre el estiércol de ganado porcino (purines) y los residuos de la industria conservera de pescado en el distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima.

1.2 Formulación del Problema

Determinar el potencial de producción energética que se obtendría de la instalación de una planta de biogás generado a partir de la codigestión de purín porcino y los residuos de la industria conservera de pescado en el distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima.

1.3 Delimitación de la Investigación

1.3.1 *Delimitación Espacial*

El presente trabajo de investigación se encuentra localizado en el distrito de Huacho siendo uno de los 12 distritos que conforman la provincia de Huaura, ubicado en el departamento de Lima, bajo la administración del Gobierno Regional de Lima.

-Norte: con el Distrito de Hualmay

-Sur: con la Provincia de Huaral

-Oeste: con el Océano Pacífico

-Este: con el Distrito de Santa María

Figura 1

Delimitación espacial de Huacho



Fuente: Elaboración propia

1.3.2 Delimitación Temporal

La presente tesis se desarrolló en un periodo de seis meses cronológicos.

1.3.3 Delimitación Temática

La presente investigación se centra en la necesidad de la generación de energía (eléctrica y térmica) sin afectar al ambiente, rescatando los residuos generados por las diferentes actividades en nuestro país y que se le puede dar un valor reciclado, además contribuir a la diversificación de la matriz energética de nuestro país al implementar nuevas tecnologías para la generación de energía y depender menos de los combustibles fósiles.

En este caso es el estudio de la producción energética que se podría obtener si se instalara una planta de biogás en el distrito de Huacho aprovechando los purines y residuos de la industria pesquera.

1.4 Justificación e Importancia de la Tesis

1.4.1 Justificación Técnica

Comúnmente los residuos generados en diferentes actividades como: la ganadería, la industria pesquera o alimentaria, la agricultura, entre otras actividades son considerados negativos y no se aprovechan como una posible fuente de ingresos o para generar algún tipo de energía, por lo general se deshacen de ellos mediante su vertimiento en tiraderos.

Una de las actividades económicas más importantes que se realiza en el Perú es la ganadería porcina (MIDAGRI, 2017), existiendo más de 3 millones de cerdos a nivel nacional, siendo Lima uno de los departamentos con mayor porcentaje de cerdos.

Los purines producidos por esta población porcina no tienen un procedimiento previo a su utilización tradicionalmente, han sido utilizados directamente a los campos de cultivo para mejorar la calidad de los mismos, debido a su contenido de nutrientes (N, P, K), pero uno de los inconvenientes de esta técnica es el exceso de nutrientes y otras sustancias que pueden generar la degradación del suelo

y el agua. Las granjas donde se encuentran una alta densidad porcina tienden a liberar excesivas cantidades de nitrógeno y fósforo en el medio ambiente (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2014).

Se puede aprovechar diferentes tipos de residuos y mezclarlos para realizar la codigestión en un biodigestor, dicho residuos se pueden complementar y aumentar la producción de biogás. Es por esto que para maximizar la producción de biogás y disminuir la contaminación generada por estos residuos, se optó por codigir el purín de cerdo con los residuos de la industria conservera de pescado dedicada a la elaboración de enlatados.

En algunos casos dichos residuos pueden ser vertidos en el mar contribuyendo con la contaminación ambiental (Chang-Reyes, 1970; Cifuentes y col., 1970, citado en Mendiola, et al., 1998).

La zona donde se realizará el estudio es el distrito de Huacho, fue seleccionada después de investigar las estadísticas del IV censo Nacional agropecuario realizado por el Instituto Nacional de Informática (INEI) donde los datos revelan que, en el distrito de Huacho, la población del ganado porcino es de 62 684 entre cerdos mejorados y criollos.

Siendo el distrito de Huacho una superficie pequeña en comparación con otros departamentos como, por ejemplo: Lambayeque, este distrito los supera en población porcina, por lo tanto, si se llegara a instalar una planta de biogás, el transporte de purines hacia la planta se realizaría en un menor tiempo y menor costo.

Además de lo ya antes mencionado en el distrito de Huacho se realiza una importante actividad industrial de enlatados de pescado contribuyendo a la mezcla para la codigestión con los purines generando un mayor porcentaje de biogás.

1.4.2 Justificación Ambiental

Esta investigación ayudará para el tratamiento de los residuos generados por la ganadería porcina y la industria pesquera, mediante la introducción del concepto de plantas de biogás. Estas plantas permitirán generar energía renovable a partir de residuos orgánicos disminuyendo la contaminación generada por los mismos y buscar nuevas fuentes para la generación de energía.

1.4.3 Justificación Tecnológica

Aprovechar los residuos de distintas actividades para lograr la instalación de centrales de biogás, de esta manera beneficiando a las industrias participantes en la zona, reduciendo costos en energía, asimismo mayor inversión en la zona.

1.4.4 Justificación Social

Promover la generación de energía eléctrica y térmica a partir de los desechos orgánicos, además de diversificar la matriz energética de nuestro país reduciendo el consumo de combustibles fósiles, buscando un ambiente más saludable para nuestra sociedad.

1.5 Limitación de la Investigación

Debido a los acontecimientos sucedidos a nivel mundial a causa del virus covid-19 el estudio se limita a siguientes fuentes de información, IV Censo Nacional Agropecuario 2012-INEI, Ministerio de la Producción (PRODUCE) y diversos estudios técnicos, logrando recolectar los datos necesarios para el desarrollo de nuestro proyecto. Otra limitación importante es la escasa difusión sobre la implementación de esta tecnología en Perú, por lo que es necesario la obtención de información a partir de diversos estudios de diferentes países.

1.6 Objetivos de la Investigación

1.6.1 *Objetivo General*

Determinar la producción energética que se obtendría de la instalación de una central de biogás a partir de codigestión de purín porcino y los residuos de la industria pesquera en el distrito de Huacho, para aumentar el uso de energía renovable como fuente energética en el Perú.

1.6.2 *Objetivos específicos*

- a. Diagnóstico de los residuos ganado porcino y residuos pesqueros generados en el distrito de Huacho, caracterizar el purín y los residuos de la industria pesquera.
- b. Método del proceso de obtención del gas metano en el biogás.
- c. Ingeniería del proyecto: determinar, diseñar y seleccionar los elementos básicos para el funcionamiento de la planta para convertir la energía de los residuos (biogás) en energía eléctrica y térmica.
- d. Cálculo del balance de biomasa y térmico del biodigestor.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de Estudios

2.1.1 *Contexto Internacional*

Fernández (2016) desarrolló un estudio sobre “Selección y dimensionamiento de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigerido con glicerina”. Proyecto de grado para obtener el título de ingeniera química, Cádiz, 2016.

Concluye que: El proceso de fermentación anaeróbico es amigable con el medio ambiente, puesto que disminuye la contaminación que es producido por los residuos generados por los diferentes sectores de la actividad porcina (Fernández, 2016).

La energía producida en la planta anualmente es de 2,987 GWh (energía eléctrica) y 3,3 GWh (energía térmica) (Fernández, 2016).

A pesar de los múltiples beneficios a la hora de utilizar el purín de cerdo para la obtención de biogás, el bajo rendimiento de producción de biogás es el principal inconveniente en este proceso, por lo que dicho problema se soluciona añadiendo un segundo sustrato al proceso de digestión, de esta manera se logra incrementar el nivel de producción de biogás (Fernández, 2016).

Estella (2016) en la investigación “Estudio de la producción energética a partir del aprovechamiento del biogás en una granja de ganado bovino”. Para obtener el grado de ingeniera en Tecnologías Industriales, Madrid, 2016.

Concluye: Es necesario realizar un proceso de codigestión para aumentar la producción de biogás, además recomienda que el sustrato utilizado para la codigestión debe de tener un alto índice de producción de biogás y estar lo más cercano posible a la planta, evitando gastos por transporte y evitando emisiones contaminantes. La potencia instalada en la granja de tratamiento bovino es de 578,72 kW.

Además, recomienda que el proceso de digestión se realiza en un rango termofílico, aprovechando todo el calor producido y disminuyendo el tiempo de retención del sustrato en el digestor (Estella, 2016).

Flores (2010) en el proyecto “Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizante”. Para obtener el título de ingeniero agroindustrial y de alimentos, Quito, 2010.

Concluye: Debido a la sensibilidad a la temperatura por parte de las bacterias se recomienda un control de la temperatura, evitando demora en el proceso de biodigestión. Además, es necesario la instalación de un agitador en el interior del digestor para evitar la formación de natas (Flores, 2010).

2.1.2 Contexto Nacional

Arrieta (2016) en el proyecto “Diseño de un biodigestor domestico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado”. Para obtener el título de Ingeniero Mecánico – Eléctrico, Piura, 2016.

En su investigación concluye: La instalación de biodigestores domésticos es una importante fuente de producción de biogás, logrando disminuir la contaminación ambiental debido al control de los residuos orgánicos, además se logra reemplazar el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía (Arrieta, 2016).

Altamirano (2017) en el estudio “Potencial de producción energética de biogás a partir de los residuos pecuarios en la región libertad”. Para obtener el título de Ingeniero Agroindustrial, Trujillo, 2017.

Concluye que: Existe un alto índice de generación de biogás a partir de los residuos de la actividad pecuaria en la región Libertad, Perú. Dichos residuos podrían generar acerca de 817 178 221,8

m³ de biogás al año y con un potencial de producción energética anual de 1 470 920,81 MWh (Altamirano, 2017).

2.1.3 Contexto Local

Yauyo (2016) en el proyecto “Elaboración de un biodigestor piloto tubular para el manejo de estiércol porcino, en una de las viviendas de la asociación agropecuaria los lúcumos de Pachacamac. Para obtener el título de Ingeniero Ambiental, Villa el Salvador, Lima, 2016.

Donde concluye que: A través de un biodigestor tubular donde el proceso de digestión anaeróbica de excremento de ganado porcino dura 30 días, se puede producir biogás para cocinar o generar energía eléctrica, además de digestato que puede ser utilizado como fertilizante (Yauyo, 2016).

2.2 Desarrollo de la Temática Correspondiente al Tema Investigado

2.2.1 Energías renovables

Según la Osinergmin (2019), nos dice que “las energías renovables son toda forma de energía producida a partir de fuentes renovables y de manera sostenible” (p.23).

Las energías renovables son el tipo de energía más limpia que se puede generar sin causar grandes estragos al medio ambiente. Las fuentes de energías renovables se regeneran constantemente en la naturaleza, obteniendo una capacidad casi ilimitada de recursos para la generación de energía. Los diferentes tipos de energías renovables son: energía eólica, solar, de biomasa, hidráulica, geotérmica y marítima (Osinergmin, 2019).

Incrementando la participación de energías renovables podemos lograr una diversificación en la matriz energética de nuestro país, utilizando cada vez menos como fuente de energía los combustibles fósiles y así reducir las emisiones de CO₂.

2.2.1.1 Energía a Partir de la Biomasa. Se genera a partir de compuestos orgánicos, producto de procesos de la naturaleza.

La biomasa se clasifica en dos grupos: húmeda, donde la humedad es mayor al 60% y seca donde es menor al 60% (Secretaría de Energía, 2008b, citado en Osinergmin, 2019). La manera de generar energía de la biomasa húmeda es mediante procesos bioquímicos, como los aeróbicos y anaeróbicos, mediante los procesos termoquímicos, como lo son la combustión directa, la pirolisis o la gasificación es aprovechado la biomasa seca (Cerdá, 2012, citado en Osinergmin, 2019).

2.2.1.1.1 Procesos bioquímicos. En el caso del presente proyecto se va obtener energía a partir de biomasa por proceso bioquímico, gracias a microorganismos que descomponen la materia orgánica (Osinergmin, 2019). Los procesos bioquímicos se dividen en 2 grupos.

-Procesos anaeróbicos: Se descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno (O_2) logrando generar biogás, siendo compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Osinergmin, 2019).

-Procesos aeróbicos: La materia orgánica (caña de azúcar, maíz, yuca) es transformada en alcohol (Osinergmin, 2019).

2.2.2 Digestión Anaeróbica

El mecanismo predominante para la producción de biogás a partir de la biomasa es la digestión anaerobia o fermentación anaeróbica, que se debe de entender por un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos en ausencia de oxígeno.

2.2.2.1 Definición. Fernández (2016), nos dice que “la digestión anaeróbica, también conocida como metanización o producción de biogás, es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno” (p. 10).

Como resultado final de este proceso se obtiene, biogás, una mezcla de gases compuesto principalmente por metano (50-75 vol. %) y dióxido de carbono (25-50 vol. %). El biogás también contiene pequeñas cantidades de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros gases traza,

además se genera un efluente o también llamado digestato, utilizado como fertilizante pues es rico en sodio, fosforo y potasio (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010).

Los residuos de deyecciones de animales, vegetales, de la industria alimentaria, entre otros suelen ser utilizados como sustrato. También se puede combinar los residuos (codigestión) aumentando la producción de biogás (Fernández, 2016).

El proceso de digestión anaerobia reduce la concentración de la materia orgánica, disminuyendo la contaminación generada por la variedad de estos residuos, además disminuye los malos olores producidos por las deyecciones y reduce el contenido de microorganismos patógenos (Campos et al., 2004, citado en Fernández, 2016).

2.2.2.2 Fases de la Fermentación Anaeróbica. Este proceso consta de 4 etapas, las etapas son las siguientes: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

2.2.2.2.1 Fase de Hidrólisis. La hidrólisis es la primera etapa para la fermentación de la materia orgánica o sustrato que se va a utilizar para la digestión anaeróbica. Todo sustrato se compone principalmente de tres macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos, donde estas macromoléculas serán transformadas a partículas más pequeñas a través de las bacterias hidrolíticas (Cuesta et al., s.f.).

“El tiempo que demora la degradación de carbohidratos tiene lugar en unas pocas horas; mientras la de proteínas y lípidos tardan varios días” (Fernández, 2016, p. 131).

Un punto importante que se debe saber en esta etapa es la lenta degradación de los elementos lignocelulósicos (lignina, celulosa y hemicelulosa) debido a que aumenta el tiempo de la fase de hidrólisis (Fernández, 2016).

La rapidez de acción de las bacterias hidrolíticas, depende del aumento de la temperatura, pues si esta aumenta tomaría menos tiempo la degradación de las macromoléculas, obteniendo menores

tiempos de retención del sustrato y reduciendo el tamaño del reactor, siendo independientemente del sustrato a digerir (Fernández, 2016).

2.2.2.2.2 Fase Acidogénica. Los compuestos que se obtiene de la etapa de hidrolisis son divididos por las bacterias acidogénicas en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), alcoholes, amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010).

2.2.2.2.3 Fase Acetogénica: A través de las bacterias acetogénicas se generan los siguientes productos: ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, además se debe de vigilar constantemente la concentración de hidrógeno para evitar la formación de etanol y que el porcentaje de metano disminuya (FNR, 2010).

2.2.2.2.4 Fase Metanogénica. Es la etapa final de la digestión anaeróbica, encontrando dos tipos de microorganismos: las bacterias metanogénicas acetoclásicas que transforman el ácido acético a dióxido de carbono y metano, y las bacterias metanogénicas hidrogenófilas que degradan el hidrógeno y dióxido de carbono a metano y agua, el proceso químico de estas bacterias se presenta en la figura 2. Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas (Cuesta et al., s.f.).

“Este es un proceso lento y constituye la etapa de mayor tiempo del proceso de digestión anaeróbica” (Cuesta et al., s.f, p.22).

Figura 2

Descomposición de las Bacterias Metanogénicas



Fuente: tomada de (Cuesta et al., s.f.)

A consecuencia de que en el proceso de digestión anaeróbica intervienen bacterias con diferentes hábitats idóneos para su desarrollo, se debe de encontrar una solución tecnológica (FNR, 2010).

Para poder llevar un buen control de operación en el proceso de digestión anaeróbica, es fundamental conocer los parámetros ambientales y operacionales que pueden afectar dicho proceso (FNR, 2010), debido a lo antes mencionado por FNR (2010), el proceso deberá de constar de 2 etapas.

Sin embargo, si se desea llevar la digestión anaeróbica en una sola etapa se debe de considerar las condiciones óptimas para la fase metanogénica (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, Madrid, 2010).

2.2.2.3 Parámetros Ambientales.

-Valor de pH: “El intervalo de pH óptimo de los microorganismos hidrolíticos es entre 7,2 y 7,5, para los acetogénicos entre 7 y 7,2 y para los metanogénicos entre 6,5 y 7,5” (Cuesta et al., s.f., p. 23).

Cuando el proceso se realiza en una sola etapa se debe considerar un pH en el rango neutral de 6,5 a 8 para que se puedan desarrollar de manera óptima las bacterias que forman ácido acético y para las arqueas metanogénicas. El valor de pH se establece automáticamente en el proceso de digestión anaeróbica, si el proceso es alimentado con demasiado sustrato en un periodo demasiado corto el equilibrio de pH se puede ver afectado (FNR, 2010).

-Requerimiento de Nutrientes: Para poder llevar a cabo la fermentación anaeróbica además de una fuente de carbono y energía se necesita: macronutrientes, micronutrientes y vitaminas, donde su porcentaje en el sustrato utilizado afectara directamente a la rapidez de producción de biogás y a la estabilidad de funcionamiento en el reactor ((FNR), 2010).

Por lo tanto, es importante conocer la proporción C: N de los sustratos. Si esta proporción es demasiado elevada (mucho C, pero no mucho N), genera que el carbón presente en el sustrato no se transforme por completo. En cambio, un exceso de nitrógeno puede llevar a la formación de excesivas cantidades de amoníaco (NH_3), compuesto que inhibirá el crecimiento de las bacterias, impidiendo el

proceso de producción de metano, la proporción C: N del sustrato debe estar en el rango de 10:1-30:1 (FNR, 2010).

-Presencia de Tóxicos e Inhibidores: Existen diversas sustancias que suelen inhibir el proceso de digestión. Entre las sustancias inhibitorias tenemos el oxígeno, a pesar de que durante el proceso biológico de fermentación el porcentaje de oxígeno ira disminuyendo hay que tener en consideración su efecto inhibitorio. Otro factor a considerar es la biomasa a utilizar, porque si tiene un elevado contenido en nitrógeno, se genera un exceso de amoníaco que inhibe el proceso (Cuesta et al., s.f.).

Los inhibidores presentes en procesos de descomposición anaeróbica y sus concentraciones perjudiciales se presentan a continuación.

Tabla 1

Inhibidores Presentes en el Proceso de Descomposición Anaeróbica

Inhibidor	Concentración Inhibitoria	Comentarios
Oxígeno	>0,1 mg/L	Las bacterias anaeróbicas son inhibidas durante el proceso.
Amoníaco Libre	>200 mg NH ₃ /L y >1 100 mg NH ₃ /L en sistemas más aclimatados	El efecto inhibitorio aumenta a medida que el valor del pH y la temperatura se eleva.
Ácidos Grasos Volátiles	>2000 mg HAc/L	Al caer el pH el efecto inhibitorio aumenta
Sulfuro de Hidrógeno	>50 mg H ₂ S/L	Al caer el pH el efecto inhibitorio aumenta
Metales Pesados	Cu>50 mg/L Zn>150 mg/L Cr>100 mg/L	Sólo los metales disueltos tienen un efecto inhibitorio.

Fuente: Fernández (2016)

2.2.2.4 Parámetros Operacionales o de Funcionamiento. Estos parámetros hacen referencia a las condiciones de trabajo en los reactores.

-Temperatura: El proceso de digestión anaeróbica se puede llevar a cabo en diferentes rangos de temperaturas. En el rango termofílico es donde se genera la mayor producción de biogás y en un menor tiempo, a pesar de esto el rango mesofílico es el más utilizado, debido a que las bacterias que operan en un rango termofílico están expuestas a mayores variaciones debido a cambios de temperatura en el digestor, a pesar de que dichos cambios de temperatura sean mínimas, por lo que se necesitaría llevar un control permanente del sistema y esto significaría un mayor gasto (Cuesta et al., s.f.).

En la tabla 2 se presenta los intervalos de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaeróbicas.

Tabla 2

Intervalos de Temperaturas en el que Trabajan las Bacterias Anaeróbicas

Bacterias	Rango de Temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20°C	±2°C/hora
Mesofílicas	Entre 20°C y 40°C	±1°C/hora
Termofílicas	Más de 40°C	±0.5°C/hora

Fuente: Fernández (2016)

-Agitación: Es necesario mantener un grado de agitación adecuado para lograr un buen mezclado y homogeneización del sustrato, distribuir uniformemente el calor en todo el digestor logrando mantener la temperatura de operación y evitar la sedimentación del sustrato (Fernández, 2016).

-Tiempo de Retención Hidráulico (TRH): Se define como el tiempo que el sustrato está en el digestor antes de su descarga. Tenemos que tener en cuenta que el TRH depende del tipo de sustrato

y la temperatura. Operar el proceso en una mayor temperatura disminuirá el tiempo de retención necesario, consecuentemente, el volumen del reactor será menor (Cuesta et al., s.f.).

“El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de tratamiento, expresado en días” (FNR, 2010, p. 27).

El TRH se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V_R}{V} (d) \quad (1)$$

V_R : volumen del reactor (m^3)

V : volumen del sustrato añadido diariamente ($m^3/día$)

-Velocidad de Carga Orgánica (VCO): La velocidad de carga orgánica es un parámetro operacional importante, este parámetro en conjunto con el TRH, son los que determinarán el volumen del biodigestor (FNR, 2010).

La VCO indica cuantos kilogramos de sólidos volátiles (SV) o de sustrato seco puede alimentarse al reactor por m^3 de volumen de trabajo por unidad de tiempo. La tasa de carga orgánica se expresa como $kg\ SV / (m^3 \cdot d)$ (Fernández, 2016).

$$VCO = \frac{V \times [SV]_e}{V_R}; \left[\frac{kg\ SV}{m^3 \times d} \right] \quad (2)$$

V_R : volumen del reactor (m^3)

V : Caudal de tratamiento ($\frac{m^3}{d}$)

$[SV]_e$: Concentración de materia orgánica ($kg \frac{SV}{m^3}$)

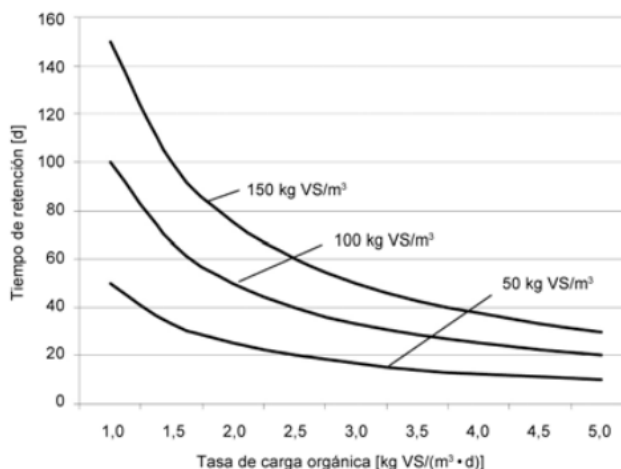
Valores demasiados bajos de **VCO** implican baja concentración del sustrato y/o elevado tiempo de retención, además de aumentar el tamaño de reactor, esto es representado en la figura 3.

El incremento no controlado de la VCO genera una reducción en la producción de biogás por unidad de sustrato introducido, por lo que se debe de encontrar un valor óptimo para cada instalación y sustrato a tratar (Fernández, 2016).

“Se acostumbra a trabajar con valores de carga orgánica no superiores a 3,5-4 kg SV/m³día” (Flotats et al., 2008 citado en Fernández, 2016, p. 20)

Figura 3

Correlación entre la Tasa de Carga Orgánica y el Tiempo de Retención Hidráulica para Diversas Concentraciones de Sustrato



Fuente: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2010)

2.2.2.5 Aspectos de la Digestión Anaerobia.

2.2.2.5.1 Características de los Sustratos Utilizados para la Digestión Anaerobia. Como ya se mencionó anteriormente el sustrato es el material orgánico que se utilizará para la generación de biogás a través de la digestión anaeróbica en un biodigestor. A continuación, se describen las características a tener en cuenta a la hora de la selección de un residuo o mezcla de residuos para su posible utilización como sustrato.

-Sólidos totales / Humedad

El contenido de sólidos totales (ST) es la parte seca o la cantidad de sólidos que contiene el residuo orgánico o sustrato que se utilizará para alimentar al reactor. El contenido de ST es muy variable y depende del origen del sustrato, el porcentaje óptimo de ST en la mezcla a digerir debe de ser del 10-15% (Fernández, 2016).

-Sólidos Volátiles / Biodegradabilidad

Los sólidos volátiles (SV) es la masa orgánica del sustrato a digerir, es muy importante conocer la cantidad de SV del sustrato, debido que solo este porcentaje produce biogás, el resto del sustrato es humedad, trazas inorgánicas y otras materias que no producen biogás (Fernández, 2016).

-Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es una medida que se puede utilizar para calcular el contenido de materia orgánica y compuesto oxidables en los diferentes sustratos. Se define como la cantidad de oxígeno necesario para oxidar completamente la materia orgánica de un residuo (Campos, 2001).

Entonces deducimos que existen 2 medias principales para calcular la cantidad de materia orgánica del sustrato a utilizar, mediante los SV y la DQO, pero la medida más exacta es la DQO, debido a que los SV modifican su concentración durante todo el proceso anaeróbico, en cambio, el oxígeno que ingresa en el reactor se mantiene constante (Fernández, 2016). El balance de DQO se muestra en la ecuación (3).

$$DQO_{entrada} = DQO_{digestato} + DQO_{CH_4} \quad (3)$$

2.2.2.6 Codigestión Anaerobia. En algunas ocasiones se opta por la co-digestión anaerobia de diferentes sustratos, logrando de esta manera mejorar el rendimiento de producción de biogás, entonces se define la co-digestión como la digestión anaerobio conjunto de residuos de diferente origen y composición (Flotats, et al., 2016).

A partir de la codigestión podemos obtener las siguientes ventajas: complementar las composiciones de diversos sustratos para generar procesos más eficaces, que dos o más sustratos compartan instalaciones para el proceso anaeróbico y disminuir los costos de inversión (Flotats, et al., 2016).

Los residuos ganaderos, suelen ser una excelente base para la codigestión ya que, presentan un elevado contenido de agua en comparación a otros residuos, una mayor capacidad de tampón y aportando una diversa cantidad de nutrientes necesarios para la digestión anaeróbica (Angelidaki y Ahring, 1997; Angelidaki y Ellegard, 2003, citado en Flotats, et al., 2016).

Hay que tener en cuenta que no todas las mezclas de sustratos pueden ser beneficiosas para el aumento de producción de biogás, se debe de tener cuidado con la selección adecuada de residuos para evitar la inhibición (Flotats, et al., 2016). En la tabla 3 se caracteriza la codigestión de diferentes residuos orgánicos.

Tabla 3

Caracterización Relativa para la Co-digestión de Diferentes Residuos Orgánicos

	Residuos Ganaderos	Lodos Depuración	Fracción Orgánica RES. MUN.	Residuos Industria Alimentaria
Micro y Macronutrientes	↑	↑	↑	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↓	↑
Capacidad Tampón (Alcalinidad)	↑		↑	↓

	Residuos Ganaderos	Lodos Depuración	Fracción Orgánica RES. MUN.	Residuos Industria Alimentaria
Materia Orgánica Biodegradable	↓	↑ ↓	↓	↑

Fuente: X. Flotats, E. Campos J. Palatsi y A. Bonmatí (2001)

2.2.2.7 Acondicionamiento del Sustrato Previo. Entre la variedad de residuos orgánicos aprovechables para ser degradados vía digestión anaerobia. Un porcentaje de ellos corresponden a residuos con un elevado contenido en sólidos, limitando la etapa de hidrólisis del proceso. Por lo tanto, existen pretratamientos previos al proceso de digestión, pretendiendo acercarse al potencial teórico del residuo a digerir y mejorando la eficiencia y la velocidad de la etapa de hidrólisis (Flotats, et al.,2016).

Los pretratamientos más utilizados se clasifican en 4 metodologías: métodos mecánicos, térmicos, químicos y biotecnológicos. A continuación se describirá el método mecánico y térmico pues son de los más utilizados en centrales.

2.2.2.7.1 Métodos Mecánicos. Con este método se reduce el tamaño de la partícula del sustrato, consiguiendo aumentar la DQO. Sin embargo, los pretratamientos mecánicos, pueden presentar elevados consumos energético (Flotats, et al.,2016).

Las tecnologías disponibles son las siguientes:

-Ultrasonidos: Logran aumentar en un intervalo de 24% y el 138% la producción de biogás de (Flotats, et al., 2016).

-Molinos de Bolas: la reducción del tamaño del sustrato se da mediante la rotación de cilindros, que contienen bolas. Logrando aumentar la producción de biogás de entre 10% y el 88% (Baier y col., 1997; Kopp y col., 1997 citado en Flotats, et al., 2016).

2.2.2.7.2 Métodos Térmicos. Permite facilitar la degradación de algunas macromoléculas, para reducir o eliminar agentes indeseables (Fernández, 2016).

2.2.3 Biogás

2.2.3.1 Definición. El biogás es uno de los productos generados en la digestión anaeróbica, se obtiene a partir de la biomasa, tales como: residuos agrícolas, residuos urbanos y residuos de las industrias de alimentos.

El biogás se origina a partir de la digestión anaeróbica, siendo compuesto principalmente por metano (50-75 vol. %) y de dióxido de carbono (25-50 vol. %).

Además de los gases antes mencionados el biogás contiene pequeñas cantidades de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros gases en pequeñas cantidades. La composición del biogás depende de los sustratos utilizados para la fermentación y del sistema de digestión anaeróbica (FNR, 2010).

El poder calorífico del biogás depende del porcentaje de metano que se encuentra en este, variando de 4 700 a 5 500 kcal /m³ o de 5 a 7 kWh/m³ (Moncayo Romero, 2013 citado en Ojeda, 2019).

En la tabla 4 se realiza la comparación de los valores caloríficos de diferentes combustibles.

Tabla 4

Comparación de Valores Caloríficos para Diferentes Combustibles

Combustible	Valor Calorífico Aproximado
Petróleo	45,21 MJ/Kg
Gas Natural	36 MJ/Kg
Gas Natural Licuado	55,14 MJ/Kg
Keroseno	43,12 MJ/Kg
Diésel	44,79 MJ/Kg
Biogás	23 MJ/Kg

Fuente: Briseño (2017)

2.2.3.2 Composición del Biogás. Como ya se mencionó anteriormente la composición de biogás dependerá de los sustratos utilizados para la descomposición y las condiciones del proceso, por lo que se puede obtener biogás de diferentes sustratos (Cuesta et al., s.f.). A continuación, se describen los sustratos que se podrían utilizar para la generación de biogás.

-Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU): Son los componentes que se producen en la zona urbana, como, por ejemplo: la materia orgánica, papel y cartón, plásticos, vidrio, metales, material textil y madera (Cuesta et al., s.f.).

-Lodos o Fangos de Depuración de Aguas Residuales Urbanas: están compuestos por el residuo semisólido que se genera en el proceso de depuración de las aguas residuales de la urbe, además de ser ricos en nutrientes (N, P y K) (Cuesta et al., s.f.).

-Aguas residuales Industriales: Las aguas residuales se originan de diversos procesos industriales donde se emplea el agua para fines muy variados, por lo tanto, la composición de los efluentes industriales es muy variado, dependiendo de las características de cada industria (Cuesta et al., s.f.).

-Residuos Agrícolas y Ganaderos: Los residuos agropecuarios son una fuente importante para la producción de biogás, en Europa son utilizados como sustratos en la mayoría de plantas instaladas. El aumento de la actividad ganadera ha generado grandes volúmenes de residuos orgánicos, siendo el purín principal sustrato utilizado para la producción de biogás (Cuesta et al., s.f.).

Por lo general la composición de los purines suele ser muy heterogénea, puesto que depende principalmente de la especie, edad y tipo de alimentación (Ferrer y Sanz, 1983 citado en Cuesta et al., s.f.).

-Residuos Orgánicos Industriales: Son los residuos orgánicos generados en la industria alimentaria, por ejemplo: industrias cerveceras, de conservas, lácteas, pesqueras, etc. (Cuesta et al., s.f.). En la tabla 5 se presenta los residuos orgánicos que se pueden utilizar en una central de biogás.

Tabla 5*Residuos Orgánicos Potencialmente Utilizables en una Planta de Biogás*

Agricultura	Industria Alimentaria	Otras Industrias	Comunidades
	Conservas		
	Cerveza	Biodiesel	
Granja de cerdos,	Bebidas lácteas	Bioetanol	FORSU
ganado vacuno y de	Pescado	Biorefinerías	Restaurantes
Aves.	Azucareras	Bioquímica	Mercados
	Almidón	Farmacéutica	EDARS urbanas
	alimentarias		

Fuente: Fernández (2016)

Como se ha explicado anteriormente, la composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En la tabla 6 se muestra los valores medios de composición del biogás en función del sustrato utilizado.

Tabla 6*Componentes del Biogás en Función del Sustrato Utilizado*

Componente	Residuos Agrícolas	Lodos de Depuradora	Residuos Industriales	Gas de Vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de Carbono	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	saturado	saturado	saturado	saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Componente	Residuos Agrícolas	Lodos de Depuradora	Residuos Industriales	Gas de Vertedero
Sulfuro de Hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0,5-100 ppm
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de Carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%

Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm*

Nota. * terpenos, esteroides..., recuperado de Cuesta et al., s.f.

En la tabla 7 se presenta la composición media del biogás:

Tabla 7

Composición del Biogás

Composición del Biogás	(%)
Metano, CH ₄	50-75
Dióxido de Carbono, CO ₂	25-45
Vapor de Agua, H ₂ O	1-2
Monóxido de Carbono, CO	0-0,3
Nitrógeno, N	1-5
Hidrógeno, H ₂	0-3
Sulfuro de Hidrógeno, H ₂ S	0,1-0,5
Oxígeno, O ₂	0,1-1

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010)

2.2.3.3 Uso Energético. El biogás producido en la fermentación anaeróbica puede ser utilizado en diversos usos, en función de estos varía los requerimientos de tratamiento. A continuación (Flotats, et al., 2016), se presentan los usos energéticos que se le da al biogás.

-Biogás para la Producción de Calor: Es el uso más simple que se le puede dar al biogás, necesitando menores requerimientos de calidad, este biogás se suele usar en caldera, produciendo agua caliente o vapor. A pesar de los pocos requerimientos para su posterior uso, se debe tener en cuenta la eliminación del ácido sulfúrico para prevenir una corrosión severa y el vapor de agua para evitar complicaciones con la boquilla del quemador (Flotats, et al., 2016).

-Cogeneración Eléctrica y Térmica: La generación de energía eléctrica se realiza principalmente en instalaciones compuestas por un motor de combustión interna (M.C.I), un alternador e

intercambiadores de calor, pero también se puede producir biogás a partir de turbinas o microturbinas, aunque esta tecnología es poco utilizada debido a que se diseñan para potencias altas de 5MW hasta varios centenares de MW (Flotats, et al., 2016).

Las instalaciones con M.C.I se diseñan para potencias eléctricas que van desde 30Kw hasta 3MW. Con un rendimiento eléctrico de 30-40%, térmico de 45-60%, y un rendimiento global energético que puede llegar hasta el 90% (Flotats, et al., 2016).

En la tabla 8 se presenta las especificaciones de calidad del biogás para usos en motores de combustión interna y microturbinas.

Tabla 8

Especificaciones de Calidad del Biogás para usos en Motores de Combustión Interna y Microturbinas

	Motores de Combustión Interna	Microturbinas
	Condiciones de Alimentación	
Presión del Gas	20 mbar	3,44-5,17 mbar
Poder Calorífico (MJ/Nm ³)	14,9-44,7	13,1-44,7
Temperatura (°C)	-28,8-60	0,6-46,1
Concentraciones Máximas Admisibles de Contaminantes		
Humedad (Temperatura de rocío)	<T-6,7 °C	<T-6,7 °C
H ₂ S (ppmv respecto CH ₄)	542-1 742	25-450*
Siloxanos (ppmv respecto CH ₄)	9-44**	0,005
Hidroc. Halogenados (ppmv de CL en CH ₄)	60-491	200
Partículas (µm, tamaño máximo)	5	3

Nota. *Bailón y Hinge (2012) referencian valores máximos muy superiores para un fabricante

** Concentración como Si, tomado de Flotats, et al. (2016)

-Inyección a la Red del Gas Natural y Combustible de Vehículos: La red de gas natural ofrece un gran potencial para el uso del biogás, pero antes de inyectar el biogás a la red se debe depurar a calidad de biometano (Flotats, et al., 2016).

Al inyectar el biogás a la red puede sustituir al gas natural en cualquier equipo conectado que lo consuma. Para poder inyectar el biogás a la red, se debe de cumplir un porcentaje de calidad mínima, dependiendo de la normativa en cada país (Flotats, et al., 2016).

El proyecto BIOGASMAX (Zinm y col., 2010 citado en Flotats, et al., 2016) propuso los valores estándar que se debe de tener en cuenta en una posible normativa europea, en la tabla 9 presentamos los valores.

Tabla 9

Propuesta de Valores de Calidad de Biometano para su Inyección a la Red en Europa

Parámetro	Unidades	L-Gas	H-Gas
Índice de Wobbe	Kwh m ⁻³	10,86 - 12.44	12,69 – 15,19
	MJ m ⁻³	39,1 – 44,8	45,7 – 54,7
Poder Calorífico	Kwh Nm ⁻³	8,4 – 13,1	
	MJ Nm ⁻³	30,2 – 47,2	
Densidad Relativa	-	0,55-0,75	
CO ₂	% vol.	≤ 11	≤ 6
Temperatura Condensación de hidrocarburos (sin CH ₄)	°C	La temperatura del suelo (dependiendo de la presión de la conducción de gas)	
Humedad (Punto de Rocío)	°C	La temperatura del suelo	
Partículas, Polvo	-	Libre de partículas	
O ₂	% vol.	≤ 3	
Azufre (total)	mg S Nm ⁻³	≤ 30	
Tetrahidrotiofeno	mg Nm ⁻³	15 - 40	
H ₂ S	mg Nm ⁻³	≤ 5	
H ₂	% vol.	≤ 10	
NH ₃	mg Nm ⁻³	≤ 3 - 20	
Parámetros Adicionales, Dependiendo del Origen (Vertedero, Lodos,...)			

Siloxanos (como Si)	mg Nm ⁻³	≤ 10
F	mg Nm ⁻³	≤ 10- 25
Cl	mg Nm ⁻³	≤ 1- 50
Hg	μg Nm ⁻³	≤ 1

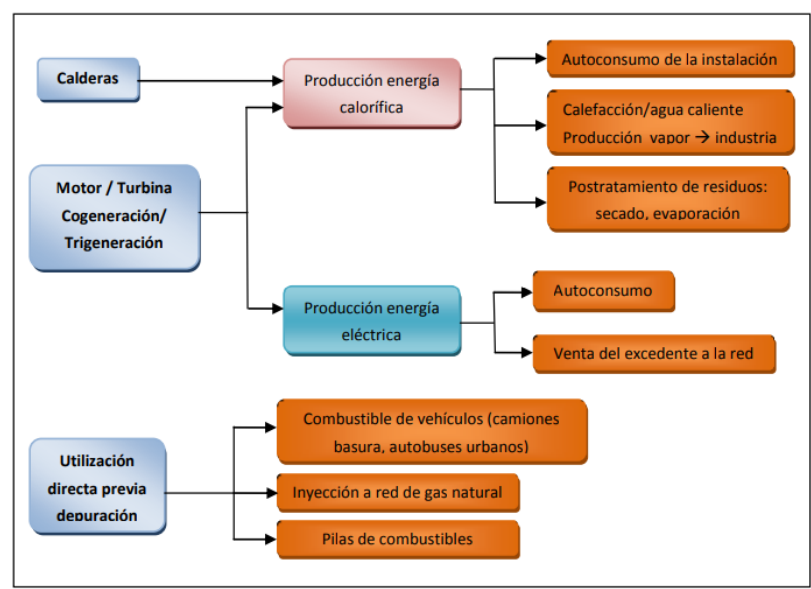
Fuente: Flotats, et al. (2016)

-**Pilas de Combustibles:** Otro uso que se le puede dar al biogás previo tratamiento es el de las pilas de combustibles, también llamadas pilas de hidrógeno, son sistemas que generan electricidad en corriente continua mezclando combustible y O₂ (aire) en una reacción electrolítica (Fernández, 2016).

En la figura 4 se resume los diferentes usos energéticos del biogás.

Figura 4

Aprovechamiento Energético de Biogás



Fuente: (Fernández, 2016)

Acondicionamiento del Biogás: debido a los diversos usos energéticos del biogás, es necesario acondicionar el biogás, para cumplir los requerimientos en estas aplicaciones. Dependiendo del uso final, es necesario una limpieza o acondicionamiento del combustible más o menos refinada (Fernández, 2016).

En la siguiente tabla se resume las diferentes sustancias contaminantes y sus efectos adversos:

Tabla 10

Sustancias Contaminantes en el Biogás y sus Efectos

Sustancias Contaminantes en el Biogás y sus Efectos	
Sustancias	Efectos
H ₂ S	Efecto corrosivo
	Efecto tóxico
	Formación de Ácido sulfúrico
Agua	Se forma soluciones ácidas
CO ₂	Se reduce el poder calorífico
Partículas	Sedimentación y obturación
NH ₃	Durante la combustión se produce óxido de nitrógeno

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (2010)

A continuación, presentamos los métodos de tratamiento del biogás según sus contaminantes:

2.2.3.3.1 Eliminación de Agua: El biogás al salir de los reactores saturado o casi saturado de vapor de agua, disminuye el potencial calorífico del gas, además genera corrosión en las tuberías y otros equipos de las instalaciones (Flotats et al., 2016).

Los métodos utilizados para la eliminación de agua son: métodos físicos y químicos de secado (Fernández, 2016).

2.2.3.3.2 Eliminación del H₂S. En el biogás producido siempre se encontrará presente el sulfuro de hidrogeno (H₂S), a diferentes concentraciones dependiendo del sustrato a digerir. La eliminación de H₂S se puede producir durante la digestión anaerobia (digestor) o después de la digestión, cuando ya se obtuvo el biogás (Flotats et al., 2016).

2.2.3.3.3 Eliminación del CO₂. La eliminación del CO₂ se realiza solamente cuando se quiere obtener biometano, de todos los tratamientos de purificación de biogás, este es el más costoso de inversión y operación, además la eliminación de CO₂ aumenta el poder calorífico del biogás (Fernández, 2016).

2.2.4 Digestato

En el proceso de digestión anaerobia, además de producir biogás a partir de diversos residuos orgánicos, también se origina un material residual digerido, llamado digestato, el cual es descargado como lodo-líquido con la posibilidad de ser utilizado como fertilizante (Fernández, 2016).

Su composición depende de diversos factores como: el tipo de tecnología utilizada, los residuos orgánicos utilizados y el tiempo de retención en el reactor (Fernández, 2016).

Al igual que los residuos orgánicos no digeridos, el digestato puede ser utilizado como abono, pero con una menor liberación de metano al ambiente, debido a que todo ese metano fue digerido en el proceso de digestión. Además, las tierras de cultivo pueden aprovechar mucho más rápido los nutrientes, debido al proceso previo de digestión, generando menos olores (FNR, 2010).

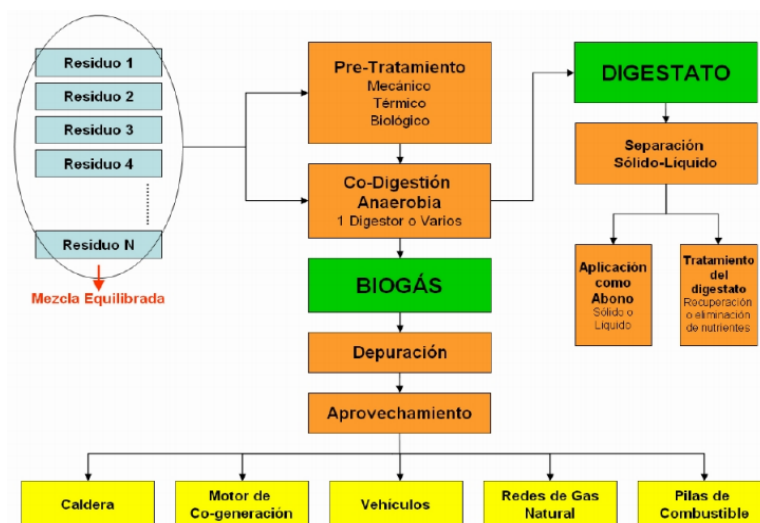
2.2.4.1 Usos del Digestato. Dentro de los posibles destaca la aplicación como abono, generando un valor adicional en los cultivos para el aprovechamiento de sus nutrientes y poder preparar productos fertilizantes a partir del digestato con un valor añadido (Fernández, 2016).

2.2.5 Plantas de Biogás

Una planta de biogás es un conjunto de instalaciones con el objetivo de producir, almacenar y suministrar biogás, para uso y consumo del mismo, teniendo como instalación principal a los biodigestores. En la figura 5 se presenta un esquema del flujo de una planta de biogás:

Figura 5

Diagrama de Flujo de una Planta de Biogás Agroindustrial



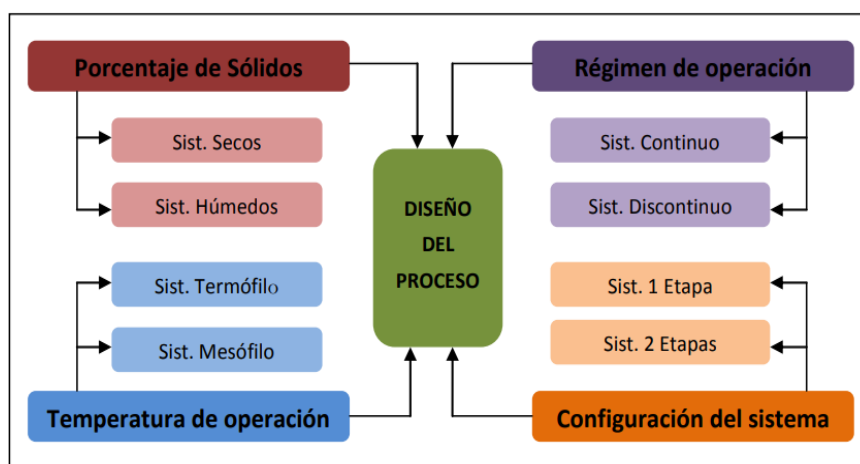
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010)

2.2.5.1 Sistemas de Digestión Anaeróbica. Como ya se mencionó anteriormente hay diversos procesos para llevar a cabo la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, estos procesos pueden clasificarse en función de: el porcentaje de sólidos totales (ST) en el sustrato a través de una digestión húmeda o seca, el régimen de operación del digestor pudiendo tener una operación continuo o discontinuo, la temperatura de operación del digestor y la configuración del sistema (Cuesta et al., s.f).

En la figura 6 se presenta un resumen de los diferentes sistemas de la digestión anaeróbica:

Figura 6

Clasificación de los Sistemas de Digestión Anaerobia



Fuente: Fernández, 2016

A continuación, se describirá los diferentes sistemas de digestión anaeróbica:

2.2.5.1.1 Según el Porcentaje de Sólidos Totales (ST) en el Residuo Orgánico:

La tecnología de digestión anaerobia según el porcentaje de ST se desarrolla a través de los procesos de digestión húmeda y de digestión seca.

-Digestión húmeda: En este tipo de digestión, el residuo se diluye hasta una concentración máxima del 15% en ST, aunque mayormente la digestión húmeda está en un rango 7% a 12% de ST (De Baere, 2006, citado en Cuesta et al., s.f)

-Digestión seca: Se realiza la digestión anaeróbica de sustratos con una concentración mayor del 15% de ST, trabajando mayormente en un rango comprendido entre el 20-40% (De Baere, 2006, citado en Cuesta et al., s.f).

2.2.5.1.2 Según el régimen de operación del digestor. El tipo de alimentación al digestor es determinado en gran medida por la disposición de sustrato a digerir.

-Régimen continuo: En este sistema el digestor opera en régimen estacionario, es decir, que el sustrato fresco entra de forma continua al digestor, al mismo tiempo que el digestato y biogás son retirados del reactor. En el mundo el régimen de operación continuo es el más utilizado (Vandevivere et al., 2002, citado en Cuesta et al., s.f)

-Régimen discontinuo: operan en un régimen no estacionario, es decir, se realiza la carga de los residuos orgánicos, se cierra el digestor, se espera el tiempo para la digestión del sustrato ingresado y finalmente se descarga una vez que se haya obtenido el biogás, volviendo a repetir todo el proceso (Fernández, 2016).

2.2.5.1.3 Según la Temperatura de Operación.

-Sistemas mesofílicos: La digestión anaeróbica se lleva a cabo en un rango de temperatura de 35-40 °C. A nivel mundial las centrales de biogás operan mayormente a temperaturas mesofílicas (Vandevivere et al., 2002, citado en Cuesta et al., s.f).

Tienen un tiempo de retención hidráulico (TRH) mayor a sistemas termofílicos, pero soportan mayores cambios de funcionamiento en la digestión y el consumo de energía es menor (Fernández, 2016).

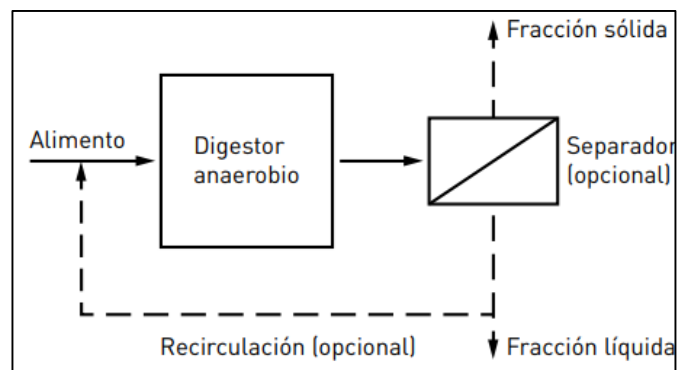
-Sistemas termofílicos: En este sistema opera en un rango de temperatura de 50-55 °C. Se caracteriza por tener un corto tiempo de digestión, es decir un bajo TRH, pero la operación en un rango termofílico es menos estable que en el rango mesofílico (Fernández, 2016).

2.2.5.1.4 Según la Configuración del Sistema.

-Sistema de una sola etapa: En este sistema las 4 fases de la digestión anaeróbica se desarrollan en un solo reactor, como ya se sabe las condiciones óptimas de operación para cada fase son diferentes, se desarrolla el sistema en una condición de equilibrio para las 4 fases, priorizando las condiciones de la metanogénesis (Fernández, 2016). En la figura 7 se presenta el diagrama de un sistema de una sola etapa.

Figura 7

Diagrama de Flujo del Sistema de una sola Etapa

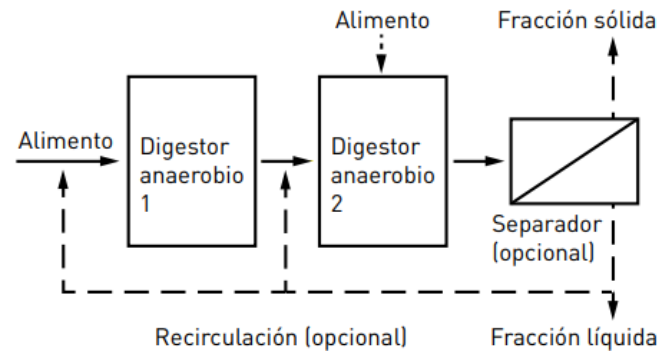


Fuente: IDAE, 2011

-Sistema de dos etapas: La configuración del sistema consta de 2 reactores que operan en serie. En el primero digestor se lleva a cabo en mayor parte la hidrólisis y en el segundo la metanogénesis. Al tener 2 digestores se obtiene condiciones distintas de Ph, temperatura, redox, etc. Logrando un trabajo optimo en cada etapa de la digestión (IDAE, 2011). En la siguiente figura se presenta el diagrama de un sistema de dos etapas:

Figura 8

Diagrama de Flujo del Sistema de dos Etapas



Fuente: IDAE, 2011

2.2.5.2 Biodigestor. También llamado reactor o digestor es el elemento más importante de toda la instalación. Dentro del digestor se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia, existen diversos tipos de digestores, cada tipo de digestor supone diferencias en cuanto simplicidad, productividad, etc., que son analizados según las especificaciones requeridas para el proceso (Fernández, 2016).

A continuación, se presenta la tabla 11 con la clasificación de los digestores que se utilizan actualmente:

Tabla 11

Clasificación de los Reactores de Digestión Anaerobia

Estado de la materia	Reactor	Aplicación
Suspendida	Mezcla completa	Residuos, Aguas residuales
	Mezcla completa con recirculación biomasa	Residuos, Aguas residuales
	Flujo piston	Residuos, Aguas residuales
Fijada	Filtro anaerobio de flujo ascendente	Aguas residuales
	Filtro anaerobio de flujo descendente	Aguas residuales
	Lecho fluidizado	Aguas residuales
Retenida	Lecho de lodos (UASB)	Aguas residuales

Estado de la materia	Reactor	Aplicación
	Lecho de lodos expandidos (EGSB)	Aguas residuales
	Lecho de lodos multifásico	Aguas residuales
Otros	Sistemas discontinuos	Residuos sólidos

Fuente: Fernández (2016)

A continuación, se realizará solo la descripción de los reactores mezcla completa y flujo pistón, debido a que son las tecnologías más empleadas para la digestión anaerobia de residuos agroindustriales (Fernández, 2016).

-Biodigestor de mezcla completa

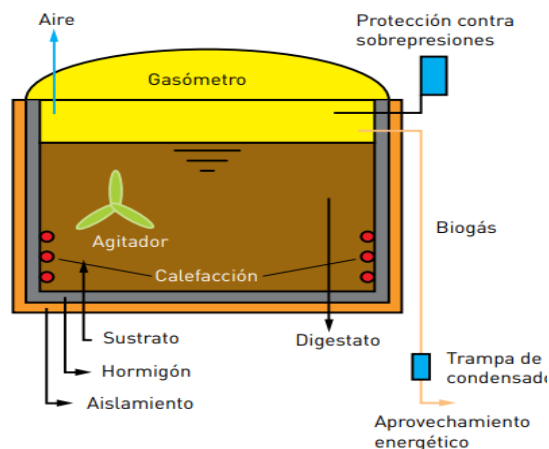
Es el biodigestor más simple, y mayormente utilizado en el proceso de digestión anaerobia en las centrales de biogás agroindustrial en Europa, debido a su simplicidad, buen funcionamiento y coste reducido. Regularmente son reactores cilíndricos verticales, contruidos en hormigón, logran mantener la temperatura y homogeneidad del sustrato debido a que el volumen de los digestores no supera los 2500 m³ (IDAE, 2001).

La alimentación de sustrato al reactor se puede dar en un régimen continuo o discontinuo y con un porcentaje menor de 10% de sólidos totales (ST), es decir por vía húmeda. Las desventajas que se pueden presentar este reactor son: el tiempo de retención hidráulico (TRH) siendo mayor que en el digestor flujo-pistón, posible formación de costra además del mantenimiento del sistema de agitación y calefacción, debido a que se debe de vaciar todo el reactor (IDAE, 2001).

En la figura 9 se presenta el diagrama de un biodigestor de mezcla completa.

Figura 9

Diagrama de Biodigestor de mezcla completa



Fuente: IDAE, 2011

En la siguiente tabla se presenta las propiedades de los reactores de mezcla completa:

Tabla 12

Propiedades de los Biodigestores de Mezcla Completa

Características	Logran alcanzar un tamaño de 6 000 m ³ , a mayor volumen se dificulta el control del sistema, además casi siempre son de concreto o acero.
Conveniencia	Son mayormente utilizados para sustratos con bajo o mediano contenido de materia seca. Especializado para tratar con sistemas de alimentación continua, semi-continua e intermitente.
Ventajas	A partir de 300 m ³ el diseño del digestor es más económico. Se puede iniciar el proceso de digestión sin la necesidad de vaciar completamente el digestor.
Desventajas	Riesgo de formación de capas de escoria y sedimento.
Diseños	Son tanques cilíndricos verticales

Fuente: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

-Biodigestor Flujo Pistón

Estos reactores son cilíndricos o paralelepípedicos contruidos en hormigón o acero, en la mayoría de casos con una capacidad de hasta 1 000 m³, con un sistema de alimentación de sustrato continua o semicontinua. Además, las concentraciones de ST en el flujo pistón son mayores que en biodigestores de mezcla completa, operando con concentraciones de (20-40%) ST (IDAE, 2011). El biodigestor flujo pistón presenta la siguientes ventajas y desventajas:

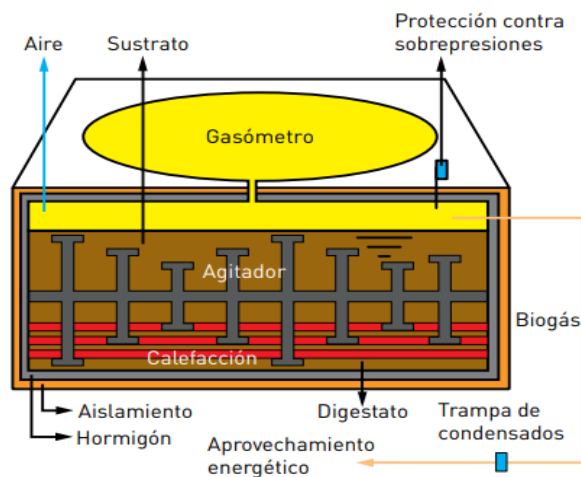
-Ventajas: Menor TRH a comparación de los reactores de digestión completa y una mejor eficiencia de calefacción a comparación de biodigestores de mezcla completa de la misma eficiencia (IDAE, 2011).

-Desventajas: Se genera una mayor inversión de dinero en comparación a los digestores de mezcla completa de la misma eficiencia y volumen (IDAE, 2011).

En la siguiente figura se presenta un diagrama de un biodigestor flujo pistón.

Figura 10

Diagrama de Biodigestor Flujo Pistón



Fuente: IDAE,2011

Tabla 13*Propiedades de los Biodigestores Flujo Pistón*

Valores característicos	Diseñados horizontalmente con una capacidad de hasta 800 m ³ y verticales hasta 2 500 m ³ , hechos generalmente de acero o concreto armado.
Conveniencia	Para bombear sustratos con bajo contenido de materia seca (digestión húmeda). Se adapta para el transporte y agitación del sustrato con algo contenido de materia orgánica (digestión seca) Adaptable para un sistema de alimentación semi-continua o continua.
Ventajas	Costo de diseño reducido. Las fases de la digestión son divididas. Se elimina el riesgo de formación de escoria. El tiempo de retención es corto. Debido a su diseño compacto las pérdidas de calor se minimizan.
Desventajas	Es necesario un gran espacio para la instalación del digestor. Es económico solamente a pequeña escala. Es necesario vaciar completamente el digestor si se requiere dar mantenimiento.
Diseños	Los reactores son diseñado mayormente horizontales, pero también suelen ser verticales. No es necesario un sistema de mezclado.

Fuente: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

2.2.5.2.1 Calefacción del Digestor. La temperatura del reactor tiene que ser constante para lograr un proceso óptimo para la digestión del sustrato, por lo que se debe de tener cuidado en mantener los cambios de temperatura dentro de los rangos permisibles (FNR, 2010)

Lo que ocasiona los cambios de temperatura dentro de los reactores es: la inyección de sustrato fresco, mal diseño del aislamiento térmico, una extrema temperatura ambiental y fallas en el funcionamiento general del reactor (FNR, 2010).

Para conseguir la temperatura idónea para llevar un proceso óptimo de digestión y compensar las pérdidas de calor por los diversos factores antes mencionados, es necesario calentar el sustrato antes

de ser ingresado al digestor. El sustrato puede ser calentado a través de intercambiadores de calor o calentadores (FNR, 2010).

- Calentadores integrados: se calienta el sustrato dentro del digestor, en la siguiente tabla se presentan las características y parámetros de este proceso.

Tabla 14

Valores Característicos y Parámetros del Proceso de los Sistemas Integrados de Calentamiento

Conveniencia	Para digestores de concreto se utilizan calentadores en la pared Calentador en el piso: todos los digestores verticales. Para todo tipo de digestor en especial los de diseño vertical.
Ventajas	Los calentadores integrados entran en contacto con más sustrato
Desventajas	El calentamiento por el piso puede verse afectado por la formación de asentamientos del sustrato.
Diseños	Suelen ser instalados en el piso o la pared de los digestores
Mantenimiento	Se debe realizar una constante limpieza a los calentadores para asegurar que proporcione el calor necesario al sustrato.

Fuente: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

- Intercambiadores de calor: el sustrato es calentado antes de ser introducido al reactor, a evitando variaciones de temperatura debido a la alimentación del sustrato (FNR, 2010).

En la tabla 15 se presenta las propiedades de los intercambiadores de calor externo.

Tabla 15*Valores Característicos y Parámetros del Proceso de los Intercambiadores de Calor Externo*

Conveniencia	Su uso es conveniente con todos los tipos de digestores, frecuentemente en aquéllos utilizados en reactores que operan sobre el principio de flujo de pistón
Ventajas	Se puede asegurar muy buena transferencia del calor. El sustrato por ingresar no producirá cambios en la temperatura del digestor. Fácil mantenimiento.
Desventajas	Debido a ser un equipo extra representa más costo.
Consideraciones especiales	Mayormente utilizados para rangos termofílicos.

Fuente: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

2.2.5.2.2 Transferencias de Calor en el Digestor. La transferencia de calor se origina a partir del intercambio de energía entre dos cuerpos a diferente temperatura (Soncco, 2019).

Cárdenas (2019), nos dice que: “La transferencia de calor ocurre a partir de los procesos de conducción, convección, radiación o combinación de ellos” (p. 47).

-Transferencias de calor por conducción: las pérdidas de calor por conducción se generan a partir de la interacción entre cuerpos (sólido, líquido y gas) a distintas temperaturas, existiendo un gradiente de temperatura, donde el calor fluye de la región de mayor temperatura hacia la región de menor temperatura, es por esto el signo negativo en la ecuación 4, las pérdidas de calor por conducción se evalúan a través de la ley de Fourier (Soncco, 2019).

$$q_{cond} = -k_{cond}A \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

A: Área de la sección a través de la cual fluye el calor por conducción.

$\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura.

k_{cond} : Conductividad térmica del material ($\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$).

Para calcular las pérdidas de calor en un cilindro, conviene utilizar la ecuación de la Place en coordenadas cilíndricas, para un régimen estacionario, es decir, cuando la temperatura es independiente del tiempo. Puesto que la transferencia por conducción depende de la geometría y del sistema de coordenadas, se recomienda reemplazar los términos de conducción de calor con el operador laplaciano (Cárdenas, 2009).

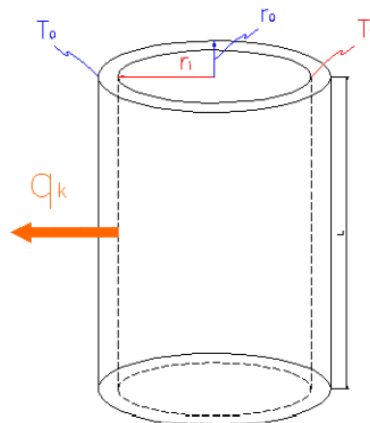
$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}_G}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Al realizar un análisis de un cilindro sin generación propia de calor e idealizándolo como se muestra en la figura 11, se determinará la transferencia de calor a lo largo del cilindro hueco de longitud L , con una temperatura interior T_i y exterior T_o (Cárdenas, 2009). La ecuación de la transferencia de calor queda de la siguiente manera:

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} = -k(2\pi L) \frac{C_1}{r} = 2\pi Lk \frac{T_i - T_o}{\ln \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad (6)$$

Figura 11

Conducción radial del calor



Fuente: (Cárdenas, 2009)

En función de la resistencia térmica se escribe:

$$q_{cond} = \frac{T_i - T_o}{R_{th}} \quad (7)$$

Donde $R_{th} = \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi Lk}$ es la resistencia al flujo de calor por conducción a través de un cilindro de longitud L, radio interior y exterior r_i y r_o , respectivamente (Frank Kreith, mark S Bohn, 2001, citado en Cárdenas, 2009)

-Transferencia de calor por convección: Cárdenas (2009), nos dice que: “La convección es la transferencia de calor a partir de un fluido con un movimiento masivo de éste” (p. 52).

La transferencia por convección se puede clasificar en natural y forzada, en este último el fluido es obligado a fluir mediante algún medio externo. Además, la rapidez de transferencia de calor a partir de un fluido es mayor por convección que por conducción (Cárdenas, 2009).

Cárdenas (2009), menciona que: “La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto y del tipo de flujo” (p.52). Donde h representa la influencia de estas propiedades, además la convección se centra en la diferencia de temperatura entre una superficie y el fluido, siendo modelado matemáticamente mediante la ley de enfriamiento de Newton, que se plantea en la ecuación 8 (Cárdenas, 2009).

$$q_{conv} = hA_s(T_s - T_F) = \frac{(T_s - T_F)}{\frac{1}{h}A_s} \quad (8)$$

Donde:

h : Coeficiente de intercambio por convección ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

T_s : Temperatura de la superficie en contacto.

T_F : Temperatura del fluido.

$\frac{1}{h}A_S$: resistencia a la transferencia de calor por convección.

Al realizar el análisis de la convección natural sobre alguna superficie, se puede simplificar dicho análisis, considerando un cilindro como una placa vertical, esto sucede cuando el diámetro de la superficie exterior del cilindro es lo suficientemente grande (Cárdenas, 2009).

Se puede combinar la transferencia de calor por conducción y convección mediante un coeficiente global de transferencia de calor U , definido por la siguiente ecuación 9 (Cárdenas, 2009).

$$q = UA\Delta T \quad (9)$$

Donde:

q : transferencia de calor por conducción y convección.

U : coeficiente global de transferencia de calor

A : área donde se realiza el flujo de calor.

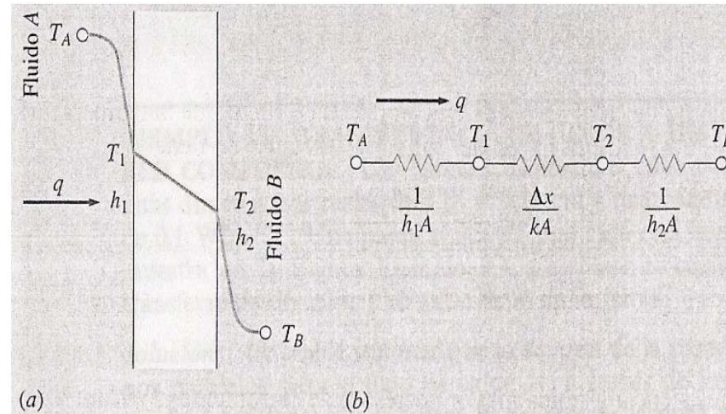
ΔT : diferencia de temperatura de dos fluidos en contacto con una superficie.

Considerando una superficie plana como en la figura 12, donde entra en contacto una cara con un fluido frío B y la otra con un fluido caliente A, la transferencia de calor se puede expresar mediante la ecuación 10 (Cárdenas, 2009).

$$q = h_1A(T_A - T_1) + \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2) + h_2A(T_2 - T_B) \quad (10)$$

Figura 12

Transferencia de Calor Global a Través de una Pared Plana



Fuente: (Cárdenas, 2009).

La transferencia de calor por convección y conducción se puede representar como el circuito de resistencias de la figura 12, calculando la transferencia de calor global mediante la siguiente ecuación (Cárdenas, 2009).

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (11)$$

Siendo:

T_A : temperatura del fluido A.

T_B : temperatura del fluido B.

$\frac{1}{h_1 A}$: resistencia del fluido A.

$\frac{\Delta x}{k A}$: resistencia de la superficie.

$\frac{1}{h_2 A}$: resistencia del fluido B.

De las ecuaciones 10 y 11 se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor U .

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (12)$$

h_1 : coeficiente de convección la pared con el fluido A.

Δx : espesor de la superficie.

k : coeficiente de conducción de la pared.

h_2 : coeficiente de convección de la pared con el fluido B.

- Transferencia de calor por radiación: en este tipo de transferencia de calor la energía térmica es emitida en forma de ondas electromagnéticas (fotones), esto se da en todos los cuerpos debido a su temperatura, se considera el medio de transferencia de energía más rápido (Valera Palacios, 2007, citado en Soncco, 2019).

De acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann, desde una superficie a una temperatura T_s , la radiación máxima que se emite se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Cárdenas, 2009).

$$Q_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (13)$$

Donde:

σ : $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$ (constante de Stefan-Boltzmann).

A_s : área superficial (m^2).

T_s : temperatura superficial del cuerpo (K).

En la ecuación 14 se considera una superficie ideal que emite su máxima radiación, también llamado cuerpo negro. Sin embargo, la radiación real de una superficie cualquiera es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura, la radiación real se expresa mediante la siguiente ecuación (Cárdenas, 2009).

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (14)$$

Donde:

ε : emisividad de la superficie, siendo una medida de que tan cerca está una superficie de ser un cuerpo negro. Los valores de emisividad están en un intervalo de $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Ahora calculando la transferencia de calor por radiación entre un cuerpo gris de A_1 con T_1 y un espacio negro circundante con T_2 se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$q_{rad} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (15)$$

2.2.5.2.3 Aislamiento del digestor. Debido a las diversas pérdidas de calor producido en los biodigestores, se necesita materiales con baja conductividad térmica para impedir o disminuir dichas pérdidas, en otras palabras, se necesita de un aislamiento térmico (FNR, 2010). A continuación, se describe los 3 tipos de materiales aislantes:

-Fibrosos: los aislantes fibrosos están compuestos de filamentos con partículas de pequeño diámetro y una baja densidad, además es un material resistente al fuego llegando a un punto de fusión superior a los 1 000 °C, un ejemplo de estos aislantes son la lana mineral y la lana de vidrio (Cárdenas, 2009).

-Celulares: estos tipos de aislantes se pueden encontrar en celdas cerradas o abiertas que pueden tener la forma de tableros extendidos flexibles o rígidos, pero, también se obtiene la opción de ser rociados en algún lugar, entre los aislantes celulares destacan la espuma de poliuretano y la espuma de poliestireno expandido (Cárdenas, 2009).

-Granulares: Pueden ser usados como polvo o alguna forma prefabricada de materiales inorgánicos. En la siguiente tabla se presenta las características de los materiales más comunes de aislamiento:

Tabla 16*Valores Característicos y Consideraciones Especiales de los Materiales de Aislamiento*

Material de Aislamiento	Conductividad Térmica [W/m • K]	Tipo de Aplicación
Materiales de aislamiento de fibra mineral (aproximadamente 20-40 kg/m ³)	0,030 - 0,040	WV, WL, W, WD
Láminas de aislamiento de perlita (aproximadamente 150-210 kg/m ³)	0,045 - 0,055	W, WD, WS
EPS de espuma de partículas de poliestireno (15 kg/m ³ < densidad de masa)	0,030 - 0,040	W
EPS de espuma de partículas de poliestireno (20 kg/m ³ < densidad de masa)	0,020 - 0,040	W, WD
EPS de espuma de extrusión de poliestireno (25 kg/m ³ < densidad de masa)	0,030 - 0,040	WD, W
EPS de espuma rígida de poliuretano (30 kg/m ³ < densidad de masa)	0,020 - 0,035	WD, W, WS
Vidrio espuma	0,040 - 0,060	W, WD, WDS, WDH

Nota: Extraído de (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010). Tipos de aplicación: WV con carga de rasgado y cizallamiento; WL, W sin carga compresora; WD con carga compresora; WS materiales de aislamiento para áreas de aplicación especiales; WDH mayor capacidad de carga bajo piso de compresión-extensión; WDS mayor capacidad de carga para áreas de aplicación especiales.

2.2.5.2.4 Gasómetro. Debido a la continua producción de biogás se necesita un lugar de almacenamiento, por lo que se tiene que taponear el biogás en tanques de almacenamiento apropiados o también llamado gasómetro (FNR, 2010).

El gasómetro debe de ser resistente a la temperatura y al clima, además de ser a prueba de fugas de gas y presión. Su diseño debe ser tal que puedan almacenar aproximadamente una cuarta parte de la producción diaria de biogás. Se dividen en tanques de presión baja, media y alta (FNR, 2010).

-Tanques de presión baja: Mayormente utilizados en centrales de biogás, operando a una presión de 0,5 a 30 mbar. Estos gasómetros están hechos de láminas plásticas, pueden ser instalados en la parte superior de los reactores, llamados tanques de almacenamiento integrado o ser una instalación aparte de la del reactor (Fernández, 2016).

- Tanques de presión media y alta: son tanques de acero que operan a presiones de 5 a 250 bar. No suelen ser utilizados en centrales agrícolas de biogás debido a los altos gastos operativos (FNR, 2010).

-Tanques de almacenamiento integrado: el material que se utiliza para esos gasómetros son láminas plásticas, además ser ubicadas en el mismo reactor (FNR, 2010). En la siguiente tabla se presenta las características y parámetros de los tanques de almacenamiento integrado:

Tabla 17

Valores Característicos y Parámetros de las Coberturas con Planchas Plásticas

Valores característicos	Tienen una capacidad de almacenamiento de hasta 4 000 m ³ . Se pierde entre 1 y 5% del biogás generado en un día. Los materiales utilizados son: jebe de butilo, mezcla de polietileno-polipropileno, jebe de EPDM.
Conveniencia	Se adaptan a todo tipo de centrales con digestores verticales.
Ventajas	No se necesita un espacio extra para la instalación del sistema de tanque de almacenamiento de biogás.
Desventajas	Debido al espacio de gas concentrado en tanque integrado no se puede medir con exactitud el porcentaje de metano en el digestor.
Mantenimiento	Generalmente no es necesario mantenimiento.

Fuente: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

-Tanques de almacenamiento externo: FNR (2010), menciona que: “Suele utilizarse cojines de láminas de plástico como tanques de almacenamiento externo de baja presión” (p. 75).

A continuación, se presenta las especificaciones de los tanques externos de almacenamiento de biogás.

Tabla 18

Valores Característicos y Parámetros del Proceso de los Tanques Externos de Almacenamiento de Biogás

Valores característicos	Con una capacidad de almacenamiento de hasta 2 000 m ³ . Con una presión de trabajo de: 0,5-30 mbar. Se pierde entre 1 y 5% del biogás generado en un día. Materiales: PVC (u otro material muy durable), jebe de butilo, compuestos de polietileno-polipropileno.
Conveniencia	Se puede usar en todas las centrales de biogás.
Ventajas	Es medible la concentración exacta de biogás, además de la actividad de los microorganismos.
Desventajas	Se necesita un espacio extra para la instalación del tanque externo de almacenamiento.
Mantenimiento	Generalmente no requiere mantenimiento.

Fuente: Adaptado de (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de investigación

3.1.1 *Tipo de investigación*

3.1.1.1 Investigación no experimental.

La tesis se trató de una investigación no experimental, esta investigación se define como estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos. En la investigación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible su manipulación, debido a que ya sucedieron, al igual que sus efectos.

3.1.2 *Diseño de investigación*

3.1.2.1 Investigación exploratoria.

Esta investigación se realiza cuando el objetivo consiste en examinar un tema poco estudiado, por lo que los resultados obtenidos constituyen una visión aproximada de dicho problema. Este proyecto indaga información sobre la producción de energía a partir de la codigestión anaerobia de purín de cerdo y residuos de la industria pesquera en el distrito de Huacho.

3.2 Población y muestra

Para el presente trabajo de investigación la población es igual a la muestra, la cual está conformada por el purín de ganado porcino y residuos de la industria pesquera en el distrito de Huacho.

3.3 Hipótesis

Mediante la instalación de una planta de biogás a partir de la codigestión de purín de ganado porcino y los residuos de la industria conservera de pescado en el distrito de Huacho, se producirá anualmente más de 1 GWh de energía eléctrica y un 1 GWh de energía térmica.

3.4 Operacionalización de Variables

Tabla 19

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores
<p><u>Variable dependiente</u></p> <p>Producción Energética</p>	La energía se define como la capacidad de realizar trabajo, de producir movimiento, de generar cambio.	Es la producción de energía total, energía eléctrica y térmica que se puede generar en la planta de biogás.	<p>Energía eléctrica y térmica anual (GWh).</p> <p>Potencia instalada (kW).</p>
<p><u>Variable independiente</u></p> <p>Biogás</p>	Es un gas que se obtiene a partir de la biomasa a través de la co-digestión anaeróbica.	Volumen de biogás producido a partir de la codigestión de purín de cerdo y residuos de la industria pesquera en el distrito de Huacho.	Volumen de biogás producido (m ³).

Fuente: Elaboración propia

3.5 Métodos y técnicas de Investigación

Método de investigación

El método deductivo se entiende como aquel método que se basa en datos generales ya válidos con el fin de llegar a una conclusión de menor generalidad, es decir en forma particular (Hernández, Fernández y Baptista, 2010). En el presente proyecto se ha utilizado teorías generales sobre la producción energética a partir de la codigestión anaerobia de diversos residuos orgánicos para aplicarlo a una situación particular que sería la generación de energía eléctrica y térmica a partir de la codigestión de purín de cerdo y residuos de la industria conservera de pescado en el distrito de Huacho.

La técnica utilizada es la siguiente:

- Análisis de contenido: se utilizó esta técnica con la finalidad de indagar información sobre sistema de generación de biogás, además del purín producido y los residuos de las industrias pesqueras generados en el distrito de Huacho que nos sirve para el desarrollo de esta tesis.

3.6 Descripción de los Instrumentos Utilizados

De acuerdo a la técnica utilizada tenemos los siguientes instrumentos

Tabla 20

Técnica e instrumentos utilizados

Técnica	Instrumentos
Análisis de contenido	Libros, tesis, revistas científicas, páginas web de internet.

Fuente: elaboración propia

3.7 Análisis Estadístico e Interpretación de los Datos

La información obtenida en el presente trabajo de investigación, como son los datos de producción de biogás, la energía eléctrica y térmica producida, se han organizado en tablas utilizando el MS Excel 2016, además de la cantidad de purín de cerdo y residuos de la industria que se utilizó para calcular el potencial energético, gracias a ello se ha podido dar respuestas al problema planteado.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

Debido a la problemática expuesta en el distrito de Huacho, con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental y aprovechar estos residuos para la generación de energía eléctrica y térmica, se propone la instalación de una planta de biogás.

Se realizó el diagnóstico de información acerca de la cantidad y características de la biomasa disponible para la digestión anaeróbica en la central de biogás. A continuación, se procedió a seleccionar y diseñar el sistema de digestión para la producción de biogás, el tanque de alimentación, el biodigestor como elemento principal donde se realiza la fermentación de biomasa, el diseño térmico para lograr la temperatura requerida para el proceso de producción de biogás, además del motor de cogeneración para la generación de energía eléctrica y térmica.

La presente tesis se enfocará a determinar el potencial energético que se podría producir si se instalara una planta de biogás a partir de la codigestión de purín de cerdo y los residuos de la industria de conservera de pescado, con la finalidad de aumentar el uso de energías renovables en la matriz energética del Perú, además de reducir la contaminación producida por los residuos de la explotación ganadera y la industria pesquera.

Para ello se ha tenido que recabar información de diversas fuentes, especialmente extranjeras para tener una visión globalizada de la producción energética a partir de biogás, con el fin de proponer mejoras en favor de la comunidad y de la investigación científica.

Aclarando todos los puntos anteriormente descritos, se procede al análisis e interpretación de los resultados en el siguiente capítulo.

CAPITULO V: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 Caracterización de los Sustratos

A continuación, se procede con la descripción de los sustratos (purín de cerdo y residuos de la industria pesquera) que se utilizarán para la generación de biogás a través de la digestión anaeróbica, analizando cada sustrato y mencionando sus características.

5.1.1 Purín Porcino

Fernández (2016), nos dice que: “Se entiende por purín porcino a la mezcla de deyecciones sólidas y líquidas del cerdo combinado con restos de alimentos y agua de lavado” (p. 34).

5.1.1.1 Características del Purín Porcino. Las características del purín porcino están compuestas de una diversa variabilidad, dependiendo de la raza, estado fisiológico, alimentación y sistema de la explotación (Fernández, 2016).

El purín porcino se caracteriza por: un elevado contenido de agua, por lo que tiene un bajo contenido de SV, sin embargo, posee un elevado contenido de nutrientes lo que ocasiona que sea utilizado en sistemas de generación de biogás (Pomares y Canet, 2001; Campos y col., 2004; Magrí y col.; 2006, citado en Flotats, et al., 2016).

A continuación, se presenta la tabla 21 con las características fisicoquímicas del purín porcino.

Tabla 21

Características Fisicoquímicas del Purín Porcino

Parámetros	Unidades	Purín porcino
pH	-	6,9 ± 0,2
Densidad	kg/L	1,0
ST (Sólidos totales)	g/kg	17,3 ± 4,5
SV (Sólidos volátiles)	g/kg	11,7 ± 5,3
DQO _{total} (Demanda química de oxígeno)	g O ₂ /kg	29 ± 12
DQO _{soluble} (Demanda química de oxígeno)	g O ₂ /kg	15,3 ± 7,1

Parámetros	Unidades	Purín porcino
N- TKN	g N/kg	3,3 ± 0,6
N-NH ₄	g N/kg	3,1 ± 0,4
Alcalinidad total	g CaCO ₃ /kg	7,7 ± 1,3
Proteínas	g/kg	1.1 ± 0.2
Lípidos	g/kg	1,5 ± 0,3
Carbohidratos	g/kg	9,2 ± 3,8
DQO/ N ratio	-	8,9 ± 1,3

Fuente: (Regueiro, et al., 2012)

A continuación, se describe las ventajas y desventajas del uso del purín porcino para la digestión anaeróbica y generación de biogás.

-Ventajas: Debido al elevado contenido de agua se puede utilizar sistemas de mezcla completa, siendo estos sistemas los más utilizados y de funcionamiento más sencillo, cuentan con suficiente contenido de macro y micronutrientes necesarios para el proceso de digestión, una elevada capacidad de tampón que facilita el tratamiento para el proceso de digestión anaeróbica y debido al alto conocimiento y experiencia del purín de cerdo como sustrato en los sistemas de generación de biogás, se evita la inestabilidad el funcionamiento del reactor (Flotats, et al.,2016).

-Desventajas: Poseen una baja relación carbono/ nitrógeno (C/N), contienen elevados valores de pH, que si no es controlado puede ocasionar problemas de inhibición en el proceso digestivo (Flotats, et al.,2016).

5.1.1.2 Efectos de la Digestión Anaerobica de purín porcino. La utilización de purín de cerdo como sustrato para la digestión anaerobia produce los siguientes efectos sobre este sustrato (Flotats y col., 2007; Flotats y col., 2001; Bernal y col., 2001, citado en Flotats, et al., 2016):

-Estabilización parcial de la materia orgánica: aumenta la calidad del purín de cerdo para su uso como abono.

-Higienización: Debido a que al purín porcino se somete a un proceso de digestión se eliminan los microorganismos patógenos y parásitos animales que pueden contener el sustrato a utilizar.

-Reducción de gases de efecto invernadero y olores: La generación y posterior uso del biogás, supone una reducción en emisiones de metano y óxidos de nitrógeno del orden de 1,2 kg CO₂-eqv/m³ biogás.

-Producción de energía: tal vez el efecto más importante del proceso de fermentación, generado biogás con un elevado poder calórico. Estudios demuestran que la producción energética a partir del biogás supone un ahorro en combustibles fósiles de 2 kg CO₂-eqv/m³ biogás.

5.1.2 Residuos de la Industria Pesquera

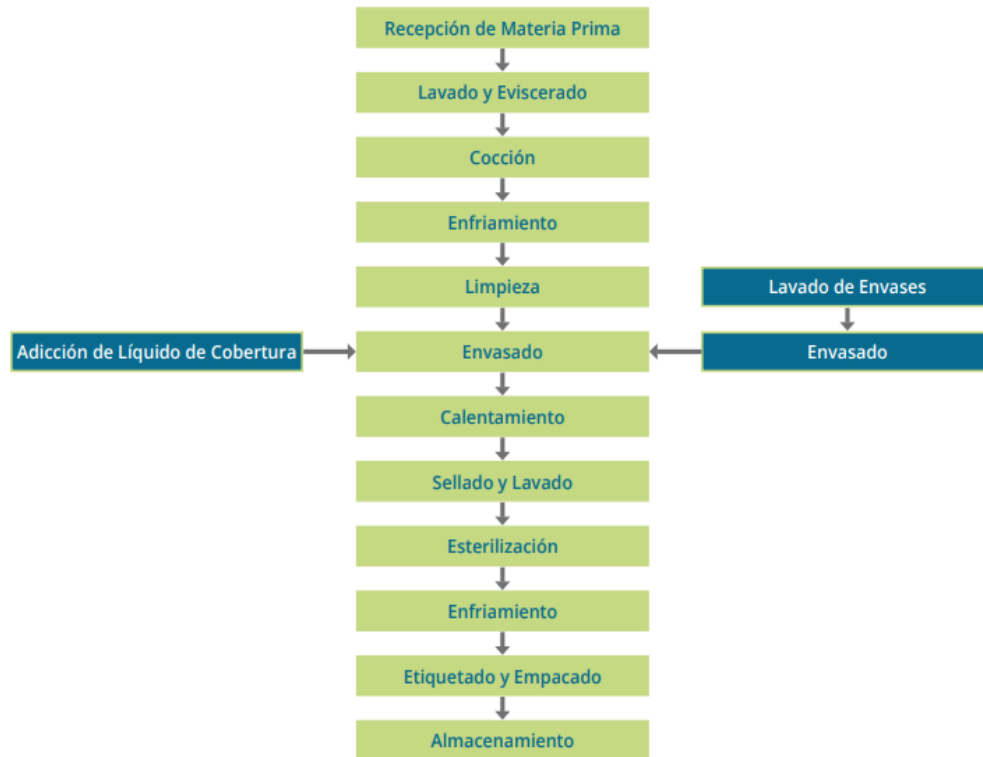
Durante la producción de enlatados en la industria pesquera se generan diversos desechos, en su mayoría residuos orgánicos compuestos por: descarte de pescado (no es de la calidad requerida), cabeza, cola y vísceras de pescado (Risco, 2017).

5.1.2.1 Proceso Productivo de Conservas de Pescado. Durante todo el proceso productivo de enlatados, en los procesos de lavado, eviscerado y fileteado es donde se generan la cabeza, cola y vísceras como residuos (Ministerio de Energía y Minas (MINEM), s.f).

En la figura 13 se presenta el proceso de elaboración de conservas de pescado.

Figura 13

Proceso Productivo de la Elaboración Conservas de Pescado



Fuente: (Ministerio de Energía y Minas, s.f.)

5.1.2.2 Características de los Residuos de la Industria Pesquera. Los sustratos procedentes de los residuos de pescado (cabeza, cola y vísceras) son ricos en proteínas, además poseen una importante cantidad de lípidos (Regueiro, et al., 2012).

Estos sustratos tienen la capacidad de una biometanización rápida, es decir una producción rápida de metano, pero poseen la desventaja de poder inhibir el proceso de digestión debido a la degradación de amonio que contiene los residuos de la industria pesquera (Chen y otros, 2008, citado en Regueiro, et al., 2012).

En la tabla 22 se presentan las características físico-químicas de los residuos de pescado.

Tabla 22

Características físico-Químicas de los Residuos de Pescado

Parámetros	Unidades	Residuos de pescado
Ph	-	7,1
Densidad	kg/L	1,1
ST (Sólidos totales)	g/kg	369
SV (Sólidos volátiles)	g/kg	270
DQO _{total} (Demanda química de oxígeno)	g O ₂ /kg	410
DQO _{soluble} (Demanda química de oxígeno)	g O ₂ /kg	-
N- TKN	g N/kg	34
N-NH ₄	g N/kg	0,7
Alcalinidad total	g CaCO ₃ /kg	0.4
Proteínas	g/kg	206
Lípidos	g/kg	28
Carbohidratos	g/kg	36
DQO/ N ratio	-	12,2

Fuente: (Regueiro, et al., 2012)

5.1.3 Mezcla de Purín Porcino con los Residuos de la Industria Pesquera

Después de la descripción de purín de cerdo y los residuos del proceso de conservas de pescado, se optó por utilizar la mezcla de estos dos sustratos para poder llevar a cabo la codigestión anaeróbica.

Como ya se mencionó en las características del purín de cerdo, este sustrato puede ser utilizado como una excelente base para la digestión, sin embargo, su producción de biogás es relativamente bajo, en un rango de 20-30 m³/ton (Angelidaki y Ellegaard, 2003, citado en Regueiro, et al., 2012). Otro inconveniente son sus altas concentraciones de amonio (2-3 g N-NH₄⁺/L) siendo un problema a la hora de digerir este sustrato (Regueiro, et al., 2012).

Es por esto, que usualmente se recomienda codigerir el purín de cerdo con residuos de alto contenido en carbono (residuos de la industria pesquera), a partir de esta codigestión se mejora la

relación C/N y se aumenta la producción de biogás (Hartman y Ahring, 2006, citado en Regueiro, et al., 2012).

5.1.3.1 Proporción de la Mezcla de Sustratos. Después de una búsqueda bibliográfica la proporción de la mezcla de sustratos que se utilizará para la codigestión es la siguiente: 95% en peso de purín de cerdo (PM) y 5% en peso de residuos de la industria de conservas de pescado (FW). La justificación de esta proporción se encuentra en los resultados presentados en el artículo “Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates” (Regueiro, et al., 2012).

En el experimento realizado el purín de cerdo (excremento y orina) se extrae de una granja de cerdos y los residuos del pescado (cabezas, colas, huesos y vísceras de atún) se extrajeron de una industria conservera, en dicho estudio también se hizo experimentos con el biodiesel (BW) como sustrato, pero en nuestro proyecto nos interesa los resultados obtenidos de la codigestión de purín de cerdo y residuos de la industria conservera.

Los experimentos realizados por los autores se llevaron a cabo en tres reactores continuos de tanque agitado, dos co-digestores y un solo digestor de purín de cerdo, estos reactores fueron operados a 35 °C por recirculación de agua caliente. Después de la puesta en marcha (0-19 días), el funcionamiento de los reactores de codigestión se dividen en tres períodos según: la proporción de sus sustratos, el tiempo de retención hidráulico (HRT) y la tasa de carga orgánica (OLR) aplicadas. La medición de pH, DQO, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), nitrógeno Kjeldahl total (N-TKN), amonio ($N - NH_4^+$), alcalinidad total (AT) y alcalinidad parcial (AP) se realizaron siguiendo el método estándar (APHA, 1995). La producción de biogás se midió en línea por Ritter milligascounters (Dr. Ing. Ritter Apparatebau GmbH, Bochum, Germany) y la composición del biogás se analizó por cromatografía de gases.

A continuación, en la tabla 23 se mostrará los parámetros operativos del co-digestor anaeróbico a escala de laboratorio y del digestor de estiércol solo de cerdo durante los diferentes períodos operativos.

Tabla 23

Parámetros operativos del co- digestor y digestor anaeróbico

Tipo de Reactor	Periodo	PM-FW-BW (%) w/w)	Duración (días)	OLR (g DQO/L d)	TRH (d)	pH	CH4 (%)	DQO Removido (%)	Biogás (L/L d)
Co-digestor	Puesta en marcha	84-5-11	0-19	0.5	40	7,4 ± 0.2	50 ± 2	60,8 ± 0.3	0,22 ± 0.01
	Periodo I	90-10-0	20-59	1	35	7,6 ± 0.3	57 ± 3	69,6 ± 1.2	0,43 ± 0.04
	Periodo II	95-5-0	60-115	1.5	30	8,0 ± 0.2	59 ± 2	65,7 ± 0.8	0,59 ± 0.05
	Periodo III	95-0-5	116-200	2	25	7,7 ± 0.2	60 ± 3	78,5 ± 0.7	0,91 ± 0.06
Digestor	Puesta en marcha		0-36	0.6	20	7.6 ± 0.2	56 ± 4	40,2 ± 0.4	0,15 ± 0.02
	Periodo I	PM	37-89	1	18	7.9 ± 0,2	52 ± 7	37,5 ± 0.9	0.25 ± 0.03
	Periodo II		90-104	1,5	15	8.0 ± 0.2	52 ± 5	40,1 ± 2.0	0,40 ± 0.01
	Periodo III		105-150	2	10	8,1 ± 0.1	55 ± 6	52,6 ± 3.7	0,67 ± 0.10

Fuente: (Regueiro, et al., 2012)

Con los resultados de los experimentos se concluye que la codigestión anaeróbica de purín de cerdo (PM) con residuos de la industria pesquera (FW) evidenció una mejora con respecto a la sola digestión de PM, en términos de una mayor producción de biogás y estabilidad del proceso, se recomienda mantener la mezcla de FW por debajo del 10% para evitar problemas en el proceso de codigestión.

5.1.3.2 Características y Parámetros Operativos de la Mezcla. A continuación, se mostrará las características y parámetros operativos de la mezcla de purín de cerdo y residuos de la industria pesquera que resultó de los experimentos de (Regueiro, et al., 2012).

En la tabla 24 se presenta las características antes mencionadas con respecto a los sustratos utilizados para la codigestión.

Tabla 24

Características de la mezcla de PM – FW

Características	Unidad	PM-FW (95% - 5%)
% ST (Sólidos totales)	%	5-7
Tasa de carga orgánica (OLR)	g DQO/L d	1,5
pH	-	8,0 ± 0,2
Porcentaje de metano (CH ₄)	%	59 ± 2
Eliminación de DQO	%	65,7 ± 0,8
Producción de biogás	L/L d	0,59 ± 0,05

Nota: PM purín porcino, FW residuos de pescado, DQO demanda química de oxígeno

5.2 Cuantificación de la Biomasa

En primer lugar, realizaremos la cuantificación de purín de cerdo disponible en el distrito de Huacho, a continuación, se procederá a realizar el cálculo para obtener la cantidad de residuos de la industria pesquera necesario para poder llevar a cabo el proceso de codigestión, cumpliendo con los parámetros de la mezcla ya establecida.

5.2.1 Cuantificación de Purín de Cerdo

El proceso de cuantificación de purines, se llevará a cabo siguiendo la metodología desarrollada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del grupo español de investigaciones PROBIOGAS, en su documento “Cuantificación de materias primas de origen ganadero”. Esta investigación se basa en los coeficientes de generación de purines de cerdo según especie, edad fisiológica y orientación productiva, además teniendo en consideración la crianza extensiva/ intensiva

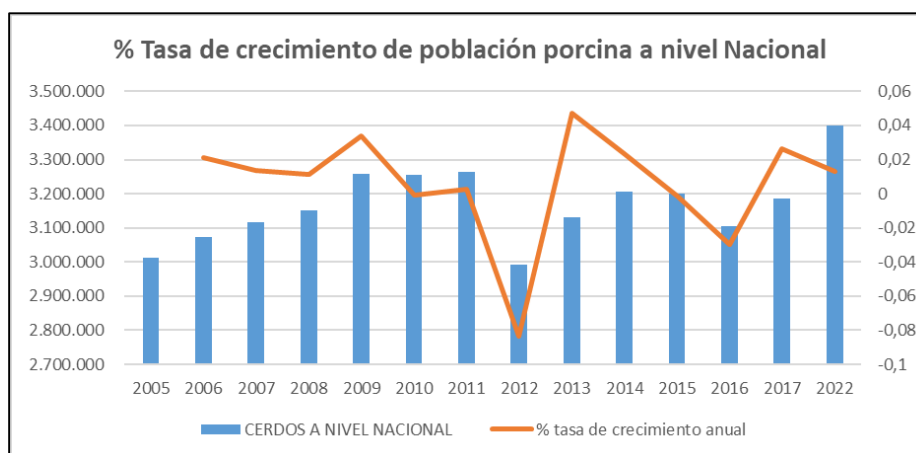
de las explotaciones (potencial accesible) según la densidad en cabezas por hectárea de la explotación y la disponibilidad de purín de cerdo, con el fin de realizar la cuantificación de purín más cercano a la realidad.

La cantidad de cerdos en el distrito de Huacho que tenemos es del Censo Nacional Agropecuario 2012 y este censo solo se da cada cierto tiempo debido a que se cuantifica de manera más precisa la cantidad cerdos de cada granja de todo el Perú, es por esto y para tener un dato claro acerca de la cantidad de cerdos en el distrito de Huacho, se ha procedido hallar la tasa de crecimiento tanto a nivel Nacional, Lima y el distrito de Huacho, con el objetivo de comprobar que la cantidad de cerdos en el distrito de Huacho se mantenga o haya aumentado para el año presente a comparación del año 2012.

A continuación, se presenta la evolución del % de tasa de crecimiento de la población porcina a nivel Nacional a partir de los datos obtenidos del compendio Estadístico Perú 2018 que se presenta en el Anexo 1, además considerando que en el año 2022 hay un total de 3,4 millones de cerdos (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022). Siendo el % promedio de tasa de crecimiento anual de población porcina nivel Nacional de 0,59%.

Figura 14

Evolución del % de tasa de crecimiento de población porcina a nivel Nacional

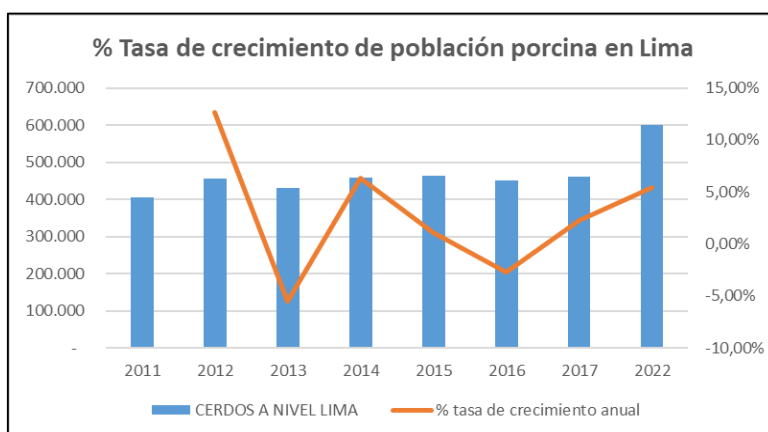


Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se presenta la evolución del % de tasa de crecimiento de la población porcina en Lima a partir de los datos obtenidos del compendio Estadístico Perú 2018 que se presenta en el Anexo 2, además considerando que en el año 2022 hay un total de 600 000 cerdos (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2022). Siendo el % promedio de tasa de crecimiento anual de población porcina en Lima de 2,79%.

Figura 15

Evolución del % de tasa de crecimiento de población porcina en Lima

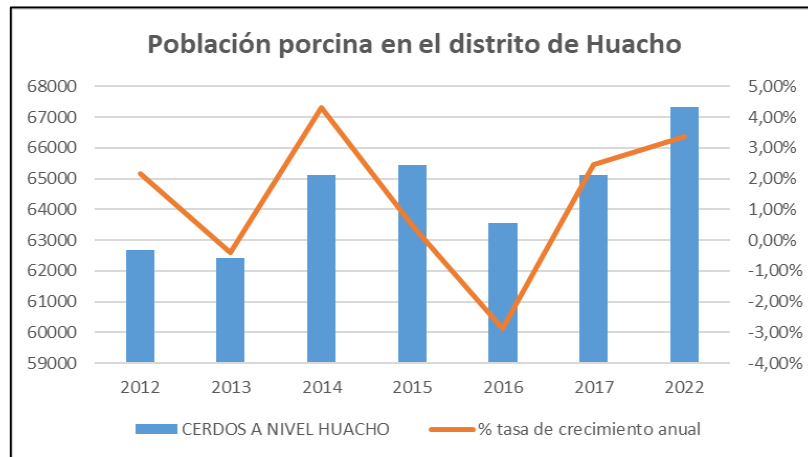


Fuente: Elaboración propia

Luego de calcular el % de tasa de crecimiento anual y su promedio tanto a nivel Nacional como en Lima se procede a calcular la evolución de la cantidad de cerdos en el distrito de Huacho para verificar si es factible utilizar el dato de cantidad de cerdos en Huacho del IV Censo Nacional Agropecuario. La población porcina se calculará con el promedio del % de tasa de crecimiento tanto a nivel Nacional como en Lima. En la siguiente tabla se presenta la evolución de la población en el distrito de Huacho, de los resultados se obtuvo que el % promedio de tasa de crecimiento anual de población porcina en Huacho es de 1,36%.

Figura 16

Evolución de la población porcina en el distrito de Huacho



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se obtiene que el número de cerdos en el año 2022 es mayor a la población del 2012 por lo que es factible utilizar la cantidad de porcinos del 2012.

5.2.1.1 Clasificación del Ganado Porcino

En la tabla 25, se presenta la clasificación del ganado porcino en el distrito de Huacho, basado en la última clasificación realizada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en el IV Censo Nacional Agropecuario 2012. Las principales granjas porcinas ubicadas en el distrito de Huacho son las siguientes: Granja Sinchi y Atahuampa Pic S.A (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2015).

En estas granjas se realizan un modelo de crianza tecnificada o intensiva, donde los cerdos se encuentran estabulados debido a la alta densidad poblacional, de esta manera logrando incrementar los índices de producción (Nario, 2017).

En este sistema de crianza tecnificada los porcinos se encuentran sobre pisos con rejillas que son lavados diariamente, donde se genera el purín porcino, pues es la mezcla del agua de lavado, heces y orina. El lavado debe realizarse diariamente para evitar malos olores y enfermedades, por lo que existe un sistema de recolección y conducción del purín que son almacenados para un posible uso como

abono, aunque este uso no es recomendable debido a que producen malos olores ya que no han sido tratados mediante un proceso anaeróbico (Cardoso et al., 2018).

Tabla 25

Clasificación y Población del Ganado Porcino

AREA # 150801	Dpto. Lima		
	Prov. Huaura		
	Dist. Huacho		
Ganado Porcino	Clases		
	Criollos	Mejorados	Total
Lechones	146	10 299	10 445
Gorrinas	36	3 184	3 220
Marranas	48	5 156	5 204
Gorrinos	15	43 693	43 708
Verracos	22	85	107
Total	267	62 417	62 684

Fuente: INEI

5.2.1.2 Coeficiente de Generación de Purines.

En la tabla 26 se muestran los coeficientes de generación de purines que se utilizará para la cuantificación, estos valores han sido extraídos de guía de mejores técnicas disponibles del sector porcino (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y el Ministerio de Medio Ambiente de España, 2010).

Tabla 26

Coeficiente de Generación de Purines

Tipo de Ganado Porcino (plaza)	Estiércol Líquido y Semilíquido (m ³ /año)	Contenido en Nitrógeno (kg/plaza y año)
Cerda en ciclo cerrado (incluye madre y su descendencia hasta el final del cebo)	17,75	57,60
Cerda con lechones hasta destete (de 0 a 6 kg)	5,10	15,00
Cerda con lechones hasta 20 kg	6,12	18,00

Tipo de Ganado Porcino (plaza)	Estiércol Líquido y Semilíquido (m ³ /año)	Contenido en Nitrógeno (kg/plaza y año)
Cerda de reposición	2,50	8,50
Lechones de 6 a 20 kg	0,41	1,19
Cerdo de 20 a 50 kg	1,80	6,00
Cerdo de 50 a 100 kg	2,50	8,50
Cerdo de cebo de 20 a 100 kg	2,15	7,25
Verracos	6,12	18,00

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y el Ministerio de Medio Ambiente de España, 2010).

Según los datos obtenidos de las encuestas realizadas por INEI en el IV Censo Nacional Agropecuario 2012 solo disponemos de cinco categorías, por lo que se procede a encuadrar las categorías de la tabla 25 en las categorías realizadas por INEI, con el objetivo de obtener los coeficientes de generación de purines. El encuadre de las categorías fue realizado siguiendo la clasificación de cerdos según (Añazco, 2015) y se presenta en la tabla 27.

Tabla 27

Encuadre de las Categorías según la Clasificación INEI

Clasificación Según INEI	Clasificación Según los Ministerios de España	Coeficientes de Producción (l/día)	
		(m ³ /año)	
Lechones	Lechones de 6 a 20 kg	0,41	1,12
Gorrinas	Cerda de reposición	2,5	6,85
Marranas	Cerda con lechones hasta destete (de 0 a 6 kg)	5,1	15,37
		5,61	
	Cerda con lechones hasta 20 kg	6,12	
Gorrinos	Cerdo de 20 a 50 kg	1,8	5,89
	Cerdo de 50 a 100 kg	2,5	
Verracos	Verracos	6,12	16,77

Fuente: Elaboración propia

5.2.1.3 Potencial Accesible. Es la cantidad de purín de cerdo que puede ser utilizado para la producción de biogás sin contabilizar otros usos que se le puede dar a dicho sustrato, considerado la cantidad de residuo que pertenece a la explotación extensiva de los cerdos (PROBIOGAS, 2009).

Por lo tanto, el potencial accesible se calcula a partir de la cantidad teórica total:

$$\text{Potencial accesible} = \text{cantidad teórica} \times C_A \quad (16)$$

Siendo C_A el porcentaje de accesibilidad

Las consideraciones en cuanto al potencial accesible se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 28

Consideraciones para el cálculo del potencial accesible

Tipo	Categoría	CA
Ganaderos (G)	Purín de Cerdo	0-1
	Si se realiza una crianza extensiva se considera un 0% de residuo.	
	En caso de una crianza intensiva se considera el 100% del residuo.	
	El coeficiente C_A puede variar entre 0 y 1 debido al tipo de crianza.	

Fuente: Ministerio de Ciencia e Innovación de España, 2010

Según la tabla 29 el valor de C_A dependerá si las explotaciones son intensivas o extensivas y estará comprendido en un rango de 0 a 1. Para diferenciar una explotación intensiva de una extensiva se utiliza la densidad en cabezas por hectárea de una agropecuaria), cuando se tiene una densidad alta se indica que se da una crianza intensiva. Las agropecuarias cuya densidad sea menor que (4 cabezas/ha) serán eliminadas del potencial accesible debido a que tiene una crianza extensiva (PROBIOGAS, 2009). Gracias a la información disponible en el IV Censo Nacional Agropecuario 2012 se dispone del tamaño de las superficies agropecuarias porcinas, N° de agropecuarias y N° de ganado porcino, de esta manera de estimará el coeficiente de accesibilidad para el distrito de Huacho.

La densidad de corte se calcula de la siguiente manera:

$$Densidad = \frac{N_P}{T_A \times N_A} \quad (17)$$

Donde:

N_P : N° porcinos

T_A : Tamaño de la agropecuaria

N_A : N° de agropecuarias

Una vez obtenida la densidad en cada rango de las agropecuarias, se procederá a estimar el coeficiente de accesibilidad medio del distrito de Huacho. Como el C_A está en un rango de 0 a 1, se dará el valor de $C_A=1$ para la densidad mayor del distrito y se procederá a calcular el C_A en cada uno de las agropecuarias para obtener un C_A medio.

A continuación, se presenta la tabla 29 con los coeficientes de accesibilidad de las agropecuarias en el distrito de Huacho.

Tabla 29

Coeficiente de Accesibilidad de las Agropecuarias en el Distrito de Huacho

Número de Agropecuarias (N_A)	Número de Agropecuarias (N_A)	Número de Porcinos (N_P)	Promedio del tamaño de las Agropecuarias (T_A)	Densidad (cab/ha)	C_A
Explotaciones sin tierras	-	-	-	-	-
Menos de 0.5 ha	29	705	0,25	97,24	0,48
De 0.5 a 0.9 ha	3	14	0,7	6,67	0,03
De 1.0 a 1.9 ha	7	27	1,45	2,66	Extensivo
De 2.0 a 2.9 ha	4	19	2,45	1,94	Extensivo
De 3.0 a 3.9 ha	9	443	3,45	14,27	0.07
De 4.0 a 4.9 ha	3	19	4,45	1,42	Extensivo
De 5.0 a 5.9 ha	9	68	5,45	1,39	Extensivo

Número de Agropecuarias (N _A)	Número de Agropecuarias (N _A)	Número de Porcinos (N _P)	Promedio del tamaño de las Agropecuarias (T _A)	Densidad (cab/ha)	CA
De 6.0 a 9.9 ha	13	79	7,95	0,76	Extensivo
De 10.0 a 14.9 ha	6	21	12,45	0,28	Extensivo
De 15.0 a 19.9 ha	1	1	17,45	0,06	Extensivo
De 20.0 a 24..9 ha	2	4	22,45	0,09	Extensivo
De 25.0 a 29.9 ha	2	6	27,45	0,11	Extensivo
De 35.0 a 39.9 ha	1	7	37,45	0,19	Extensivo
De 40.0 a 49.9 ha	2	5	44,95	0,06	Extensivo
De 100.0 a 199.9 ha	2	61 266	149,95	204.29	1

Fuente: elaboración propia

Después de hallar el coeficiente de producción de cada cerdo (l/día) y el coeficiente medio de accesibilidad (C_A=0.39).

En la tabla 30 se procede al cálculo del potencial accesible de purín en el distrito de Huacho:

Tabla 30

Potencial accesible de purín en el distrito de Huacho

Clasificación	N° de porcinos	Coef. de producción (l/por. x día)	Cuantificación teórica de purín (l/día)	Potencial accesible (l/día)
Lechones	10 445	1,12	11 698,4	4 562,376
Gorrinas	3 220	6,85	22 057	8 602,23
Marranas	5 204	15,37	79 985,48	31 194,34
Gorrinos	43 708	5,89	257 440,12	100 401,65
Verracos	107	16,77	1 794,39	699,81
		Total	372 975,39	145 460,40

Fuente: Elaboración propia

5.2.1.4 Potencial disponible

Para hallar este potencial es necesario minorar el potencial accesible, debido a que se debe de tener en cuenta otros usos potenciales para el purín de cerdo, como la producción de abono o su utilización en otros usos productivos (PROBIOGAS, 2009).

El potencial disponible se calculará a partir de la cantidad teórica o del potencial accesible:

$$\text{Potencial disponible} = \text{Cantidad teórica} \times C_A \times C_D \quad (18)$$

$$\text{Potencial disponible} = \text{Potencial accesible} \times C_D \quad (19)$$

Siendo C_A el porcentaje de accesibilidad y C_D el porcentaje de disponibilidad. Las consideraciones de mayor importancia en cuanto al potencial disponible para las deyecciones ganaderas se presentan en la tabla 31.

Tabla 31

Rango de valores orientativos para hallar el C_D

Tipo	Categoría	CD
	Purín de Cerdo	0,25 - 1
Ganaderos (G)	Sustrato que se debe de realizar un tratamiento previo a su uso en agricultura.	

Fuente: Ministerio de Ciencia e Innovación de España, 2010

En nuestro proyecto el valor del porcentaje de disponibilidad (C_D) será de 83% esto se debe a que Pascual (2011) en “Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020”, ha estimado un C_D = 83% para todas las deyecciones ganaderas, como el purín porcino.

En la siguiente tabla se presenta el potencial disponible de purín en el distrito de Huacho.

Tabla 32

Potencial disponible de purín en el distrito de Huacho

Clasificación	N° de Porcinos	Coeficiente de Producción (l/por. x día)	Cuantificación Teórica de Purín (l/día)	Potencial Accesible (l/día)	Potencial Disponible (l/día)
Lechones	10 445	1,12	11 698,4	4 562,376	3 786,77
Gorriñas	3 220	6,85	22 057	8 602,23	7 139,85
Marranas	5 204	15,37	79 985,48	31 194,34	25 891,30
Gorriños	43 708	5,89	257 440,12	100 401,65	83 333,37

Verracos	107	16,77	1 794,39	699,81	580,84
		Total	372 975,39	145 460,40	120 732,13

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Cuantificación de los Residuos de la Industria Pesquera

Después de obtener la cantidad de purín porcino disponible en el distrito de Huacho, continuaremos con la cuantificación de los residuos de la industria pesquera, estos residuos serán obtenidos de las diferentes industrias de conserva de pescado que operan en el distrito de Huacho, las industrias que operan son las siguientes: Industrial Don Martin S.A.C. y Procesadora de productos marinos S.A (Ministerio de la Producción Perú (PRODUCE), s.f).

Durante el proceso industrial de enlatados de pescado se genera ciertos residuos, estos residuos en muchos casos no se aprovechan y son desechados, están compuestos por: vísceras, cabeza y cola. Aproximadamente, a partir de 1 000 kg de sardina que será procesado para obtener conservas de sardina tipo grated, en el proceso se genera 520 kg de residuos entre vísceras, cabeza y cola. Además de 1 000 kg de pescado solo se consigue 90kg de pescado listo para ser envasado en 642 latas de 227g cada una, con un peso neto de 172g (140g de pescado y 30g de ingredientes) (Kleeberg y Nieto, 2001).

Durante el 2018 en el distrito de Huacho hubo una producción de 983 TMB de enlatados, una tonelada Métrica Bruta (TMB), incluye el peso del pescado y de los ingredientes (aceite, sal, salsas diversas, etc.), envases y empaque (PRODUCE, 2019).

Como ya sabemos a partir de 90kg de pescado se logra envasar 642 latas con un peso total de 145,734kg, incluyendo el peso de la lata, pescado e ingredientes, además se genera en el proceso 520 kg de residuos, entonces a partir de una producción de 983 TMB de enlatados se ha necesitado 606,79 TM de pescado para enlatar y para producir esta cantidad de pescado, en el proceso se ha generado 3 507,344 TM de residuos.

En la tabla 33 se presenta la cantidad total de residuos que se generó durante el año 2018 en el proceso de enlatados de pescado.

Tabla 33

Residuos de Pescado en el Proceso de Enlatados en el Distrito de Huacho

Producción de Enlatados de Pescado Durante el 2018 (TMB)	Peso del Pescado (TM /año)	Residuos Generados (TM/año)	Residuos Generados al Día (TM/día)
983	606,79	3 507,344	9,609

Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Cuantificación de Residuos de la Mezcla

Después de calcular la cantidad de purín de cerdo y la cantidad de residuos generados en la industria de conservas, realizaremos la cuantificación de la mezcla a codigerir, como ya se comentó anteriormente la proporción de la mezcla será del 5% w/w en residuos de pescado. En este estudio se va a tratar 120 732,13 l/día de purines, además se va a considerar una densidad de 1 kg/L, puesto que el purín está compuesto principalmente por agua, es por esto que se tratará 120,732 t/día, entonces la cantidad de residuo de pescado necesario para cumplir la proporción de la mezcla para realizar la codigestión es de 6,35 t/día. Debido a que durante el 2018 se generó 9,609 TM o t diarios de residuos de pescado en el proceso de enlatados, es factible cumplir la proporción necesaria para llevar a cabo la co-digestión.

En la siguiente tabla se muestra la cuantificación de la mezcla a codigerir.

Tabla 34

Cuantificación de la mezcla a codigerir

Mezcla de Residuos	Purín (95%)	Co-Sustrato Residuos de Pescado (5%)

127,086 t	120,732 t/día	6,35 t/día
-----------	---------------	------------

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Dimensionamiento y Diseño de la Planta de Biogás

A continuación, se va a diseñar y seleccionar los componentes principales del funcionamiento de la planta de biogás. Debemos de tener en cuenta que el diseño se basa principalmente en el libro “Guía sobre el biogás Desde la producción hasta el uso” siendo la versión en español de “Leitfaden Biogas”, además de los datos obtenidos del artículo científico “Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates” (Regueiro, et al., 2012), donde son obtenidos los parámetros de: TRH, OLR, pH, CH₄ (%), DQO removido (%) y la producción de biogás (L/L.d).

5.3.1 Sistema de Digestión Anaerobia

En este apartado se llevará acabo el seleccionamiento del sistema de digestión anaerobia, es decir el modo de operación, la temperatura, etc. Además, se describirá los motivos que han llevado a la elección.

5.3.1.1 Régimen de Operación

En la actualidad el régimen de operación continuo en centrales de biogás es el más utilizado en el mundo (Cuesta et al., s.f). Por lo tanto, se ha seleccionado un régimen de operación continuo, las ventajas de operar en este régimen es la generación continua de biogás, además de usar eficientemente el volumen del reactor (FNR, 2010).

5.3.1.2 Temperatura de Operación

Se ha seleccionado operar en un rango mesófilo (35°C) debido a que los experimentos realizados en el artículo “Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates” (Regueiro, et al., 2012) se realizaron a esta temperatura. Además, en

el caso del purín porcino que contiene altas cantidades de amonio podría ocurrir problemas de inhibición y a temperaturas mayores de digestión (rango termofílico) estas inhibiciones aumentarían (Fernández, 2016).

5.3.1.3 Configuración del Sistema

La digestión anaerobia de la mezcla se realizará en una sola fase debido a que son sistemas más sencillos de operar y representan menores costos de operación, además de que este sistema en una sola fase es el más apropiado para residuos con 30 días de retención (IDAE, 2011).

5.3.1.4 Contenido en Sólidos del Sustrato

Puesto que una de las características del purín porcino es tener un elevado contenido de agua (Flotats, et al.,2016) la digestión será por vía húmeda.

A continuación, en la tabla 35 se presenta el resumen de la selección del sistema de digestión anaerobia de la planta de biogás:

Tabla 35

Sistema de Digestión Anaerobia de la Planta de Biogás

Sistema de Digestión Anaerobia	
Régimen de operación	Sistema continuo
Temperatura de operación	Sistema Mesófilo
Configuración del sistema	Sistema de 1 etapa
Contenido en sólidos del sustrato	Sistema húmedo

fuelle: Elaboración propia

5.3.2 Tanque de Alimentación

La función del tanque de alimentación será mezclar y homogenizar la mezcla de purín de cerdo y residuos de la industria pesquera, para luego introducir la mezcla al digestor.

En este caso es necesario un pre-tratamiento para reducir el tamaño de los sustratos, en específico los residuos de la industria pesquera, como ya se mencionó en el capítulo II existen diversos métodos para realizar un pre-tratamiento al sustrato, en este caso se ha optado por utilizar el método de triturado, a continuación, se describirá los motivos de la selección.

5.3.2.1 Selección del Pre-Tratamiento

Es necesario utilizar un pre-tratamiento debido al tamaño de los diversos residuos de pescado de la industria conservera, por lo que se optó por utilizar el método mecánico de triturado. A continuación, se enumeran los motivos de la selección de este método:

-En el artículo científico “Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates” (Regueiro, et al., 2012) indica que los residuos de pescado han sido molidos, es decir triturados mediante un molino, antes de realizar los experimentos, es por esto que para asemejar los resultados de dicho experimento a nuestro proyecto hemos optado por la trituración del sustrato.

-Además, al triturar o moler el sustrato a digerir, es en este proyecto los diversos residuos de pescado de la industria conservera, se logra aumentar la rapidez de biodegradación de dicho sustrato (FNR, 2010).

El dispositivo de triturado por molino se ubicará externamente al tanque de alimentación donde antes que se deposite en este, el sustrato se procesará por dicho dispositivo de triturado de esta manera logrando un aumento en la producción de biogás, a continuación, en la tabla 36 se presenta las ventajas y consideraciones del dispositivo externo de triturado.

Tabla 36

Ventajas y Consideraciones del Dispositivo de Triturado

Dispositivo Externo de Triturado	
Ventajas	Se tiene un fácil acceso al dispositivo de triturado en caso de mantenimiento o en algún problema técnico en el funcionamiento. Se puede realizar la automatización del sistema.
Consideraciones	Las dimensiones del tanque de recepción del sustrato triturado debe de ser compatible con el de la máquina de triturado.

Fuente: Elaboración propia

5.3.2.2 Dimensionamiento del Tanque de Alimentación

Luego de realizar el pre-tratamiento a los residuos de pescado, los sustratos son almacenados y homogenizados en un tanque de alimentación, la homogenización se va a llevar a cabo mediante agitadores de tipo propulsor de motor sumergido, siendo estos utilizados frecuentemente en tanques verticales (FNR, 2010).

Se va dimensionar este tanque con un tiempo de almacenamiento de 2 días, para evitar la posibilidad de congelamiento de la planta ante algún problema o desperfecto (FNR, 2010). El tanque de alimentación tendrá una forma cilíndrica, logrando optimizar el mezclado del purín de cerdo y residuos de pescado, evitando la acumulación de sólidos en las esquinas del tanque (Estela, 2016).

Además, el tanque de alimentación se va a diseñar con una entrada para los sustratos y una salida para la biomasa que luego de recibir el pre-tratamiento respectivo y la homogenización será impulsada hasta el digestor a través de una bomba (Fernández, 20016).

Nuestra mezcla diaria de residuos que se va a obtener se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 37*Mezcla Total de residuos*

Residuos	Densidad	Masa	Volumen
Purín de Cerdo	1 kg/L	120 372 kg	120 372 L
Residuos de la Industria Pesquera	1,1 kg/L	6 350 kg	5 772,727 L
Mezcla de Residuos	1,005 kg/L	126 722 kg	126 144,727 L

Fuente: Elaboración propia

Siendo volumen de la mezcla:

$$V_{mezcla} = V_{purin} + V_{res.} \quad (20)$$

 V_{purin} : Volumen del purín de cerdo. $V_{res.}$: Volumen de los residuos de la industria pesquera.

$$V_{mezcla} = 120\,372\,L + 5\,772,727\,L \quad (21)$$

$$V_{mezcla} = 126\,144,727\,L \quad (22)$$

A continuación, se convierte el volumen de litros a metros cúbicos

$$V_{mezcla} = 126,145\,m^3 \quad (23)$$

Para evitar la posibilidad del congelamiento de la planta vamos a dimensionar el tanque con la capacidad de 2 días de retención, de modo que el volumen útil del tanque de alimentación será de 252,29 m³.

Ante alguna fluctuación de carga, se debe de prever un porcentaje de seguridad llamado borde libre, el porcentaje de seguridad será el 7% del volumen calculado, de modo que el volumen del tanque de alimentación será el siguiente (Fernández, 2016).

$$V_{tanque\,de\,alimentación} = V_{útil} \times \% \, seguridad \quad (24)$$

$$V_{tanque\,de\,alimentación} = 252,29\,m^3 \times 1,07 \quad (25)$$

$$V_{tanque\,de\,alimentación} = 269,9503\,m^3 \quad (26)$$

En la siguiente tabla se resume las características del tanque de alimentación.

Tabla 38

Características del Tanque de Alimentación del Sustrato

Tanque de Alimentación	
Forma	Cilíndrica
Vol. Útil	252,29 m ³
Factor de Seguridad	20%
Volumen del Tanque Real	269,9503 m ³

Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Biodigestor

A continuación, se seleccionará el tipo de digestor y el diseño de sus parámetros operacionales.

5.3.3.1 Selección del Tipo de Biodigestor

En el presente proyecto se ha seleccionado un digestor de mezcla completa para llevar a cabo el proceso de digestión, puesto que en la actualidad son usados en el 90% de las centrales de producción de biogás, dando evidencia de su confiabilidad (FNR, 2010).

A continuación, se enumeran las razones de la selección.

-Los costos por diseño decrece cuando el volumen del biodigestor es mayor que 300 m³, siendo el volumen del biodigestor del presente proyecto superior a los 300 m³ (FNR, 2010).

-Ideal para sustratos con contenido bajo de materia seca, por lo que es ideal para el presente proyecto debido que se realizará la codigestión en un sistema húmedo (FNR, 2010).

- Tiene la capacidad de operar en un régimen continuo o discontinuo (FNR, 2010).

-Se puede dar mantenimiento a los equipos sin la necesidad de vaciar el reactor, siendo conveniente para evitar paras en la producción de biogás en las centrales (FNR, 2010).

5.3.3.2 Parámetros Operacionales del Biodigestor

Una vez seleccionado la configuración del sistema de digestión anaerobia y el tipo de biodigestor, se prosigue a definir los parámetros operacionales del digestor. En los experimentos realizados en el artículo científico “Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates” (Regueiro, et al., 2012), se han obtenido algunos parámetros operacionales que serán seleccionados para el funcionamiento del digestor, los parámetros son los siguientes: T°, OLR, TRH, pH, %CH₄, eliminación de DQO y la producción de biogás. El resto de los parámetros faltantes serán hallados a través de las ecuaciones obtenidas del modelo de Chen-Hashimoto.

Chen y Hashimoto proponen un modelo cinético, utilizado mayormente para digestores que tratan residuos ganaderos. Este modelo implica el desarrollo algebraico de los balances de masa en el biodigestor (de biomasa y de sustrato) (Fernández, 2016). A continuación, se aplicará las fórmulas obtenidas del modelo de Chen y Hashimoto, pero antes de eso se resumirá en la siguiente tabla los parámetros operacionales calculados por Regueiro, et al. (2012) en “Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates”.

Tabla 39

Parámetros Operacionales Base

Parámetros	
VCO (kg DQO/ m ³ .d)	1.5
TRH (d)	30
Ph	8,0 ± 0,2
% CH ₄	59 ± 2
Eliminación de DQO (%)	65.7 ± 0,8
Producción de biogás (m ³ biogás/ m ³ .d)	0,59 ± 0,05

Fuente: (Regueiro, et al., 2012)

Debemos de tener en consideración que la concentración de sustrato se puede expresar de diferentes maneras: Volumen de CH₄ equivalente/volumen digestor, D.Q.O. (mg O₂/L) o Sólidos Volátiles (g S.V./L) (Fernández ,2016).

A continuación, se realizará el cálculo de los parámetros operacionales.

5.3.3.2.1 Volumen Útil del Digestor ($V_{\text{útil dig.}}$)

Es el volumen necesario que debe de tener el digestor para poder llevar a cabo el proceso de digestión, donde el $V_{\text{útil dig.}}$ se halla de la siguiente manera.

$$V_{\text{útil dig.}} = Q_{\text{residuo}} \times TRH \quad (27)$$

Donde:

Q_{residuo} : Caudal másico de entrada del residuo (m³/día)

Debido a que el volumen diario de residuos disponible para la planta es de 126,145 m³, el caudal másico de entrada será de $126,145 \frac{m^3}{d}$, por lo que el $V_{\text{útil dig.}}$ quedaría de la siguiente manera.

$$V_{\text{útil dig.}} = 126,145 \frac{m^3}{d} \times 30d \quad (28)$$

$$V_{\text{útil dig.}} = 3\,784,35 \, m^3 \quad (29)$$

5.3.3.2.2 Velocidad de Carga Orgánica (VCO)

El parámetro VCO ya fue calculado, pero a partir de este parámetro vamos a obtener la concentración de sólidos volátiles a la entrada del digestor (SV_0).

$$VCO = \frac{Q_{\text{residuo}} \times SV_0}{V_{\text{útil dig.}}} \quad (30)$$

Siendo:

SV_o : Concentración de sólidos volátiles a la entrada del digestor ($\text{kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

$$VCO = \frac{126,145 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times SV_o}{3784,35 \text{ m}^3} \quad (31)$$

Despejando SV_o la ecuación queda de la siguiente manera

$$SV_o = \frac{1,5 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \times 3784,35 \text{ m}^3}{126,145 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} \quad (32)$$

$$SV_o = 45 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \quad (33)$$

5.3.3.2.3 Concentración de Sólidos Volátiles a la Salida del Digestor (SV_s)

Como ya fue calculado el rango de % de eliminación de SV en el experimento realizado por Regueiro, et al. (2012), se prosigue a realizar el cálculo de SV_s , considerando % de eliminación de SV promedio (E).

$$E = 1 - \frac{SV_s}{SV_o} \quad (34)$$

Reemplazando las variables, la ecuación queda de la siguiente manera

$$65,7\% = 1 - \frac{SV_s}{45 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{d}}} \quad (35)$$

Despejando SV_s

$$SV_s = 45 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} - 0,657 \times 45 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \quad (36)$$

$$SV_s = 15,435 \frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \quad (37)$$

5.3.3.2.4 Producción de biogás por unidad de sustrato eliminado ($P_o \text{ biogás}$)

Se calculará $P_o \text{ biogás}$ a partir de la siguiente ecuación

$$P_v \text{ biogás} = P_o \text{ biogás} \times \left(\frac{SV_o - SV_s}{TRH} \right) \quad (38)$$

Siendo:

$P_v \text{ biogás}$: Producción de biogás, por unidad de tiempo y volumen del reactor.

Debido a que $P_v \text{ biogás}$ ya fue calculado en los experimentos realizados por Regueiro, et al. (2012) se prosigue a calcular $P_o \text{ biogás}$.

$$0,59 \frac{m^3 \text{ biogás}}{m^3 \times d} = P_o \text{ biogás} \times \frac{(45-15,435) \frac{kg \text{ SV}}{m^3 \times d}}{30 d} \quad (39)$$

$$P_o \text{ biogás} = 0,581 \frac{m^3 \text{ biogás}}{kg \text{ SV}} \quad (40)$$

5.3.3.2.5 Producción diaria de biogás($Q_{\text{biogás}}$)

A través de la siguiente ecuación se calcula $Q_{\text{biogás}}$

$$Q_{\text{biogás}} = Q_{\text{residuo}} \times SV_O \times P_o \text{ biogás} \quad (41)$$

$$Q_{\text{biogás}} = 126,145 \frac{m^3}{d} \times 45 \frac{kg \text{ SV}}{m^3 \times d} \times 0,581 \frac{m^3 \text{ biogás}}{kg \text{ SV}} \quad (42)$$

$$Q_{\text{biogás}} = 3\,298,061 \frac{m^3}{d} \quad (43)$$

5.3.3.2.6 Producción diaria de metano (Q_{CH_4})

Según los experimentos realizados por Regueiro, et al., (2012) del total de biogás producido el 59% es de metano (CH_4), por lo que Q_{CH_4} se calculará a partir de la siguiente ecuación.

$$Q_{CH_4} = Q_{\text{biogás}} \times \%CH_4 \quad (44)$$

$$Q_{CH_4} = 3298,061 \frac{m^3}{d} \times 59\% \quad (45)$$

$$Q_{CH_4} = 1\,945,856 \frac{m^3}{d} \quad (46)$$

En la siguiente tabla se resume los resultados de los cálculos de los parámetros operacionales:

Tabla 40*Resumen de los Parámetros Operacionales del Funcionamiento del Digestor*

Parámetros Operacionales	
Q_{residuo} (m ³ /día)	126,145
SV_o (kg SV/m ³ .día)	45
TRH (días)	30
VCO (kg DQO/ m ³ .d)	1.5
pH	8,0 ± 0.2
% CH ₄	0,59
Eliminación de DQO (%)	65,7
P_v biogás (m ³ biogás/m ³ .d)	0,59
P_o biogás (m ³ biogas/kg SV)	0,581
Producción Diaria de Biogás (m ³ /d)	3 298,061
Producción Diaria de Metano (m ³ /d)	1 945,856
$V_{\text{útil dig.}}$ (m ³)	3 784,35

Fuente: elaboración propia

5.3.3.3 Dimensionamiento del Digestor

A continuación, se calculará las dimensiones del digestor, anteriormente se hallado el volumen útil del digestor, es decir el volumen mínimo para poder llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia. Regularmente se debe asignar un borde libre o seguridad, lo que equivale al 20% del volumen ya calculado, es decir del volumen útil, este volumen extra es para evitar la fuga de espuma al circuito de gas(Fernández, 2016).

El volumen total del digestor se calculará mediante siguiente ecuación.

$$V_{\text{digestor}} = V_{\text{útil dig.}} \times (1 + 0,2) \quad (47)$$

$$V_{\text{digestor}} = 3\,784,35 \, m^3 \times (1 + 0,2) \quad (48)$$

$$V_{\text{digestor}} = 4\,541,22 \, m^3 \quad (49)$$

Generalmente los reactores industriales utilizados para la digestión de purines son tanques circulares con diámetros de 16 a 30 m, con una altura entre los 6 y 9 m (Fernández, 2016). Por lo tanto, se ha seleccionado un diámetro de 27 m para el tanque del presente proyecto con el objetivo de estar dentro de los parámetros estándar, a continuación, se calcula la altura del tanque.

$$V_{digestor} = \pi \times \frac{(D_{digestor})^2}{4} \times H_{digestor} \quad (50)$$

Reemplazando el $V_{digestor}$ ya calculado

$$4\,541,22\,m^3 = \pi \times \frac{27^2}{4} \times H_{digestor} \quad (51)$$

$$H_{digestor} = 7,90\,m \quad (52)$$

Siendo la altura del sustrato en el digestor

$$V_{\text{útil dig.}} = \pi \times \frac{(D_{digestor})^2}{4} \times H_{sustrato} \quad (53)$$

$$3\,784,35\,m^3 = \pi \times \frac{27^2}{4} \times H_{sustrato} \quad (54)$$

Despejando $H_{sustrato}$

$$H_{sustrato} = 6,61\,m \quad (55)$$

A continuación, se va a calcular el espesor mínimo del muro circular del tanque de hormigón armado, debemos de tener en cuenta que estos digestores deben de ser fraguados, en este caso se realizará a través de partes de acero.

$$e = \frac{C \times E_s + f_s - n \times f_c}{f_s \times f_c} \times T \quad (56)$$

Siendo:

e : espesor del muro (m)

C : coeficiente de contracción

f_s : esfuerzo permisible en el acero $\frac{(N)}{m^2}$

E_s : módulo de elasticidad del acero $\frac{(N)}{m^2}$

n : cociente entre el modulo de elasticidad del acero y concreto

f_c : esfuerzo permisible del concreto $\frac{(N)}{m^2}$, siendo el 10% del esfuerzo de compresión descrito

en la norma ACI 350 (American concrete Institute)

T : tensión en el anillo de concreto del tanque $\frac{N}{m}$

Antes de hallar el espesor de muro, se hallará T :

$$T = \frac{P \times D_{digestor}}{2} \quad (57)$$

Es necesario hallar calcular P

$$P = \frac{\rho_s \times g \times H_s}{2} \quad (58)$$

Donde:

P : Presión ejercida por la mezcla de sustratos (N/m^2)

$D_{digestor}$: Diámetro del digestor (m)

ρ_s : densidad de la mezcla de sustratos (kg/m^3)

g : gravedad (m/s^2)

H_s : altura del sustrato en el digestor (m)

$$P = \frac{1\,004,576 \frac{kg}{m^3} \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 6,61\,m}{2} \quad (59)$$

$$P = 32\,537,212\, (N/m^2) \quad (60)$$

Resolviendo T

$$T = \frac{P \times D_{digestor}}{2} \quad (61)$$

$$T = \frac{32\,537,212 \frac{N}{m^2} \times 27\,m}{2} \quad (62)$$

$$T = 439\,252,362\,N/m \quad (63)$$

Después de calcular T, se prosigue al cálculo del espesor mínimo del muro circular del tanque de hormigón armado.

$$e = \frac{C \times E_s + f_s - n \times f_c}{f_s \times f_c} \times T \quad (64)$$

Reemplazando las variables

$$e = \frac{0,0003 \times 21 \times 10^{10} \frac{N}{m^2} + 1,5 \times 10^8 \frac{N}{m^2} - 9 \times 2,6 \times 10^6 \frac{N}{m^2}}{1,5 \times 10^8 \frac{N}{m^2_s} \times 2,6 \times 10^6 \frac{N}{m^2}} \times 439\,252,362 \frac{N}{m^2} \quad (65)$$

$$e = 0,2135\,m \quad (66)$$

Convirtiendo el espesor de *m* a *cm*

$$e = 21,35\,cm \quad (67)$$

Fernández (2016), nos dice que: “Para digestores con una altura mayor a los 3,05 m, la norma ACI 350-06 sugiere que el espesor del tanque sea a lo menos 0,305 m” (p. 199). En el presente proyecto nuestro espesor calculado es menor, por lo tanto, vamos a seleccionar el espesor mínimo que sugiere la norma.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de las dimensiones del digestor.

Tabla 41

Dimensiones del digestor anaeróbico

Digestor Anaerobio	
Material de Construcción	Hormigón armado
Forma	cilíndrico
V _{útil} digestión	3 784,35 m ³

Digestor Anaerobio	
Diámetro	27
Altura del Sustrato en el Digestor	6,61 m
V_{digestor}	4 541,22 m ³
Altura del Digestor	7,9
Espesor de la Pared	0,305 m

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.4 Gasómetro

En el presente proyecto se ha seleccionado un gasómetro integrado al digestor, siendo cubiertas de doble membrana con un soplador de aire dentro del espacio entre las dos membranas. Esta selección fue basada por las siguientes ventajas de los gasómetros integrados:

- Es ampliamente usado en las plantas de biogás, especialmente en digestores verticales, siendo este el digestor que se va a utilizar en el presente proyecto (FNR, 2010).

- Debido a que es un gasómetro integrado al reactor se ahorra espacio en la planta de biogás, además no necesita más trabajo de construcción (FNR, 2010).

- No requieren mantenimiento, evitando la paralización en la central de biogás (FNR, 2010).

A continuación, en la tabla 42 se presenta las especificaciones de la cubierta de doble membrana utilizada en el presente proyecto.

Tabla 42

Especificaciones del gasómetro

Especificaciones de diseño	
Material	Los materiales a utilizar pueden ser: Jebe de butilo, mezcla de polietileno -polipropileno o jebe de EPDM.
Consideraciones especiales	Existe un soplado de aire entre 2 planchas de plástico que realizan la función de aislar el biogás generado y suelen tener una forma de semiesfera.

Especificaciones de diseño

Para evitar pérdidas de biogás el gasómetro debe de tener un bajo índice de permeabilidad, además deben ser resistente a los rayos UV y al clima.

Fuente: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2010)

El biogás generado en el digestor, es utilizado inmediatamente como combustible por el motor, debido a esto la planta de biogás no necesitará un gran depósito para el almacenamiento de biogás (Fernández, 2016).

Fernández (2016), menciona que: “se debe de prever como mínimo un volumen de almacenamiento que cubra la producción de biogás de 4 a 6 horas”. Por lo que, a continuación, calcularemos el volumen necesario del gasómetro para almacenar el biogás producido por el digestor anaerobio en 4 horas.

Si la producción de biogás diaria es de $3\,298,061\,m^3$, entonces la capacidad del gasómetro para almacenar 4 horas de producción de biogás será:

$$V_{gasometro} = 3\,298,061 \frac{m^3}{d} \times \frac{1\,d}{24\,h} \times 4h \quad (68)$$

$$V_{gasometro} = 549,677\,m^3 \quad (69)$$

El material utilizado para el gasómetro será de jebe de EPDM, debido a su resistencia a los rayos UV, al clima y su alta vida útil, además Fernández (2016) y Estela (2016) recomiendan el uso de las membranas EPDM en el uso de gasómetros.

5.3.3.5 Diseño Térmico

El cálculo de calor necesario en los digestores de plantas de biogás se debe generalmente a compensar las pérdidas de calor debido a la diferencia de temperatura con el exterior y al aumento de temperatura del sustrato para la digestión y aumentar la temperatura del sustrato hasta la temperatura de digestión ($35^{\circ}C$).

5.3.3.5.1 Pérdidas Térmicas del Digestor

A continuación, se va a calcular la transferencia de calor entre el digestor y el ambiente, se ha considerado la transferencia de calor a través de las paredes, piso y cubierta del digestor, además para evitar que la temperatura de sustrato este por debajo de la requerida para digestión se ha optado por hacer los cálculos térmicos en las condiciones más desfavorables.

Antes de calcular las pérdidas térmicas, se procede hallar la temperatura ambiente y la velocidad del viento del distrito de Huacho.

-Temperatura ambiente y velocidad del viento: a partir de los datos históricos obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) se ha obtenido la temperatura máxima promedio y la velocidad del viento promedio en el distrito de Huacho.

En la siguiente tabla se presenta la temperatura y velocidad del viento en el distrito de Huacho.

Tabla 43

Temperatura y Velocidad del Viento

Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)
17,372	2,102

Fuente: Elaboración propia

A continuación, calcularemos la transferencia de calor por conducción, convección y radiación:

- Conducción y convección: como se mencionó en el capítulo 2, se puede combinar la transferencia de calor por conducción y convección mediante un coeficiente global de transferencia de calor (U), definido por la ecuación 70.

$$q = UA\Delta T \quad (70)$$

Se va a hallar la transferencia de calor por las paredes, piso y cubierta del digestor, a continuación, se calculará la transferencia de calor por conducción y convección a través de las paredes.

- a) Paredes: para calcular la transferencia de calor a través de las paredes del digestor es necesario hallar U , donde U se va a calcular mediante la ecuación 71.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (71)$$

Donde:

h_1 : coeficiente de convección de la pared con el sustrato.

Δx : espesor de la pared.

k : coeficiente de conducción de la pared.

h_2 : coeficiente de convección de la pared con el aire.

Se ha considerado $h_1 = 594 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, se ha seleccionado este valor considerando en el supuesto caso que el sustrato sea agua, esta afirmación se da debido al bajo contenido de sólidos presentes en el sustrato (Cárdenas, 2009).

Para poder realizar el cálculo de h_2 Sandström (2008) recomienda asumir:

- El aire tiene un flujo turbulento y forzado.
- Existen condiciones estacionarias de operación.
- El aire se trata como un gas ideal.
- La presión atmosférica local es de 1 atm.

- Los valores de la temperatura tomados para los cálculos se dio en el día donde las condiciones ambientales fueron las más desfavorables.

A continuación, se calculará las características del aire en el distrito de Huacho.

$$Temperatura = 17,372\text{ }^{\circ}\text{C} = 17,372 + 273 = 290,372\text{ K}$$

$$Velocidad\ del\ viento = 2,102\ \frac{m}{s}$$

Para calcular la conductividad térmica (k), viscosidad cinemática (ν) y el número de Prandtl (Pr) se ha interpolado en la tabla que se encuentra en el anexo 1.

$$\text{Conductividad térmica } (k) = 0,02494\ \frac{W}{m.K}$$

$$\text{Viscosidad cinemática } (\nu) = 1,492 \times 10^{-5}\ \frac{m^2}{s}$$

$$\text{Número de Prandtl } (Pr) = 0,7316$$

A continuación, calcularemos el número de Reynolds y de Nusselt.

-Número de Reynolds (Re_L)

$$Re_L = \frac{u_{\infty} \times L}{\nu} \quad (72)$$

Donde:

u_{∞} : velocidad media del aire.

L : alto del digestor.

ν : viscosidad cinemática

$$Re_L = \frac{2,102\ \frac{m}{s} \times 7,9\ m}{1,492 \times 10^{-5}\ \frac{m^2}{s}} \quad (73)$$

$$Re_L = 11,13 \times 10^5$$

Por lo que $Re_L > 5 \times 10^5$, comprobamos que se trata de un fluido con flujo turbulento.

-Número de Nusselt (N_u)

$$N_u = \frac{h \times L}{k} = 0,037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (74)$$

Donde:

h : coeficiente de convección

Pr : número de Prandtl

$$N_u = 0,037 \times (11,13 \times 10^5)^{0.8} \times (0,7316)^{\frac{1}{3}} \quad (75)$$

$$N_u = 2\,291,689$$

Calculando el coeficiente de convección mediante la ecuación 76.

$$2291,689 = \frac{h \times 7,9 \text{ m}}{0,02494 \frac{W}{m \cdot K}} \quad (76)$$

$$h = 7,235 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Puesto que $h < 25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, comprobamos que se trata de un fluido de flujo natural o libre.

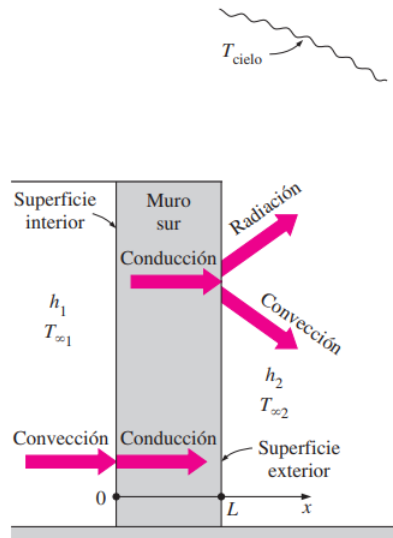
A continuación se procede al cálculo de la temperatura de la superficie de la pared del digestor (T_s), la T_s se calculará mediante la condición de frontera generalizada, donde menciona que una superficie puede estar sometido a convección, radiación y conducción. En este caso se obtiene la condición de frontera a partir de un balance de energía superficial, expresado de la siguiente manera (Çengel, 2007).

$$\begin{aligned} & \text{(Transferencia de calor hacia la superficie en todo los modos)} \\ & = \text{transferencia de calor desde la superficie en todo los modos} \end{aligned} \quad (77)$$

En la pared del digestor del presente proyecto se presenta transferencia de calor por conducción, convección y radiación como se presenta en la siguiente figura.

Figura 17

Transferencia de calor en la pared del digestor



Fuente: Çengel, 2007

La condición de frontera en la pared del digestor es la siguiente:

$$\frac{-k(T_s - T_{\infty 1})}{e} = h_2(T_s - T_{\infty 2}) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{cielo}^4) \quad (78)$$

Donde:

k : conductividad térmica del muro de hormigón ($\frac{W}{m.K}$)

T_s : temperatura superficie exterior del muro de hormigón (K)

$T_{\infty 1}$: temperatura al interior del digestor (K)

e : espesor del muro de hormigón (m)

h_2 : coeficiente de convección entre el aire y el muro de hormigón ($\frac{W}{m^2.K}$)

$T_{\infty 2}$: temperatura del ambiente (K)

ϵ : emisividad del muro de hormigón

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$)

T_{cielo} : temperatura del cielo (K)

$k = \frac{2,3 W}{m.K}$ (Rynkowski, 2018)

Antes de calcular el coeficiente de convección, hallaremos la temperatura del cielo mediante la siguiente ecuación (Frigerio y L. Saravia, 1992).

$$T_{cielo}^4 = \epsilon \times T_{aire}^4 \quad (79)$$

Donde:

T_{cielo} : temperatura del cielo ($^{\circ}C$)

ϵ : emisividad aparente de la atmósfera

T_{aire} : temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

A partir de la siguiente ecuación se calculará ϵ (Frigerio y L. Saravia, 1992).

$$\epsilon = 0,711 + 0,56 \times \frac{T_{aire}}{100} + 0,73 \times \left(\frac{T_{aire}}{100}\right)^2 \quad (80)$$

$$\epsilon = 0,711 + 0,56 \times \frac{17,372}{100} + 0,73 \times \left(\frac{17,372}{100}\right)^2 \quad (81)$$

$$\epsilon = 0,711 + 0,56 \times \frac{17,372}{100} + 0,73 \times \left(\frac{17,372}{100}\right)^2 \quad (82)$$

$$\epsilon = 0,83$$

A partir de la ecuación 79 se hallará la T_{cielo} .

$$T_{cielo} = \sqrt[4]{0,83 \times (17,372^{\circ}C)^4} \quad (83)$$

$$T_{cielo} = 16,581^{\circ}C = 289,581 K \quad (84)$$

Reemplazando T_{cielo} en la ecuación 78.

$$\frac{-2,3 \frac{W}{m.K} (T_s - 308K)}{0,2135} = 7,235 \frac{W}{m^2.K} (T_s - 290,372K) + 0,93 \times (5,67 \times 10^{-8}) \cdot (T_s^4 - 289,581^4) \quad (85)$$

$$1\,236,1 = 3,845T_s + 1,126 \times 10^{-8}T_s^4 \quad (86)$$

$$T_s = 298,343K \quad (87)$$

Conociendo la temperatura de la superficie exterior del digestor y que el aire tiene un flujo natural, se procede a calcular el verdadero valor del coeficiente de convección entre el aire y el muro del digestor.

Primero se calculará las propiedades del viento a la temperatura de película T_f que se define mediante la siguiente ecuación (Çengel, 2007).

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (88)$$

Donde:

T_s : temperatura de la parte exterior del muro del digestor ($^{\circ}K$)

T_∞ : temperatura del aire ($^{\circ}K$)

$$T_f = \frac{298,343 K + 290,372K}{2} \quad (89)$$

$$T_f = 294,358 K \quad (90)$$

Ahora se procede hallar las propiedades del aire (k, v y P_r) a T_f , además para calcular k, v y P_r se va a interpolar los datos en la tabla del anexo 1.

$$\text{Conductividad térmica } (k) = 0,02528 \frac{W}{m.K} \quad (91)$$

$$\text{Viscosidad cinemática } (v) = 1,533 \times 10^{-5} m^2.s \quad (92)$$

(93)

$$\text{Número de Prandtl } (P_r) = 0,7304$$

Continuando con el cálculo del coeficiente de convección, se va a calcular el número de Grashof mediante la siguiente ecuación.

$$G_r = \frac{g \times B \times L^3 \times (T_s - T_\infty)}{\nu^2} \quad (94)$$

Donde:

g : gravedad ($9,8 \frac{m^2}{s}$)

B : coeficiente de expansión volumétrica ($\frac{1}{T_f}$)

L : altura de la pared del digestor ($7.9 m$)

$$G_r = \frac{9,8 \frac{m^2}{s} \times \frac{1}{294,358 K} \times 7,9^3 \times (298,343 K - 290,372 K)}{(1,533 \times 10^{-5})^2} \quad (95)$$

$$G_r = 5,567 \times 10^{11} \quad (96)$$

A continuación, se procede a calcular en número de Rayleigh.

$$R_a = G_r \times P_r \quad (97)$$

$$R_a = 4,066 \times 10^{11} \quad (98)$$

Mediante la siguiente relación se comprueba si el digestor en forma de cilindro se puede tomar como una placa vertical.

$$D \geq \frac{35L}{G_r^{\frac{1}{4}}} \quad (99)$$

Donde:

D : diámetro del digestor

$$27m \geq \frac{35 \times 7,9m}{(5,567 \times 10^{11})^{\frac{1}{4}}} \quad (100)$$

$$27m \geq 0,32m \quad (101)$$

Debido a que la condición se cumple, se puede tomar el cilindro vertical como una placa vertical.

Se procede a calcular el número de Nusselt.

$$N_u = 0,1 \times R_a^{\frac{1}{3}} \quad (102)$$

$$N_u = 0,1 \times (4,066 \times 10^{11})^{\frac{1}{3}} \quad (103)$$

$$N_u = 740,837 \quad (104)$$

Ahora se procede a calcular el coeficiente de convección entre la pared del digestor y el aire mediante la siguiente ecuación.

$$N_u = \frac{h \cdot L}{k} \quad (105)$$

$$h = \frac{N_u \cdot k}{L} \quad (106)$$

$$h = \frac{740,837 \times 0,02528 \frac{W}{m \cdot K}}{7,9m} \quad (107)$$

$$h = 2,371 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (108)$$

A continuación, se calculará el coeficiente de transferencia global (U) para la pared del digestor a través de la ecuación 12.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (12)$$

$$U_{pared} = \frac{1}{\frac{1}{594 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0,2135 m}{2,3 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{2,371 \frac{W}{m^2 \cdot K}}} \quad (109)$$

$$U_{pared} = 1,937 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (110)$$

Se procede a calcular el calor transferido por conducción y convección a través de la pared del digestor mediante la ecuación 21.

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (21)$$

$$Q_{pared} = (T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \times U_{pared} \times A_{pared} \quad (111)$$

Donde:

Temperatura al interior del digestor ($T_{\infty 1}$) = 308 K

Temperatura del aire ($T_{\infty 2}$) = 290,372 K

Área de la pared del digestor (A_{pared}) = $\pi \cdot D_{digestor} \cdot H_{digestor}$

$$Q_{pared} = (308 K - 290,372 K) \times 1,937 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times (\pi \times 27m \times 7,9m) \quad (112)$$

$$Q_{pared} = 22,881 Kw \quad (113)$$

b) Piso:

A continuación, se procede a calcular la transferencia de calor por conducción a través del piso, además el coeficiente global de transferencia de calor del piso $U_{iso} = U_{pared}$ debido a que es del mismo material de hormigón armado, tienen el mismo espesor y la temperatura del suelo es la misma respecto al ambiente debido a que el digestor se encuentra al nivel del suelo.

$$Q_{piso} = (T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \times U_{piso} \times A_{piso} \quad (114)$$

Donde:

$$A_{piso} = \pi \times \left(\frac{D_{digestor}}{2}\right)^2$$

$$Q_{piso} = (308 K - 290,372 K) \times 1,937 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times \pi \times \left(\frac{27m}{2}\right)^2 \quad (115)$$

$$Q_{piso} = 19,55 Kw \quad (116)$$

c) Cubierta:

Por último, se calcula la transferencia de calor por conducción y convección a través de la cubierta. Se tomará un valor típico de $U_{cubierta} = 1,942 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ (Fernández, 2016).

$$Q_{cubierta} = (T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \times U_{cubierta} \times A_{cubierta} \quad (117)$$

$$Q_{cubierta} = (308 K - 290,372 K) \times 1,942 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 2\pi \times \left(\frac{27m}{2}\right)^2 \quad (118)$$

$$Q_{cubierta} = 39,201 kW \quad (119)$$

Donde el calor perdido total por convección y conducción en el digestor es:

$$Q_{cond,conv} = Q_{pared} + Q_{piso} + Q_{cubierta} \quad (120)$$

$$Q_{cond,conv} = 22,881 kW + 19,55 kW + 39,201 kW \quad (121)$$

$$Q_{cond,conv} = 81.632 kW \quad (122)$$

- Radiación:

Ahora se va a calcular la transferencia de calor por radiación del digestor empleando la ecuación

15.

$$Q_{rad} = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{ielo}^4) \quad (15)$$

Donde:

A: área del cilindro (m^2)

ε : emisividad del muro de hormigón

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$)

T_s : temperatura de la superficie exterior del digestor (K)

T_{cielo} : temperatura del cielo (K)

$$Q_{rad} = (2\pi(\frac{27m}{2}) \times 7,9m + 2\pi \times (\frac{27m}{2})^2) \times 0,93 \times (5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}) \times (298,343 K^4 - 289,581 K^4) \quad (123)$$

$$Q_{rad} = 85,237 kW \quad (124)$$

Siendo el total de pérdidas por transferencia de calor igual a:

$$Q_{total} = 81,632 Kw + 85,237 kW \quad (125)$$

$$Q_{total} = 166,869 kW$$

$$Q_{total} = Q_{cond,conv} + Q_{rad} \quad (126)$$

$$Q_{total} = Q_{cond,conv} + Q_{rad} 166,869 kW \quad (127)$$

5.3.3.5.2 Aislamiento Térmico del Digestor

Después de haber calculado las pérdidas de calor en el digestor, es necesario seleccionar un aislamiento para disminuir dichas pérdidas.

De todos los materiales comerciales utilizados como aislamiento, se concluye que los materiales más idóneos que se pueden emplear para el aislamiento en un biodigestor son los siguientes: la espuma de polietileno y la espuma de poliuretano (Cárdenas, 2009).

En el presente proyecto se ha optado por la selección de la espuma de poliuretano como material aislante, debido a que posee un mejor rendimiento, una mayor resistencia a la compresión y menor coeficiente de conductividad térmica en comparación a la espuma de polietileno.

Las propiedades de la espuma de poliuretano se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 44

Propiedades de la espuma de poliuretano

Propiedades	Valor
Densidad	45-60 kg/m ³
Resistencia a compresión	200 N/mm ²
Conductividad térmica	0,021 W/m·K
Coeficiente de fricción	0,0135
T° de trabajo	-50 a 80 °C
Humedad	0 % - 100%

Fuente: Cárdenas, 2009

Cárdenas (2009), nos dice que: “para la elección de un espesor óptimo de aislante, se debe realizar cálculos con diferentes espesores para un mismo tipo de aislante” (p. 92). Mediante la siguiente ecuación se va a determinar el coeficiente global de transferencia de calor U para diferentes espesores de espuma de poliuretano:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x_H}{k_H} + \frac{\Delta x_{Ais}}{k_{ais}} + \frac{1}{h_2}} \quad (128)$$

U : Coeficiente global de transferencia de calor ($\frac{W}{m^2.K}$)

Coeficiente de convección del sustrato (h_1) = $594 \frac{W}{m^2.K}$

Resistencia térmica del concreto (k_H) = $2,3 \frac{W}{m.K}$

Espesor del muro de concreto (Δx_H) = $0,2135m$

Resistencia térmica del aislante (k_{ais}) = $0,021 \frac{W}{m.K}$

Espesor del aislante : (Δx_{ais})

Coeficiente de convección exterior del digestor (h_2) = $2,371 \frac{W}{m^2.K}$

En este caso se tomará como referencia el coeficiente global de transferencia de calor de la pared del digestor para realizar dichos cálculos, en la siguiente tabla se presentan los datos obtenidos con diferentes espesores del aislante.

Tabla 45

Porcentaje de perdida de calor respecto al coeficiente de calor con diferentes espesores de aislamiento.

Espesor del aislante (mm)	$U_{sin\text{ aislamiento}}$ ($\frac{W}{m^2.K}$)	$U_{aislamiento}$ ($\frac{W}{m^2.K}$)	% pérdida de calor
10	1,937	1,008	52,039
20	1,937	0,681	35,157
40	1,937	0,413	21,322
80	1,937	0,231	11,926
100	1,937	0,19	9,809

Fuente: elaboración propia

Según el trabajo de investigación elaborado por Teleszewski y Żukowski (2018), el coeficiente de transferencia de calor típico para un digestor de dimensiones parecidas al del presente proyecto es de $0,34 \frac{W}{m^2.K}$, por lo tanto vamos a seleccionar un aislante de 40 mm de espesor.

En la siguiente tabla se presentan los resultados del calor perdido en el digestor, pero incluyendo el aislante de espuma de poliuretano con 40 mm de espesor.

Tabla 46

Pérdidas de calor en el digestor

Medio de Transferencia de Calor	Parte del Digestor	$U(\frac{W}{m^2.K})$	Calor Perdido (kW)
Conducción y Convección	Pared	0,413	4,879
	Piso	0,413	4,168
	Cubierta	1,942	39,201
Radiación	Digestor completo	-	85,237
Calor perdido total (Q_{tp})			48,248

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.5.2 Incremento de la Temperatura del Sustrato

Ahora se procede a calcular el calor necesario para elevar la temperatura del sustrato hasta los valores requeridos para la digestión. A pesar de que en el presente proyecto el sustrato es la mezcla de purín porcino con residuos de pescado, se puede aproximar sus propiedades a la del agua a la misma temperatura debido a que el mayor porcentaje del sustrato es agua (Fernández, 2016).

El calor necesario para elevar la temperatura del sustrato se va a calcular mediante la siguiente ecuación.

$$Q_{ts} = \dot{m} \times C_p \times (T_{requerida} - T_{inicial}) \quad (129)$$

Donde:

$$\text{flujo de masa del sustrato entrante } (\dot{m}) = 126\,722 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$\text{calor específico del agua } (C_p) = 4\,184,698 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$$

A continuación, se procede a interpolar el calor específico a del agua a temperatura ambiente o inicial ($T_{\text{inicial}} = 290,372\text{K}$), la tabla sobre las propiedades del agua se encuentra en el anexo 2.

$$C_p = 4\,184,698 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$$

$$Q_{ts} = 126\,722 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 4\,184,698 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \times (308\text{K} - 290,372\text{K}) \quad (130)$$

$$Q_{ts} = 9\,348,010 \frac{\text{MJ}}{\text{día}} \quad (131)$$

Convirtiendo Q_{ts} a W nos quedaría.

$$Q_{ts} = 108,195 \frac{\text{kW}}{\text{día}} \quad (132)$$

Por lo tanto, el calor total necesario para el digestor es el siguiente:

$$Q_T = Q_{tp} + Q_{ts} \quad (133)$$

$$Q_T = 48,248 \frac{\text{kW}}{\text{día}} + 108,195 \frac{\text{kW}}{\text{día}} \quad (134)$$

$$Q_T = 156,443 \frac{\text{kW}}{\text{día}} \quad (135)$$

5.3.4 Acondicionamiento del Biogás

La purificación del biogás es importante debido a que, a mayor calidad, el motor requerirá menor mantenimiento y así lograr que la central de biogás se encuentre operativa el mayor número de horas posibles posible (Estella, 2016).

El tratamiento básico para el acondicionamiento del biogás consta básicamente de: reducción de humedad para reducir el porcentaje de agua, eliminación desulfuro de hidrógeno (H_2S) y reducción de siloxanos (Estella, 2016).

5.3.5 Unidad de Cogeneración

En el presente proyecto el biogás generado es aprovechado en una unidad de cogeneración CHP, obteniendo simultáneamente energía térmica y eléctrica. Se ha optado por esta tecnología debido a que son los más usados actualmente en plantas de biogás con potencias desde 30 Kw hasta 3MW (Flotats, et al.,2016).

5.3.5.1 Motor

Existen diversos modelos de motores generadores, pero se debe de seleccionar el motor que más se ajuste a los requerimientos de la planta, a continuación, se presenta los datos necesarios para la selección del motor.

- Disponibilidad del biogás:

$$\text{Producción diaria de biogas} = 3\,298,061 \frac{m^3}{d} \quad (136)$$

- Demanda térmica: el calor total necesario para calentar el digestor fue calculado en la ecuación 135.

$$Q_T = 156,443 \text{ kW} \quad (135)$$

- Poder calorífico del biogás (PCI_{BIOGAS}): debido a que el biogás generado en la central de biogás cuenta con 59% de CH_4 y el poder calorífico del CH_4 es $6,27 \frac{kWh}{m^3}$ (Fernandez,2016), el poder calorífico del biogás es:

$$PCI_{BIOGAS} = 6,27 \frac{kWh}{m^3} \times 0,59 \quad (137)$$

$$PCI_{BIOGAS} = 3,6993 \frac{kWh}{m^3} \quad (138)$$

- Potencia generada: conociendo los datos de la producción diaria de biogás y el poder calorífico del mismo, podemos calcular la potencia generada mediante la siguiente ecuación.

$$potencia\ generaa = 3298,061 \frac{m^3}{d} \times 3,6993 \frac{kWh}{m^3} \times \frac{1 d}{24 h} \quad (139)$$

$$potencia\ generada = 508,355 kW \quad (140)$$

5.3.5.2 Seleccionamiento del motor

En el presente proyecto se ha seleccionado un grupo de cogeneración de la empresa GENTEC que pone a disposición diversos módulos de cogeneración especializados en biogás.

En concreto se ha seleccionado el modelo KE – MBG 200 debido a que cumplen las necesidades y requerimientos de la planta que se verán a continuación, además de las diversas prestaciones. La ficha técnica del motor KE – MBG 200 se presentan en el anexo 3.

A continuación, se procede a tener en cuenta ciertos puntos para una correcta selección del grupo de cogeneración, se seguirá la metodología descrita por Fernández (2016).

-La potencia térmica necesaria:

Puesto que la potencia necesaria para calentar el digestor es $156,443 \frac{kW}{día}$ y la potencia térmica entregada por el motor es igual a $226 \frac{kW}{día}$, entonces se cumple la primera condición.

-La potencia necesaria para que funcione el motor:

Siendo la potencia para que el motor funcione correctamente igual a $508,2 kW$ y la potencia generada por el biogás de la planta igual a $508,355 kW$, entonces se cumple la segunda condición debido a que $508,355 kW > 508,2 kW$.

-Rendimiento térmico equivalente (REE):

En el decreto supremo N° 064-2005-EM, artículo 5°, considera que $REE = 0,55$ para centrales mayores a 33 kV, el REE del motor seleccionado se va a calcular mediante la siguiente ecuación (El Peruano, 2005).

$$REE = \frac{E}{Q - \frac{V}{0.9}} \quad (141)$$

Donde:

E : Energía eléctrica generada en bornes de alternador, expresada en MWh.

Q : Energía suministrada por el combustible utilizado, calculada en MWh y con base a su poder calorífico inferior.

V : Cantidad del calor útil procedente, exclusivamente, de la central de cogeneración, expresada en MWh.

$$REE = \frac{200 \times 10^{-3} MWh}{508,2 \times 10^{-3} MWh - \frac{226 \times 10^{-3} MWh}{0,9}} \quad (142)$$

$$REE = 0,78 \quad (143)$$

El REE del motor seleccionado es 0,78 por lo que el motor cumple con las 3 necesidades o requerimientos de la planta de biogás.

5.3.5.3 Producción de Energía Eléctrica y Térmica

Debido que la central estará operativo 8500 horas/año y la potencia eléctrica y térmica instalada son respectivamente 200 kW y 226 kW, resulta que la producción de energía eléctrica y térmica anual representan un total de 1 700 000 kWh y 1 921 000 kWh respectivamente.

5.3.5.4 Consumo del Biogás

A continuación, se calcula el consumo de biogás por parte del motor y de esta manera calcular el excedente de biogás producido.

El consumo del motor se va a calcular mediante la fórmula 144, además se debe de considerar que la central estará en funcionamiento 8500 horas anuales, dejando un margen para posibles averías o mantenimiento respectivo (Estella, 2016).

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Potencia introducida}}{\text{PCI biogás}} \quad (144)$$

$$\text{Consumo} = \frac{508,2 \text{ kW}}{3,6993 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} \quad (145)$$

$$\text{Consumo} = 137,377 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (146)$$

$$\text{Consumo} = 1\,167\,707,404 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \quad (147)$$

Teniendo en cuenta que los digestores de la planta de biogás trabajan durante todo el año, el excedente de biogás se calcula a continuación, donde el excedente del mismo se quemará en la antorcha de emergencia.

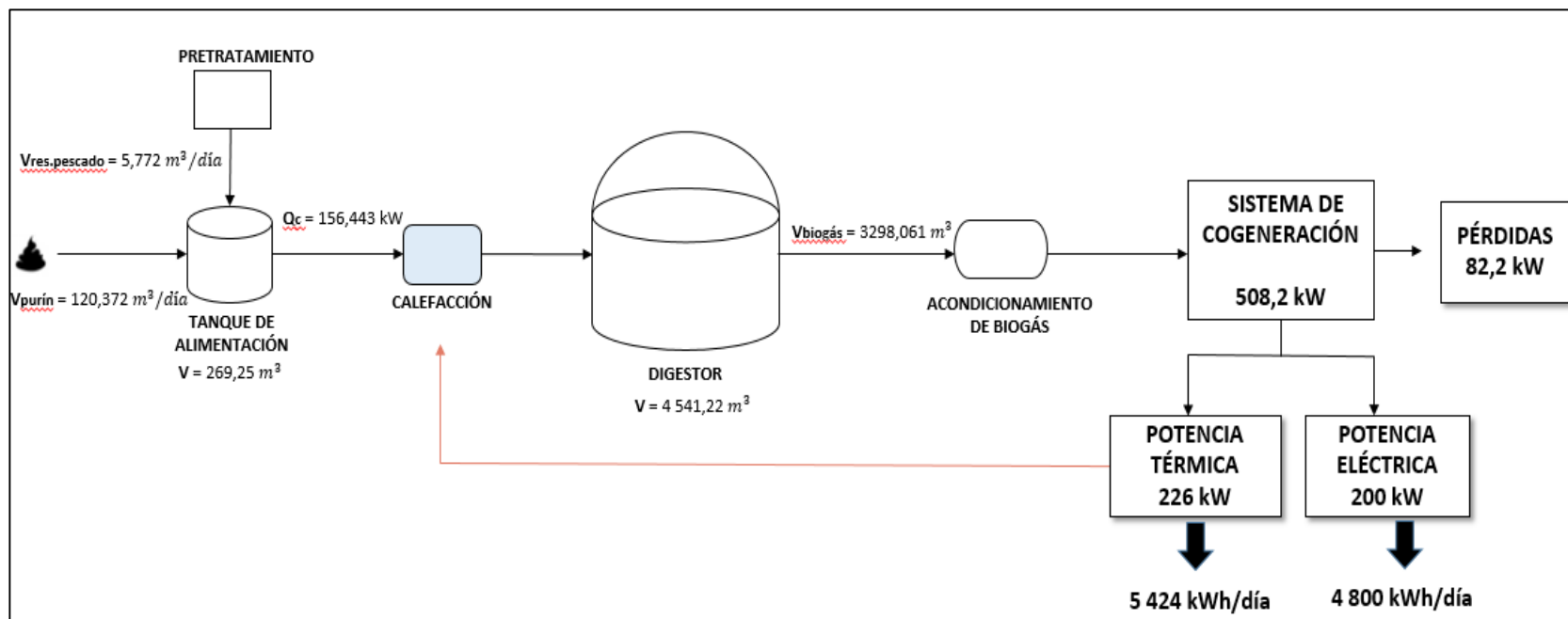
$$\text{Excedente biogás} = 3\,298,061 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 365 \frac{\text{d}}{\text{año}} - 1\,167\,707,404 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \quad (148)$$

$$\text{Excedente biogás} = 36\,084,861 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \quad (149)$$

En la siguiente figura se presenta el flujograma completo de la planta de biogás, resumiendo los sistemas principales para el funcionamiento de la planta.

Figura 18

Flujograma de la planta de biogás



Fuente: Elaboración propia

5.4 Estudio Económico

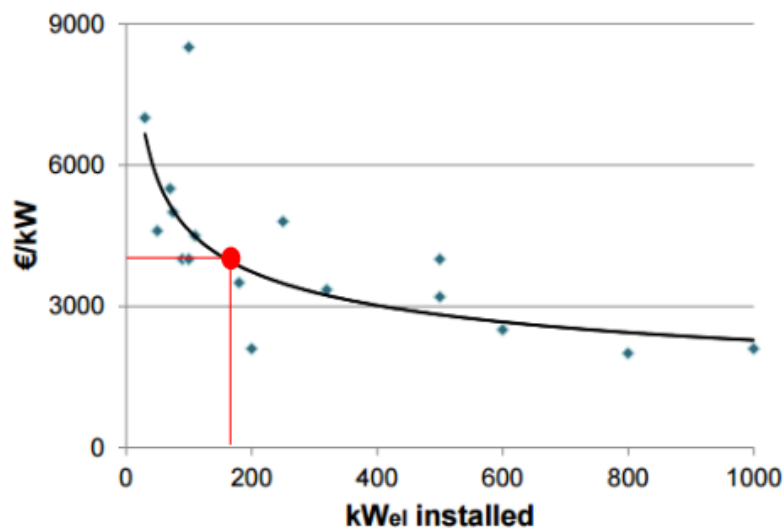
En este apartado se va analizar el aspecto económico de la central de biogás, los gastos por instalación y mantenimiento de operación, así como el ingreso por la energía eléctrica generada, con el objetivo de determinar la viabilidad económica del proyecto.

5.4.1 Coste Total de la Instalación

El costo de inversión realizado en la central de biogás se puede estimar mediante la siguiente curva de la figura 19.

Figura 19

Inversión realizada en una central de biogás en función de la potencia eléctrica instalada



Fuente: (Fernandez,2016)

La potencia eléctrica instalada en la central es de 200 kW, por lo que el costo aproximado por instalación se calculará mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Costo por instalación} = 3800 \frac{\$}{kW} \times 200kW \quad (150)$$

$$\text{Costo por instalación} = \$ 720.000 \quad (151)$$

Para determinar un dato más exacto de los costos de todos los componentes y sistemas de la central antes descritos (biodigestor, tanque de alimentación, gasómetros, unidad de cogeneración, etc) se va a calcular a través del método de escalamiento, que consiste estimar el costo en función del coste conocido de otro equipo de similares características (Turton et. al, 2012). Los costes de equipos con características similares fueron obtenidos del proyecto de una central de biogás a partir de la codigestión de estiércol de cerdo y glicerina (Fernández, 2016).

Los costes totales por instalación se calcularán mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{A_a}{A_b}\right)^n \quad (152)$$

Donde:

- C_a y A_a : Son el costo y capacidad respectivamente del equipo que se pretende estimar

- C_b y A_b : Son el costo y capacidad respectivamente del equipo conocido en el que se va basar la estimación.

-n: Se va a considerar 0,6 (Fernández, 2016).

En la siguiente tabla se presenta el resumen de C_b y A_b de los equipos del proyecto de (Fernández, 2016).

Tabla 47

Valor de C_b y A_b del equipo que se va a basar la estimación

	Tanque de alimentación (Vol.)	Gasómetro (Vol.)	Digestor Anaerobio (Vol.)	Aislante térmico (Esp.)	Motor de cogeneración (Pot.)
C_b	185 m ³	1150 m ³	1565 m ³	10 cm	410 kW
A_b	\$35.940,64	\$74.049,00	\$191.612,59	\$7.270,00	\$252.349,00

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se calculará los costes de los equipos del presente proyecto.

-Tanque de alimentación: El tanque del presente proyecto estará elaborado de concreto con una forma cilíndrica y con volumen total de 269,9503 m³, por lo que el coste por su construcción se determinará mediante la siguiente ecuación.

$$C_a = C_b \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n \quad (153)$$

$$C_a = \$35.940,64 \left(\frac{269,9503 \text{ m}^3}{185 \text{ m}^3} \right)^{0.6} \quad (154)$$

$$C_a = \$45.087,18 \quad (155)$$

-Digestor Anaerobio: El digestor anaeróbico tendrá un volumen de 3784,35 m³ estando revestido por un aislante térmico y en la parte superior cubierta por un gasómetro, por lo que el coste por su construcción se determinará mediante la siguiente ecuación.

$$C_a = C_b \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n \quad (156)$$

$$C_a = \$191.612,59 \left(\frac{3784,35 \text{ m}^3}{1565 \text{ m}^3} \right)^{0.6} \quad (157)$$

$$C_a = \$325.469,44 \quad (158)$$

-Aislante térmico: el material utilizado para aislar el digestor será de espuma de poliuretano con un espesor de 4 cm, por lo que el coste por su instalación se determinará mediante la siguiente ecuación.

$$C_a = C_b \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n \quad (159)$$

$$C_a = \$7.270 \left(\frac{4 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} \right)^{0.6} \quad (160)$$

$$C_a = \$4.195,37 \quad (161)$$

-Gasómetro: el biogás producido se va almacenar en una membrana con un volumen de 549,677 m³, por lo que el coste por su construcción e instalación se determinará mediante la siguiente ecuación.

$$C_a = C_b \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n \quad (162)$$

$$C_a = \$74.049,00 \left(\frac{549,677 \text{ m}^3}{1150 \text{ m}^3} \right)^{0.6} \quad (163)$$

$$C_a = \$47.551,32 \quad (164)$$

-Motor de cogeneración: la energía eléctrica y térmica será producida a partir de un motor de cogeneración de una potencia de 508,2 kW, por lo que el coste por su instalación se determinará mediante la siguiente ecuación.

$$C_a = C_b \left(\frac{A_a}{A_b} \right)^n \quad (165)$$

$$C_a = \$252.349 \left(\frac{508,2 \text{ kW}}{410 \text{ kW}} \right)^{0.6} \quad (166)$$

$$C_a = \$287.046,38 \quad (166)$$

Siendo el coste total de los equipos antes mencionados, por lo tanto, el coste total por instalación de la central de biogás.

$$C_a = \$45.087,18 + \$325.469,44 + \$4.195,37 + \$47.551,32 + \$287.046,38 \quad (167)$$

$$C_a = \$ 709.349,69 \quad (168)$$

Siendo el coste total por instalación de \$ 709.349,69 y estando cerca de los límites por la instalación de una central de 200 kW de energía eléctrica según la figura 19, se procede a calcular el gasto anual por mantenimiento de la central que será el 2% del costo total de la instalación, este porcentaje es calculado por (CNE, 2020), donde estima el porcentaje de costo por mantenimiento por cada tipo de central, este cuadro se adjunta en el anexo N°5.

$$\text{Costo por mantenimiento} = 2\% \times \$709.349,69 \quad (169)$$

$$\text{Costo por mantenimiento} = \$14.186,99 \quad (170)$$

5.4.2 Ingreso por la venta de energía eléctrica

La venta de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es regulada por osinergmin mediante subastas, de esta manera incentivando a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (Osinergmin,2017).

En el anexo N°6 “Características técnicas y económicas de los proyectos RER adjudicados” nos indica que para centrales de biogás el precio de venta de energía eléctrica es de $\frac{\$0,077}{kWh}$, por lo que se procederá a calcular el ingreso por la venta de energía eléctrica.

Primero se calculará la cantidad de energía eléctrica generada anualmente por la central de biogás.

$$\text{Energía electrica anual} = 200kW \times \frac{24h}{\text{día}} \times \frac{354 \text{ día}}{\text{año}} \quad (171)$$

$$\text{Energía electrica anual} = 1\,699\,200 \frac{kWh}{\text{año}} \quad (172)$$

Donde el ingreso anual por venta de energía eléctrica es:

$$\text{Ingreso por venta de energía eléctrica} = \frac{\$0,077}{kWh} \times 1\,699\,200 \frac{kWh}{\text{año}} \quad (173)$$

$$\text{Ingreso anual por venta de energía eléctrica} = \$130.838,4 \quad (174)$$

5.4.3 Viabilidad económica

Para poder calcular la viabilidad económica del proyecto se va considerar los siguientes puntos:

- Financiación de la inversión a cargo de fondos propios.
- Vida útil de la instalación de 15 años.
- Incremento anual de costos de mantenimiento e ingresos del 3% (Fernández, 2016).

En la siguiente tabla se presenta el flujo de caja en el transcurso de los 15 años de vida útil de la central de biogás.

Tabla 48

Flujo de caja de la central de biogás

Año	Costo por instalación	Costo por mantenimiento	Ingreso por venta de energía	Balance económico acumulado
2022	\$709.349,69	\$14.186,99	\$130.838,40	-\$592.698,28
2023	\$0,00	\$14.612,60	\$134.763,55	-\$472.547,33
2024	\$0,00	\$15.050,98	\$138.806,46	-\$348.791,86
2025	\$0,00	\$15.502,51	\$142.970,65	-\$221.323,71
2026	\$0,00	\$15.967,59	\$147.259,77	-\$90.031,53
2027	\$0,00	\$16.446,61	\$151.677,57	\$45.199,42
2028	\$0,00	\$16.940,01	\$156.227,89	\$184.487,30
2029	\$0,00	\$17.448,21	\$160.914,73	\$327.953,82
2030	\$0,00	\$17.971,66	\$165.742,17	\$475.724,33
2031	\$0,00	\$18.510,81	\$170.714,44	\$627.927,96
2032	\$0,00	\$19.066,13	\$175.835,87	\$784.697,69
2033	\$0,00	\$19.638,12	\$181.110,94	\$946.170,52
2034	\$0,00	\$20.227,26	\$186.544,27	\$1.112.487,53
2035	\$0,00	\$20.834,08	\$192.140,60	\$1.283.794,05
2036	\$0,00	\$21.459,10	\$197.904,82	\$1.460.239,77
2037	\$0,00	\$22.102,87	\$203.841,96	\$1.641.978,86

Fuente: elaboración propia

Con el objetivo de estudiar la viabilidad económica del proyecto se analizará los siguientes parámetros: el pay-back, el VAN y la TIR.

El tiempo de proyecto tendrá una duración de 15 años, suponiendo que el ingreso por la venta de energía eléctrica es constante (Fernandez,2016).

-Pay – Back: siendo el total de años que se necesitarán para recuperar la inversión inicial del proyecto, el periodo de recuperación será de 10 años y se obtuvo de la tabla 48.

-VAN (Valor Actual Neto): Es un parámetro que permite estimar la rentabilidad de un proyecto, se calculará mediante la siguiente formula.

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1+r)^i} \quad (175)$$

Siendo:

$I_0 =$ inversión inicial

$n =$ número de periodos

$Q_i =$ flujo de caja en el periodo i

$r =$ tipo de interés o tasa de descuento

Donde $r = 8\%$ (Seminario,2017), tasa de descuento fijado en el Perú.

$$VAN = \$2.036.243,52 \quad (176)$$

-TIR (Tasa interna de retorno): Es la tasa de descuento con la que el $VAN=0$, a cuanto mayor TIR, mayor rentabilidad, por lo tanto, si el TIR es mayor que la tasa de descuento aplicado en el VAN, el proyecto es viable (Fernandez, 2016)

$$0 = -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{(1 + TIR)^i} \quad (177)$$

$$TIR = 17,3 \% \quad (178)$$

Por lo que el TIR es mayor a la tasa de interés aplicado en el VAR el proyecto es viable y se debe aceptar el proyecto, además de contar con un pay-back de 10 años, por lo que inversión se va a recuperar en dicho periodo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De acuerdo al estudio realizado en el presente proyecto, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- a. La energía eléctrica y térmica producida en la central de biogás ubicado en el distrito de Huacho son respectivamente $1,7 \text{ GWh}$ y $1,921 \text{ GWh}$, utilizando la mayor parte de la energía térmica en el propio consumo de la central.
- b. La cantidad disponible de purín porcino y residuos de la industria pesquera son respectivamente: $120,732 \frac{t}{\text{día}}$ y $6,5 \frac{t}{\text{día}}$. Además, a cuanto a su composición el purín porcino tiene un PH de 6,9 – 7,1, contenido de sólidos totales (ST) de 21,8 g/kg y sólidos volátiles (SV) de 17 g/kg. La composición de los residuos de la industria pesquera respecto a su PH es de 7,1, a los sólidos totales (ST) de 369 g/kg y de sólidos volátiles (SV) de 270 g/kg.
- c. La pérdida de calor total en el digestor debido a la transferencia de calor por conducción, convección y radiación son $166,869 \text{ kW}$, por lo que se procede a diseñar un aislante térmico para disminuir estas pérdidas, seleccionando la espuma de poliuretano. Además el calor necesario para elevar el sustrato a la temperatura requerida para la digestión es $156,443 \frac{\text{kW}}{\text{día}}$.
- d. Para lograr el correcto funcionamiento de la central se ha seleccionado los siguientes elementos: sistema de trituración, tanque de alimentación de sustrato con un volumen de $302,74 \text{ m}^3$, digestor de hormigón armado con una altura de $7,9 \text{ m}$ y un diámetro de 27 m , gasómetro de jebe de EPDM con un volumen de $549,677 \text{ m}^3$, aislamiento térmico de

espuma de polietileno y una unidad de cogeneración con una potencia instalada de 508,355 *kW*.

- e. Las condiciones para el correcto funcionamiento de la planta y la optimización de la producción de biogás son: régimen de operación continuo, rango mesofílico (35°C), digestión en una sola fase y por vía húmeda.

Recomendaciones

- a. Fomentar la instalación de nuevas centrales de biogás generado a partir de residuos orgánicos para la producción de energía eléctrica y térmica, puesto que este tipo de tecnología está muy poco desarrollado en nuestro país.
- b. Se debe de realizar la selección de aislamiento para el digestor debido a las pérdidas térmicas, dichas pérdidas se producen a pesar de encontrarse en climas cálidos e influyen en gran medida en el proceso de digestión, siendo la temperatura del sustrato el factor clave para la producción de biogás.
- c. Continuar con la investigación del presente proyecto para la posterior instalación de la central de biogás, verificar su factibilidad y la conectividad a la red eléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Schallenberg, J., et al. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. (1era ed): Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.
- Robles, C. y Rodríguez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39(34), 10.
- Pascual, A., et al. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020*. (1era ed): Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía.
- Acosta, M. y Pasqualino, J. (2014). *Potencial de Uso de Biogás en Colombia*. TEKNOS, 14(2), 27-33.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2019). *Energías renovables: experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética*. (1era ed): GRÁFICA BIBLOS S.A.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2016). *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país*. (1era ed): GRÁFICA BIBLOS S.A.
- Ministerio de Agricultura y Riego (2017). *Diagnóstico de Crianzas Priorizadas para el Plan Ganadero (2017-2021)*.
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura.(2014), *Cerdos y el medio ambiente*. <http://www.fao.org/ag/againfo/themes/es/pigs/Environment.html>.
- Mendiola, S., et al. (1998). *Potencial contaminante del mar por aguas residuales de las industrias de harinas y aceites de pescado*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España, 49(1), 30-33.

Instituto Nacional de Informática (INEI). (2012). IV Censo Nacional Agropecuario 2012.
<http://censos.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/>.

Fernández, L. (2016). *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina* (tesis de pregrado). Universidad de Cádiz, España.

Estella, P. (2016). *Estudio de la producción energética a partir del aprovechamiento del biogás en una granja de ganado bovino* (tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, España.

Flores, J. (2010). *Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizante* (tesis de pregrado). Universidad de las Américas, Ecuador.

Arrieta, w. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado* (tesis de pregrado). Universidad de Piura, Perú.

Altamirano, R. (2017). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganad* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.

Yauyo, L. (2016). *Elaboración de un biodigestor piloto tubular para el manejo de estiércol porcino, en una de las viviendas de la asociación agropecuaria los lúcumos de Pachacamac* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú.

Cuesta, J., Martín, F. José., Vicente, G., Villar, S. (s.f.). *Informe de Vigilancia Tecnológica madri+d. Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. Madrid, España: Fundación madri+d para el Conocimiento.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2010). *Guía sobre el biogás Desde la producción hasta el uso*. (5ta ed): FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *El sector del biogás agroindustrial en España*. Recuperado de <http://eurocarne.com/daal/a1/informes/a2/sector-biogas-agroindustrial-espanol.pdf>

Campos, A. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria* (tesis doctoral). Universitat de Lleida, España.

Flotats, X., Campos, E., Palatsi, J., Bonmatí, X. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. *Porci; Monografías de actualidad*, 65, pp 51-65.

Ojeda, L. (2019). *Análisis y alternativas de solución para la producción de biogás con residuos sólidos de la laguna de oxidación espinar – Puno, periodo 2018* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Perú.

Briseño, L.A (2017). *Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de biogás* (tesis de maestría). Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C., México.

Flotats, X., Bonmatí, A., Fernández, B., Sales, D., Aymerich, E., Irizar, I., ... Font, X. (2016). *De Residuo a Recurso El camino hacia la Sostenibilidad*. España: Mundi-Prensa.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Recuperado de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf

Cárdenas, G. (2009). *Aislamiento térmico de biodigestor en planta de tratamiento de aguas servidas de Osorno* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Chile.

Soncco, S. (2019). *Implementación de sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de la producción de biogás, en el distrito de Yanaoca provincia de Canas* (tesis doctoral).

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. (5ta ed): McGraw-Hill.

Regueiro, L., Carballa, M., Álvarez, J.A. y Lema, J.M. Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates. *Bioresource Technology*, 123 (2012), 507–513.

Risco, J. (2017). *Propuesta de un sistema de gestión ambiental basado en la ISO 14001:2004 Para la empresa Pesquera Pacific Natural Foods S.A.C. – línea de conserva, distrito de Santa (Ancash, Perú)* (tesis de maestría). Universidad Nacional del Santa, Perú.

Ministerio de Energía y Minas (s.f.). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético Industria Conservera*.

Ministerio de Ciencia e innovación, Gobierno de España. (2009). *Cuantificación de materias primas de origen ganadero*. Recuperado de [http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/42EBC9523D85C2FCC12575380034A6A1/\\$FILE/Inf_cuantificacion_ganadero_07-10-2009.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/42EBC9523D85C2FCC12575380034A6A1/$FILE/Inf_cuantificacion_ganadero_07-10-2009.pdf).

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y el Ministerio de Medio Ambiente de España. (2009). *Guía de mejores técnicas del sector porcino*. Recuperado de https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/publicaciones/GuiaMTDsSectorPorcino_tcm30-105316.pdf

Añazco, M.L (2015). *Efecto del selenio orgánico sobre las propiedades tecnológicas y la estabilidad oxidativa de la carne de cerdo en congelación* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú.

Ministerio de la Producción de Perú (s.f.). Plantas Pesqueras. Recuperado de <https://www.produce.gob.pe/index.php/shortcode/servicios-pesca/plantas-pesqueras>

último Anuario Estadístico Pesquero y Acuícola 2018 elaborado por el Ministerio de (FALTA REFERENCIA)

Wellinger, A., Murphy, J. y Baxter, D. (2013). *The biogas handbook Science, production and applications*. Philadelphia, USA: Woodhead publishing.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>.

Instituto Nacional de Informática (INEI). (2012). IV Censo Nacional Agropecuario 2012.
<http://censos.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/>.

Sandström, J. (2008). Temperature calculations in fire exposed structures with the use of adiabatic surface temperatures. Recuperado de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1015872/FULLTEXT01.pdf>.

Rynkowski, P. (2018). Heat loss analysis in the semi-buried anaerobic digester in Northeast Poland. *E3S Web of Conferences*, 44, pp 1-8.

Frigerio, E., Saravia, L. (1991). Emisividad infrarroja de la atmosfera. Medidas en el noroeste argentino. *Anales AFA*, 3, pp 432-438.

Teleszewski, T. J., Żukowski, M. (2018). Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, 19(4), pp 242-250.

Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F., México: McGraw-Hill Interamericana.

Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (29 de diciembre de 2005). Aprueban Reglamento de Cogeneración. *El peruano*. pp. 307556-307558.

Kleeberg, F. y Nieto, M. (2018). *La industria pesquera en el Perú*. Universidad de Lima.

Nario M.J (2017). *Caracterización de la crianza porcina de traspatio en el distrito de San Antonio - Huarochiri (tesis de pregrado)*. Universidad Ricardo Palma.

Cardoso, L.M, Escalante, V.E, Ramírez, M.E y Tomasini, A.C (2021). Guía para el tratamiento de las aguas residuales porcinas. Ciudad de México, México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

ANEXOS

ANEXO N°1: “Población pecuaria, 2005-2017”

Año	Alpaca	Ave	Caprino	Llama	Ovino	Porcino	Vacuno	Vicuña
2005	3 598	99 279	1 953	1 270	14 814	3 011	5 250	174
2006	3 626	117 977	1 937	1 256	14 675	3 074	5 241	...
2007	3 687	120 228	1 926	1 274	14 580	3 116	5 421	...
2008	3 781	131 179	1 904	1 263	14 510	3 151	5 443	...
2009	4 106	137 838	1 929	1 238	14 138	3 257	5 459	...
2010	4 177	130 779	1 968	1 245	14 160	3 254	5 520	...
2011	4 322	128 943	1 946	1 227	14 050	3 263	5 589	...
2012	3 924	137 669	1 949	1 193	12 184	2 991	5 661	...
2013	3 978	137 679	1 928	1 226	12 434	3 132	5 556	...
2014 P/	4 096	144 276	1 905	1 207	12 415	3 205	5 578	...
2015 P/	4 318	151 001	1 882	1 195	11 973	3 201	5 553	...
2016 P/	4 319	158 263	1 865	1 105	11 442	3 105	5 525	...
2017 P/	4 331	156 638	1 886	1 106	11 338	3 187	5 536	...

Nota: Los datos están en miles de unidades

ANEXO N°2: “Población pecuaria según Departamentos, 2005-2017”

Unidad Agraria Departamental	2011	2012	2013	2014 P/	2015 P/	2016 P/	2017 P/
Total	3 263 254	2 991 012	3 132 335	3 204 509	3 200 714	3 104 911	3 187 254
I Tumbes	20 030	18 590	21 639	31 980	28 566	29 748	30 480
II Piura	199 520	140 298	119 945	186 647	191 114	159 009	169 531
III Lambayeque	80 365	56 964	67 510	69 264	72 480	88 160	68 810
IV La Libertad	159 681	162 069	157 211	119 141	111 419	116 911	113 018
V Áncash	181 021	182 009	185 348	184 372	184 777	174 016	170 334
VI Lima	404 507	455 740	430 570	457 793	462 797	450 072	460 253
VII Ica	32 998	36 673	34 648	39 034	48 256	51 510	54 124
VIII Arequipa	82 320	79 117	62 376	72 376	82 913	91 511	95 391
IX Moquegua	15 195	16 382	20 410	21 226	12 226	12 837	13 480
X Tacna	34 383	35 460	36 740	38 210	32 678	34 312	36 232
XI Cajamarca	255 432	251 689	278 439	304 430	304 105	287 457	297 734
XII Amazonas	70 916	71 548	74 617	75 528	77 261	84 502	85 690
XIII San Martín	167 652	141 075	140 570	146 193	148 910	141 355	129 292
XIV Huánuco	339 405	219 320	318 436	392 998	402 607	403 917	405 230
XV Pasco	129 039	110 339	98 671	89 157	89 872	51 355	51 993
XVI Junín	121 673	146 182	158 559	142 667	152 638	154 609	168 586
XVII Huancavelica	179 537	138 085	148 793	133 152	128 103	136 938	174 439
XVIII Ayacucho	179 000	187 764	164 590	103 432	95 792	91 554	106 597
XIX Apurímac	150 575	123 073	118 825	120 390	122 310	128 426	134 847
XX Cusco	182 940	141 726	195 864	195 646	195 861	160 877	160 173
XXI Puno	127 085	128 580	126 020	119 330	119 340	112 310	112 320
XXII Loreto	82 800	83 145	104 649	99 200	79 200	83 160	85 320

Nota: Los datos están en unidades

ANEXO N°3: "Propiedades del aire 1 atm de presión, Çengel"

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041

ANEXO N°4: “Propiedades del agua saturada, Çengel”

Propiedades del agua saturada

Temp., $T^{\circ}\text{C}$	Presión de saturación, P_{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización, h_{fg} , kJ/kg	Calor específico, c_p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255×10^{-3}	1.261×10^{-5}	1.58	1.00	0.798×10^{-3}
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232×10^{-3}	1.296×10^{-5}	1.44	1.00	0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213×10^{-3}	1.330×10^{-5}	1.33	1.01	0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197×10^{-3}	1.365×10^{-5}	1.24	1.02	0.970×10^{-3}
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183×10^{-3}	1.399×10^{-5}	1.16	1.02	1.025×10^{-3}

ANEXO N°5: “Costo de mantenimiento por clase de central de generación”

Tecnología	Costo fijos (% valor de inversión)
Térmica a Gas Natural Ciclo Abierto	2% - 3%
Térmica a Gas Natural Ciclo Combinado	1% - 2%
Térmica diésel – Turbina a Gas Dual	1% - 2%
Térmica diésel – Grupos Motor-Generador	1% - 2%
Conjunto motores Gas	2% - 3%
Eólica	1% - 2%
Solar fotovoltaica	1% - 2%
Solar Térmica (Concentración)	1% - 2%
Hidráulica de Pasada (> 20 MW)	1%
Mini-Hidráulica (< 20 MW)	1%
Hidráulica de Embalse	1%
Térmica a Biomasa	1% - 2%
Térmica a Biogás	1% - 2%
Geotérmica	2% - 3%
Eólica con Almacenamiento	1% - 2%
Solar Fotovoltaica con Almacenamiento	1% - 2%

ANEXO N°6: “Características técnicas y económicas de los proyectos RER adjudicados”

Tecnología	Proyecto	Potencia central (MW)	Precio monómico (USD/MWh)	Fecha subasta	Inversión estimada (MM USD)
Biomasa	Paramonga	23.0	52.00	2009	31.0
	Huaycoloro	4.4	110.00	2009	10.5
	La Gringa V	2.0	99.90	2011	5.6
	El Callao	2.0	77.00	2016	-
	Huaycoloro II	2.0	77.00	2016	-
Eólica	Marcona	32.0	65.50	2009	43.6
	Cupisnique	80.0	85.00	2009	242.4
	Talara	30.0	87.00	2009	101.2
	Tres Hermanas	90.0	69.00	2011	180.0
	Parque Nazca	126.0	37.83	2016	-
	Huambos	18.0	36.84	2016	-
	Duna	18.0	37.49	2016	-
Solar	Panamericana	20.0	215.00	2009	94.6
	Majes	20.0	222.50	2009	73.6
	Repartición	20.0	225.00	2009	73.5
	Tacna	20.0	223.00	2009	9.6
	Moquegua	16.0	119.90	2011	43.0
	Rubí	144.5	47.98	2016	-
Mini Hidro	Intipampa	40.0	48.50	2016	-
	17 plantas	179.7	~60.00	2009	285.1
	7 plantas	102.0	~53.60	2011	227.6
	15 plantas	204.7	~56.50	2013	450.3
	6 plantas	79.7	~220.68	2016	-
Total	64	1273.96			1956.6

ANEXO N°7: “Especificaciones técnicas del motor de cogeneración”

Technical specification of CHP unit

KE - MBG 200



400V/50Hz; 90/70 °C

Biogas

Electrical power	kW	200
Thermal power	kW	226
Energy input	kW	508,2
Fuel consumption	m ³ /h	84,7
Electrical efficiency	%	39,3
Thermal efficiency with LT	%	48,1
Thermal efficiency without LT	%	44,6
Overall efficiency with LT	%	87,4

Engine: MAN Type: E2676 LE212

No. of cylinders	-	6 in line
Rated speed	min ⁻¹	1500
Bore/stroke/swept vol.	mm / mm / dm ³	126/166/12,4
Compression ratio	=	14:1
Engine power max.	kW	220
Lambda air/fule	-	1,61
Lube oil consumption	kg/h	0,15
Lube oil filling quantity	dm ³	70

Generator: LSA Type: 46.3 M7

Voltage/Frequency	V/Hz	400/50
Cos φ	-	0,8 - 1,0
General efficiency	%	95,5
Max. ambient temperature	°C	40

Rating data

					Performance parameters supplied by CHP unit
Load	%	100	75	50	95
ISO engine power	kW	220	165	110	210
Electrical power	kW	210	157	105	200
Coolant heat	kW	108	95	77	106
Exhaust heat (120 °C)	kW	113	94	69	109
Exhaust heat (90 °C)	kW	-	-	-	-
Intercooler heat HT	kW	13	4	0	11
Intercooler heat LT	kW	19	16	10	18
Total heat power	kW	234	193	146	226
Radiation heat max.	kW	10	8	6	10
Energy input 1)	kW	531	411	287	508
Fuel consumption	m ³ /h	88,5	68,5	47,8	84,7
Exhaust gas mass flow	kg/h	1199	916	642	1145
Exhaust gas temperature	°C	440	-	-	-
Electrical efficiency 1)	%	39,5	38,3	36,6	39,3
Thermal efficiency	%	44,1	47,0	50,9	44,6
Overall efficiency	%	83,6	85,3	87,5	83,9

1) According to ISO 3046.

Fuel: Biogas

Min. methan no.	-	100
Calorific value	MJ/Nm ³	21,6
Gas pressure in the inlet pipe	kPa	3÷5
Biogas composition CH ₄ /CO ₂	%	60/40

Heat system, LT circuit

Cooling water quantity	dm ³	50
Concentration of ethylene glycol	%	40
Cooling water circulation min.	m ³ /h	25,8

Combustion and ventilation air

Combustion air	kg/h	1087
Min. ventilation air flow	Nm ³ /h	3831

Emissions

CO	mg/Nm ³	<600
NOx	mg/Nm ³	<500

Correlation 5% O₂

Noise level

Without Canopy 1)	dB(A)	99
With Canopy 1)	dB(A)	74
Container 2)	dB(A)	70

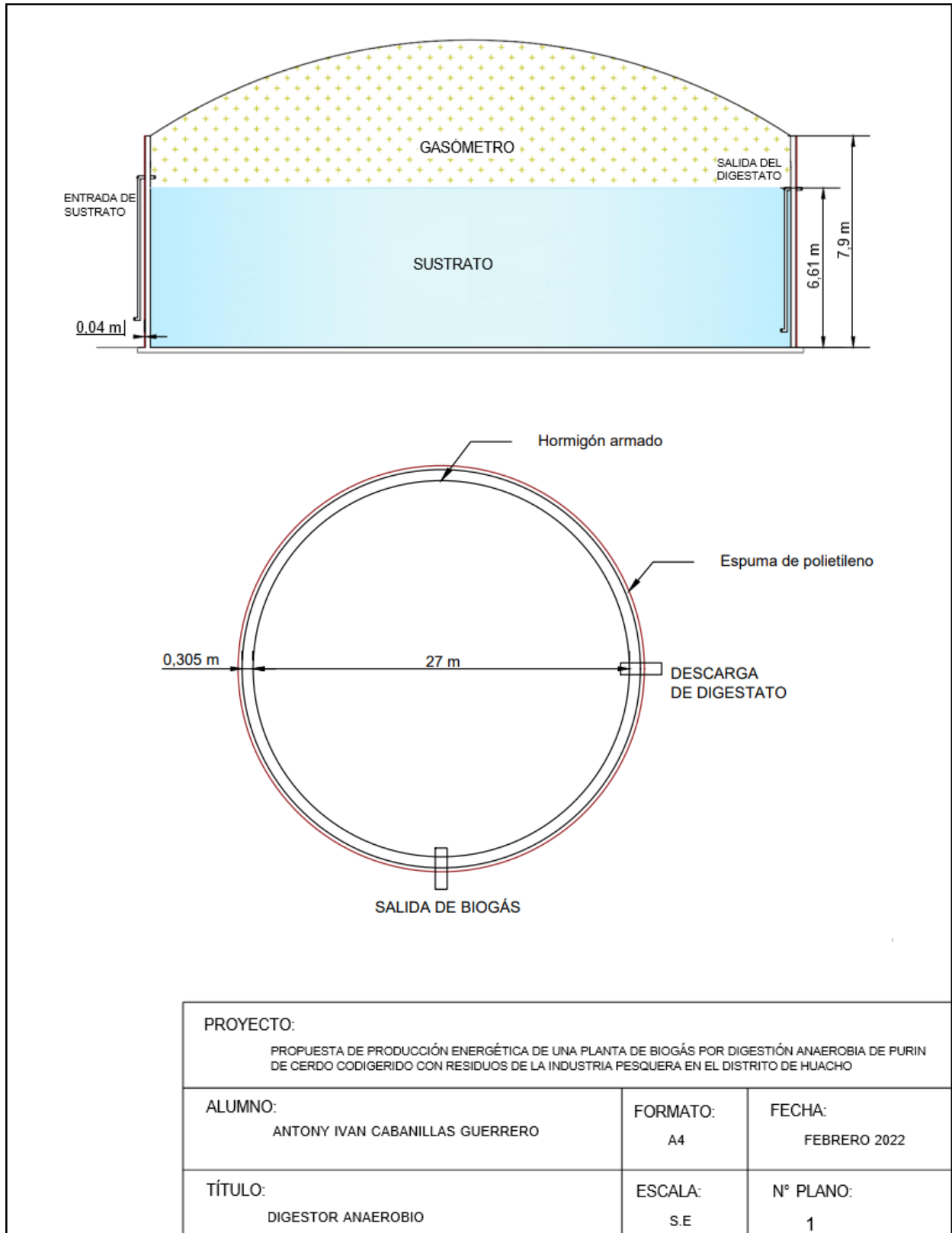
1) Sound pressure level measured at 1 m distance from the CHP unit.

2) Sound pressure level measured at 10 m distance from the container.

Standard conditions, tolerance, weight

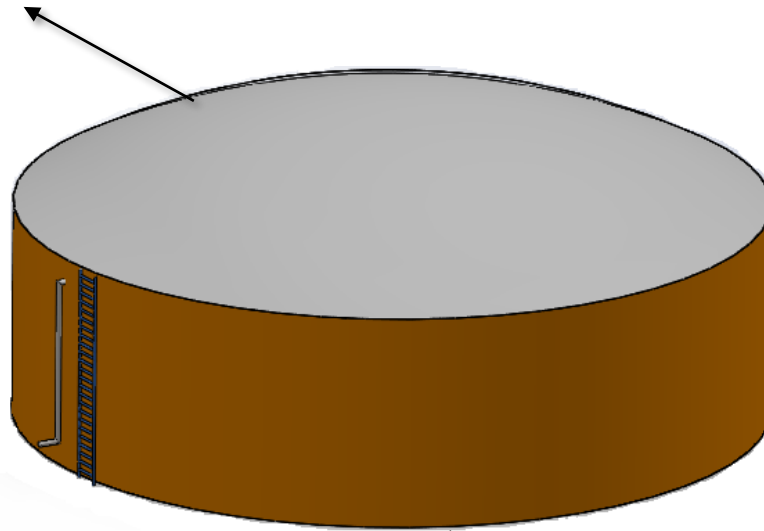
Atmospheric pressure	kPa	100
Air temperature	°C	25
Relative air humidity	%	30
Tolerance for the electrical output	%	±3
Tolerance for the usable heat	%	±7
Tolerance for the specific fuel consumption	%	±5
Dimensions L / W / H	mm	3900/1700/2200
Dry weight	kg	6000

ANEXO N°8: “Plano del diseño del digestor anaerobio”

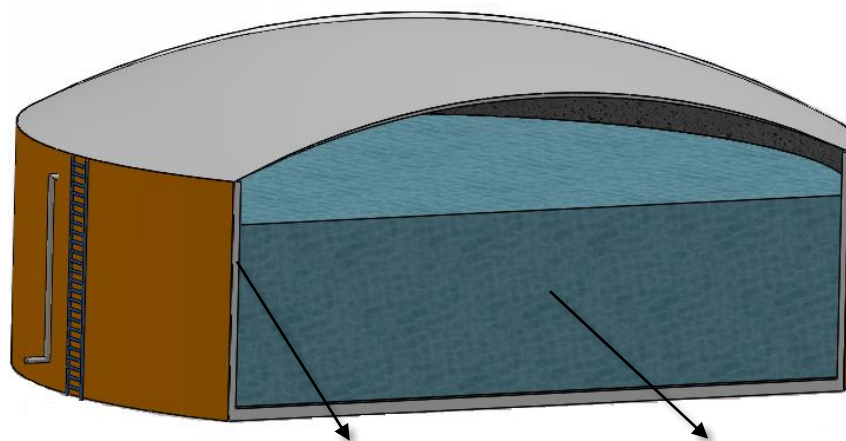


ANEXO N°9: “Plano en 3D del diseño del digester anaerobio”

GASÓMETRO



ESPUMA DE POLIETILENO



HORMIGÓN ARMADO

SUSTRATO

PROYECTO:

PROPUESTA DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE UNA PLANTA DE BIOGAS POR DIGESTIÓN ANAEROBICA DE ESTIÉRCOL DE CERDO CODIGERIDO CON RESIDUOS GRASOS DE LA INDUSTRIA PESQUERA EN EL DISTRITO DE HUACHO

ALUMNO:

ANTONY IVAN CABANILLAS GUERRERO

FORMATO:

A4

FECHA:

FEBRERO 2022

TÍTULO:

VISTA EN 3D DEL DIGESTOR ANAEROBIO

ESCALA:

S.E

N° PLANO:

2



ACTA DE SUSTENTACION VIRTUAL N°042-2022-FIME



En la ciudad de Lambayeque, siendo las 09:30 p.m. del día jueves 23 de junio de 2022. Se reunieron vía plataforma virtual <http://meet.google.com/fbb-aykc-dbs>, los miembros del jurado, designados mediante Resolución N°121-2022-D-VIRTUAL-FIME, de fecha 14 de junio de 2022, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la Tesis, conformado por los siguientes catedráticos:

M.Sc. Ing. NORMAN OSVALDO AGUIRRE ZAQUINAULA
M.Sc. Ing. CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ
ING. HÉCTOR ANTONIO OLIDEN NÚÑEZ
ING. ROBINSON TAPIA ASENJO

PRESIDENTE
SECRETARIO
MIEMBRO
ASESOR

Se recibió la Tesis titulada:

“PROPUESTA DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL DE CERDO CODIGERIDO CON LOS RESIDUOS GRASOS DE LA INDUSTRIA PESQUERA EN EL DISTRITO DE HUACHO”

Presentada y sustentada por su autor, Bachiller: **CABANILLAS GUERRERO ANTONY IVAN.**

Finalizada la sustentación virtual de la Tesis, el sustentante respondió las preguntas y observaciones de los miembros del jurado examinador, quienes procedieron a deliberar y acordaron otorgar el calificativo de **APROBADO**, Nota (15) en la escala vigesimal, mención **REGULAR.**

Quedando el sustentante apto para obtener el Título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, de acuerdo a la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

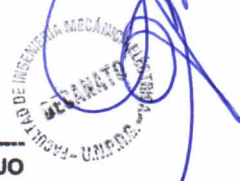
Siendo las 10:45 a.m. del mismo día se da por concluido el acto académico, firmando la presente acta el jurado respectivo:

M.Sc. Ing. NORMAN OSVALDO AGUIRRE ZAQUINAULA
PRESIDENTE

M.Sc. ING. CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ
SECRETARIO

ING. HÉCTOR ANTONIO OLIDEN NÚÑEZ
MIEMBRO

ING. ROBINSON TAPIA ASENJO
ASESOR



Lambayeque 27 de mayo de 2022

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, **ROBINSON TAPIA ASENJO**, Asesor de tesis, del estudiante, **ANTONY IVAN CABANILLAS GUERRERO**.

Titulada: **PROPUESTA DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS POR DIGESTION ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL DE CERDO CODIGERIDO CON RESIDUOS GRASOS DE LA INDUSTRIA PESQUERA EN DISTRITO DE HUACHO**”, luego de la revisión exhaustiva del documento constato que la misma tiene un índice de similitud de **19%** verificable en el reporte de similitud del programa Turnitin.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Lambayeque, 27 de Mayo del 2022



.....
ROBINSON TAPIA ASENJO
DNI: 16742683
ASESOR



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Antony Ivan Cabanillas Guerrero
Título del ejercicio:	Revisión
Título de la entrega:	Propuesta de Producción Energética de una planta de Bioga...
Nombre del archivo:	INFORME_FINALL.docx
Tamaño del archivo:	3.26M
Total páginas:	139
Total de palabras:	26,042
Total de caracteres:	141,162
Fecha de entrega:	23-may.-2022 09:41a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	1842548244



**UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO**



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**"PROPUESTA DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DE UNA
PLANTA DE BIOGÁS POR DIGESTION ANAEROBIA DE
ESTIÉRCOL DE CERDO CODIGERIDO CON RESIDUOS GRASOS
DE LA INDUSTRIA PESQUERA EN DISTRITO DE HUACHO"**

Presentado Por:
BACH. ANTONY IVAN CABANILLAS GUERRERO

Asesor:
ING. ROBINSON TAPIA ASENJO

Lambayeque - Perú
2022

Propuesta de Producción Energética de una planta de Biogas por digestión Anaerobia de Estiercol de Cerdo Codigerido con Residuos Grasos de la Industria Pesquera en Distrito de Huacho

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

rodin.uca.es

Fuente de Internet

3%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2%

3

dochero.tips

Fuente de Internet

1%

4

cybertesis.uach.cl

Fuente de Internet

1%

5

Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

1%

6

docplayer.es

Fuente de Internet

1%

7

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

1%

pt.scribd.com

8

Fuente de Internet

1%

9

cideteq.repositorioinstitucional.mx

Fuente de Internet

<1%

10

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1%

11

elperiodicodelaenergia.com

Fuente de Internet

<1%

8	Fuente de Internet	1 %
9	cideteq.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	<1 %
10	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
11	elperiodicodelaenergia.com Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unprg.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
13	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
14	1library.co Fuente de Internet	<1 %
15	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
16	upcommons.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
17	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
18	mafiadoc.com Fuente de Internet	<1 %
19	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %

20	revistas-tecnologicocomfenalco.info Fuente de Internet	<1 %
21	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
23	mediathek.fnr.de Fuente de Internet	<1 %
24	www.tdx.cat Fuente de Internet	<1 %
25	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	www.madrid.org Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
29	Leticia Regueiro, Marta Carballa, Juan A. Álvarez, Juan M. Lema. "Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates", Bioresource Technology, 2012 Publicación	<1 %

30	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
32	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
33	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
34	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	<1 %
35	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1 %
36	Submitted to Consorcio CIXUG Trabajo del estudiante	<1 %
37	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1 %
38	dx.doi.org Fuente de Internet	<1 %
39	static.eoi.es Fuente de Internet	<1 %
40	kupdf.net Fuente de Internet	<1 %

41	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
42	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
43	sustentabilidad.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
44	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
45	repositorio.unamad.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
46	Submitted to University of Wales central institutions Trabajo del estudiante	<1 %
47	bibliotecadigital.udea.edu.co Fuente de Internet	<1 %
48	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
49	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
50	Submitted to Universidad de San Buenaventura Trabajo del estudiante	<1 %
51	www.capacitacion.syt-peru.com Fuente de Internet	<1 %



52	Submitted to Universidad Catolica De Cuenca	<1 %
	Trabajo del estudiante	
53	repositorio-aberto.up.pt	<1 %
	Fuente de Internet	
54	repositorio.untels.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
55	red.uao.edu.co	<1 %
	Fuente de Internet	
56	repositorio.unap.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
57	www.oikos.cl	<1 %
	Fuente de Internet	
58	Submitted to Universidad Dr. José Matías Delgado	<1 %
	Trabajo del estudiante	
59	doczz.es	<1 %
	Fuente de Internet	
60	edoc.pub	<1 %
	Fuente de Internet	
61	repositorio.uaaan.mx:8080	<1 %
	Fuente de Internet	
62	repositorio.ute.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	
63	riuma.uma.es	

Fuente de Internet <1 %

64	www.coursehero.com	<1 %
	Fuente de Internet	
65	arcastilla.org	<1 %
	Fuente de Internet	
66	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador	<1 %
	Trabajo del estudiante	
67	dspace.esPOCH.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

