

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

PROPUESTA TÉCNICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CENTRAL DE COGENERACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES DE IBARRA.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Almeida Cevallos Diego Fernando

DIRECTOR (A):

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

Ibarra-Ecuador 2025



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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004882609		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Almeida Cevallos Diego Fernando		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	dfalmeidac@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0982072055

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en La Planta De Tratamientos De Aguas Residuales De Ibarra.
AUTOR (ES):	Almeida Cevallos Diego Fernando
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	25/04/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 29 días del mes de abril de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Almeida Cevallos Diego Fernando



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, GERARDO ISAÍAS COLLAGUAZO GALEANO en calidad de director del señor estudiante ALMEIDA CEVALLOS DIEGO FERNANDO certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en La Planta De Tratamientos De Aguas Residuales De Ibarra.

Para la obtención del título de Ingeniero(a) Eléctrico(a), aprobado la defensa, impresión y empastado.

Firma

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



DEDICATORIAS

A mi madre, Rocío Cevallos, cuyo amor incondicional, paciencia infinita y sabiduría han iluminado mi camino con rectitud y resiliencia. Por ser el pilar fundamental de mi vida, por inculcarme valores y principios que me definen, y por enseñarme que la bondad, el cariño, la perseverancia y el coraje son las verdaderas fuerzas que impulsan el alma hacia sus más altos ideales.

A mi padre, Luis Almeida, cuya fortaleza, paciencia y carácter han forjado en mí la determinación y el sentido de responsabilidad que hoy me acompañan. Por enseñarme a mantenerme firme en mis proyectos y convicciones, y por transmitirme la valentía de enfrentar cada obstáculo con entereza, sin permitir que ninguna adversidad doblegue mis aspiraciones.

A la memoria de mi abuelo, Jorge Cevallos, cuya presencia, aunque intangible, sigue guiando mis pasos con su amor y sabiduría. Sus enseñanzas y su ejemplo han dejado una huella imborrable en mi corazón, y su legado vive en cada logro que hoy alcanzo, pues en su recuerdo encuentro siempre inspiración y fortaleza.

A mi pareja, Ana Pacalla. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, por tu amor inquebrantable y por el apoyo incondicional que me has brindado en cada paso de este camino. Tu confianza en mí, tu aliento constante y tu orgullo reflejado en cada mirada han sido mi mayor motivación. Este logro es tanto tuyo como mío, porque sin tu presencia a mi lado, este sueño no habría sido posible.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, PhD. Gerardo Collaguazo, y a mi asesor, MSc. Olger Arellano, por su orientación, paciencia y dedicación. Su conocimiento ha sido clave en la realización de este trabajo. También agradezco a mis docentes ingenieros por su apoyo y guía a lo largo de mi formación.

A mis padres, Rocío Cevallos y Luis Almeida, por ser el pilar fundamental en mi vida. Su amor, apoyo incondicional y enseñanzas me han dado la fuerza para alcanzar este logro. Gracias por confiar en mí y por motivarme en cada paso.

A mis amigos de toda la vida, Santiago Garzón, Bryan Loor y Anahí Yépez, por su compañía, apoyo y amistad inquebrantable. Su presencia ha sido un refugio en este camino.

A mis compañeros de clase, Geovanny Malte, Damián Pupiales y Shyric Terán, por los momentos compartidos, las risas y el compañerismo que hicieron de esta etapa una experiencia inolvidable.

A todos ustedes, gracias de corazón. Este logro es el resultado del esfuerzo, pero también del apoyo y cariño que me han brindado.



INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIAS.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
CAPITULO I.....	13
1.1 Problema de investigación.....	13
1.1.1 Problemática a investigar.....	13
1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación.....	13
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo general.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Alcance y delimitación.....	14
1.4 Justificación.....	15
1.5 Antecedentes.....	15
CAPÍTULO II.....	20
2.1 Tecnologías para la producción de biogás.....	20
2.1.1 Proceso de producción de biogás.....	20
2.1.2 Parámetros que influyen en la producción de biogás.....	23
2.1.3 Digestión anaerobia.....	27



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



2.1.4	Comparativa entre las tecnologías de producción de biogás.....	32
2.2	Tecnologías de generación eléctrica a partir de biogás	33
2.2.1	Motores de combustión interna	34
2.2.2	Turbinas de gas.....	34
2.2.3	Microturbinas	34
2.2.4	Células de combustible.....	35
2.2.5	Motores Stirling.....	35
2.2.6	Turbinas de vapor	35
2.2.7	Ciclos combinados.....	36
2.2.8	Comparativa entre tecnologías de producción eléctrica a partir de biogás	36
CAPÍTULO III		
3.1	Tipo de investigación	38
3.2	Descripción del lugar de estudio	38
3.3	Metodología del diseño de la central de cogeneración.....	41
3.3.1	Enfoque.....	41
3.3.2	Métodos	42
3.3.3	Flujograma.....	43
3.4	Parámetros de diseño	44



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



3.4.1	Determinación de la producción de lodos	45
3.4.2	Digestión anaerobia	46
3.4.3	Medición de producción de biogás	47
3.4.4	Composición y tratamiento del biogás	49
3.4.5	Poder calorífico del biogás generado.....	50
3.4.6	Potencial térmico del biogás.....	53
3.4.7	Potencial eléctrico del biogás	54
CAPITULO IV		54
4.1	Sistema de cogeneración	55
4.1.1	Selección del Sistema de Cogeneración	55
4.1.2	Sistema de Calefacción de Lodos Existente	57
4.2	Motogenerador	57
4.2.1	Selección del Motor Generador a Biogás	58
4.2.2	Motogenerador FGLD180 Dresser-Rand	59
4.3	Sistema de recuperación térmico	60
4.3.1	Intercambiador de calor en el circuito principal.....	61
4.3.2	Recuperador de gases de escape	62
4.3.3	Reintegración del calor al sistema de calefacción existente.....	63
4.4	Potencial de Producción de Energía Eléctrica-Térmica	65



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



4.4.1	Escenario 1: Producción Actual (23,15 Nm ³ /h)	66
4.4.2	Escenario 2: Operación a Plena Carga (81 Nm ³ /h)	66
BIBLIOGRAFÍA		69

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Esquema de la degradación anaeróbica de la materia orgánica [18]	21
Fig. 2	Ubicación de la PTAR Ibarra con ayuda del Google Maps[14].	39
Fig. 3.	Actividades operativas PTAR-I [46]	40
Fig. 4	Esquema general del sistema propuesto	56
Fig. 5	Motogenerador FGLD180 Dresser-Rand.....	59
Fig. 6	Intercambiador de calor en el circuito principal	61
Fig. 7	Recuperador de gases de escape	62
Fig. 8	Válvula de tres vías DN65	64



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Temperaturas optimas en la fermentación anaeróbica	25
Tabla 2 Rango de valores de pH en la generación de biogás.	25
Tabla 3 El Tiempo De Retención Hidráulico (Hrt)	26
Tabla 4 Tabla comparativa sobre las tecnologías de producción de biogás	32
Tabla 5 Tabla comparativa tecnologías de producción eléctrica a partir de biogás	36
Tabla 6 Coordenadas geográficas del lugar de estudio	39
Tabla 7 Características de la digestión	45
Tabla 8 Proceso de digestión anaerobia.....	46
Tabla 9 Parámetros de almacenamiento del biogás	47
Tabla 10 Producción de biogás desde el año 2001 hasta el 2024	48
Tabla 11 Compuestos del biogás procedente del tratamiento de aguas residuales.....	49
Tabla 12 Resultados del poder calorífico calculado del biogás.....	51
Tabla 13 Comparación: Biogás vs. GLP	52
Tabla 14 Características técnicas principales del motogenerador FGLD180.....	60
Tabla 15 Características técnicas principales del intercambiador de placas	62
Tabla 16 Características técnicas principales del recuperador de gases.....	63
Tabla 17 Características técnicas principales de la válvula de tres vías DN65	65
Tabla 18 Resultados de Producción Parcial.....	66
Tabla 19 Resultados de Producción A Plena Carga	66



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



RESUMEN

La planta de tratamiento de aguas residuales de Ibarra es una obra emblemática para la ciudad y para el Ecuador, destacándose por su diseño innovador, tecnología avanzada y procesos que se emplean. Uno de sus aspectos más relevantes es la producción de biogás como resultado del tratamiento de aguas residuales, un recurso valioso que puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica, contribuyendo así a la sostenibilidad y al aprovechamiento de recursos renovables.

Con el presente trabajo se presenta una propuesta técnica para la implementación de un sistema de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ibarra, con el objetivo de aprovechar el biogás generado en el proceso de digestión anaerobia de los lodos. Se analiza la producción actual de biogás, estimada en 23,15 m³/hora, y su potencial para la generación de electricidad mediante un motor-generator Dresser-Rand FGLD. Los resultados indican que la energía generada puede cubrir la demanda de la línea de lodos y hasta un 7,15% del consumo energético de la línea de agua. Además, se propone la recuperación del calor residual del sistema para optimizar procesos de producción de biogás dentro de la PTAR.

Palabras clave: Cogeneración, biogás, digestión anaerobia, planta de tratamiento de aguas residuales, poder calorífico, recuperación de calor, motor-generator.



ABSTRACT

The The Ibarra Wastewater Treatment Plant represents a landmark infrastructure project for both the city and Ecuador, distinguished by its innovative design, cutting-edge technology, and the sophisticated processes it employs. Among its most noteworthy features is the production of biogas as a byproduct of wastewater treatment—a valuable resource that holds significant potential for electrical energy generation, thereby promoting sustainability and the use of renewable energy sources

This study presents a technical proposal for the implementation of a cogeneration system at the Ibarra Wastewater Treatment Plant (WWTP), with the primary objective of utilizing the biogas produced through the anaerobic digestion of sewage sludge. The current biogas output, estimated at 23.15 m³/hour, is assessed for its feasibility in powering an electricity generation system based on a Dresser-Rand FGLD engine-generator. Findings indicate that the energy produced is sufficient to fully meet the sludge line's energy demand and supply up to 7.15% of the water line's energy consumption. Furthermore, the proposal includes the recovery of waste heat from the cogeneration system, aiming to enhance the biogas production processes within the WWTP.

Keywords: Cogeneration, biogas, anaerobic digestion, wastewater treatment plant, calorific value, heat recovery, engine-generator.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema:

Propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en La Planta De Tratamientos De Aguas Residuales De Ibarra.

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

Actualmente, la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Ibarra enfrenta desafíos significativos vinculados a su alto consumo energético durante el proceso de tratamiento, así como a la emisión de metano, un potente gas de efecto invernadero. El metano se origina debido a la acumulación excesiva de lodos residuales, la cual se estima en aproximadamente 3 386.25 kg por día, con una concentración de extracción de 6 kg/m³ de biogás. Esta situación genera una preocupación sustancial debido al sub – aprovechamiento de un recurso con un potencial energético latente. Por consiguiente, resulta crucial abordar esta problemática con el fin de optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales y aprovechar su potencial para la recuperación de energía

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuál es el potencial de producción de energía eléctrica-térmica a partir del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra?



1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Realizar una propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra, mediante el uso del biogás recuperado de las aguas residuales.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Describir las tecnologías de producción de biogás y generación de energía eléctrica-térmica.
- Evaluar el potencial de biogás como fuente de energía.
- Realizar la propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra.

1.3 Alcance y delimitación

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar una propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ibarra. El enfoque metodológico se basará en una revisión de la literatura técnica y científica, así como en la consulta de expertos en el campo. La validez de la información recopilada se confirmará mediante la recolección de datos directamente de la planta, específicamente relacionados con la cantidad de biogás recuperado durante los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Se considerará motores de combustión interna a base de biogás para la producción de energía eléctrica, además se aprovechará el calor residual del generador para llevar a



cabo procesos relacionados con la producción de biogás. El dimensionamiento del generador se realizará en base a los datos de producción de biogás proporcionados por la PTAR Ibarra.

1.4 Justificación

Actualmente, el biogás generado como subproducto de procesos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra, no se está aprovechado adecuadamente, lo que representa un desacierto para reducir costos energéticos y mejorar la eficacia operativa. La implementación de una planta combinada de calor y electricidad optimizará el uso del biogás, promoviendo una gestión energética más efectiva.

Este proyecto permitirá generar simultáneamente electricidad y calor, satisfaciendo las necesidades energéticas internas de la planta y proporcionando energía limpia a procesos relacionados con la producción de biogás.

Los habitantes de Ibarra se beneficiarán de una planta más sostenible, mejorando la calidad del servicio y asegurando su operatividad. La viabilidad técnica para el desarrollo del proyecto está respaldada por la disponibilidad de información técnica y teórica sobre la producción de biogás brindada por la planta. Además, el material bibliográfico disponible contribuirá a fortalecer la propuesta técnica.

1.5 Antecedentes

Una planta de tratamiento de aguas residuales es una instalación diseñada para eliminar contaminantes y componentes no deseados de las aguas residuales para que puedan devolverse de forma segura al medio ambiente o reutilizarse en procesos



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



específicos.[1] Estas instalaciones realizan una serie de procesos físicos, químicos y biológicos de tratamiento de aguas residuales, incluyendo la remoción de sólidos, desinfección y remoción de nutrientes y compuestos tóxicos.[2]

La gasificación por plasma se presenta como una técnica que puede ser introducida en el sistema de gestión integral de residuos, generando sinergias entre los actores involucrados y contribuyendo a la producción de energía y materiales inorgánicos valorizables.[3] Durante este proceso, los desechos se exponen a altas temperaturas y presiones en ausencia de oxígeno, creando un gas inflamable llamado gas de síntesis. Este gas se puede utilizar para generar electricidad en un motor de combustión interna o turbina de gas.

la pirolisis es otro método para la obtención de biogás para producción de energía, al igual que la gasificación, el pirólisis implica calentar residuos sin oxígeno, pero a temperaturas más bajas. Esto da como resultado la descomposición térmica de los residuos en gases, líquidos y productos sólidos. El gas resultante se puede utilizar para producir electricidad.[4] por otra parte la Termólisis.[5] es el proceso de descomposición térmica de residuos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Se utilizan reactores especiales para descomponer los desechos en productos gaseosos y líquidos, que luego pueden usarse para generar electricidad.

Un nuevo método que está tomando gran relevancia en los últimos años es el proceso de biogás de vertedero, su nombre viene debido a que los vertederos de residuos orgánicos producen biogás como resultado de la descomposición anaerobia de la materia orgánica.[6] Este biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, se



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



puede recolectar y utilizar como combustible para generar electricidad en motores de combustión interna o turbinas de gas.

En muchas partes del mundo, las centrales de cogeneración han demostrado ser una solución eficaz y sostenible para la producción de energía. Por ejemplo, en Dinamarca, la Compañía de Electricidad y Calefacción Urbana de Copenhague ha sido el modelo de cogeneración líder desde los años 1980.[7] La planta utiliza una combinación de biomasa, residuos municipales y gas natural para producir electricidad y calor para miles de hogares y empresas de la ciudad.[7] Otro ejemplo destacado es la central térmica de la Universidad de Stanford en California, Estados Unidos. La instalación combina la generación de electricidad con la generación de vapor para calentar y enfriar los edificios del campus, reduciendo significativamente las emisiones de carbono y los costos operativos.[8]

En los últimos años, varios países latinoamericanos han introducido con éxito centrales térmicas basadas en aguas residuales, con importantes efectos positivos. Por ejemplo, en Brasil, una planta de tratamiento de aguas residuales de cogeneración es “Usina de Tratamiento de Esgoto (UTE)”[9] en la ciudad de São Paulo ha demostrado ser una solución innovadora para la gestión de residuos urbanos y la producción de energía limpia. Esta planta no sólo reduce la contaminación ambiental al tratar aguas residuales, sino que también genera electricidad y calor para las comunidades locales, contribuyendo así a diversificar la matriz energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero[10]. Además, proyectos similares en países como México, Colombia y



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Argentina están dando resultados positivos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo económico de la región.

En Ecuador, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se han convertido en catalizadores clave para el desarrollo sostenible y el desarrollo energético. Un ejemplo perfecto es la planta de tratamiento de aguas residuales de Quito, que logró no sólo reducir la contaminación ambiental, sino también convertirse en una fuente de energía innovadora [11]. Mediante la aplicación de tecnología de cogeneración, las plantas de tratamiento de aguas residuales de Quito convierten los desechos orgánicos en biogás, utilizándolo como combustible para producir electricidad y calor de manera eficiente [12]. Este enfoque ha dado importantes resultados positivos en la reducción de la dependencia de las fuentes de energía tradicionales, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de la autosuficiencia energética regional.[1]

Asimismo, un estudio en el cantón Naranjito, provincia del Guayas en Ecuador, analizó los lodos residuales producidos por las lagunas de oxidación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Los análisis, que consideraron el caudal y el porcentaje de sedimentación, revelaron resultados que superaron las expectativas iniciales sobre el aprovechamiento de estos lodos. Se estima que se puede generar 4,640.28 kWh de energía eléctrica al día y 1,693.70 MWh anualmente[13]. Además, la conversión de metano para la generación eléctrica sugiere un secuestro de carbono equivalente a 3,406.01 toneladas de CO₂ al año. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de utilizar los lodos residuales de Naranjito para producir energía eléctrica y reducir así los gases de efecto invernadero [11].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



La planta de tratamiento de aguas residuales de Ibarra y la infraestructura existente demuestran la necesidad de optimizar el consumo de energía. El estudio muestra que todavía hay margen para mejoras significativas, especialmente mediante la adopción de la cogeneración [14]. Esta tecnología permitirá el uso de subproductos del tratamiento de aguas residuales para producir electricidad y calor de manera eficiente. Las posibles mejoras incluyen reducir la dependencia de las fuentes de energía tradicionales, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y generar energía renovable a nivel local [15]. Estos beneficios no sólo mejorarán la sostenibilidad ambiental de la planta, sino que también tendrán un impacto positivo en las comunidades locales al reducir los costos operativos y mejorar la calidad del agua y el medio ambiente [16].

Dentro de la infraestructura de la planta de aguas residuales de Ibarra (PTAR) se encuentra el área de tratamiento biológico donde se tratan los lodos resultantes de la acumulación, se estima que su concentración resulta 3.386,25 kg/d, siendo su concentración de extracción 6 kg/m³. El proyecto se estimó para la implementación de una planta de generación por biogás por el proceso de digestión anaerobia optando por un digestor de forma esbelta con cúpula y base tronco piramidal, siguiendo las tendencias alemanas y centro – europeas.

La digestión requiere una serie de equipos que permiten la alimentación, descarga, intercomunicación, calentado, homogeneizado, vaciado, etc., de los digestores. Se estima que mediante el biogás resultante de los procesos anaerobios se obtenga un biogás capaz de generar energía eléctrica.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo abordará brevemente el fundamento teórico con respecto a las tecnologías de producción de biogás, los sistemas de generación de energía eléctrica y térmica a partir de este, esto como introducción al tema para posteriormente centrarse específicamente en los procesos más utilizados en la producción de biogás y en los mecanismos de conversión energética.

2

2.1 Tecnologías para la producción de biogás

La producción de biogás es un proceso biológico que convierte la materia orgánica en gas metano y dióxido de carbono a través de la acción de microorganismos en condiciones anaeróbicas. Las tecnologías empleadas en la producción de biogás abarcan desde sistemas simples hasta plantas industriales complejas [17]. A continuación, se describe en detalle el proceso de producción de biogás, incluyendo las etapas clave y los tratamientos posteriores necesarios para su utilización.

2.1.1 Proceso de producción de biogás

El proceso de producción de biogás consta de varias etapas clave como se muestra en la Fig.1, las cuales son fundamentales para obtener resultados óptimos [17]. Cada una de estas etapas desempeña un papel crucial en la obtención de biogás de calidad y en la cantidad adecuada.

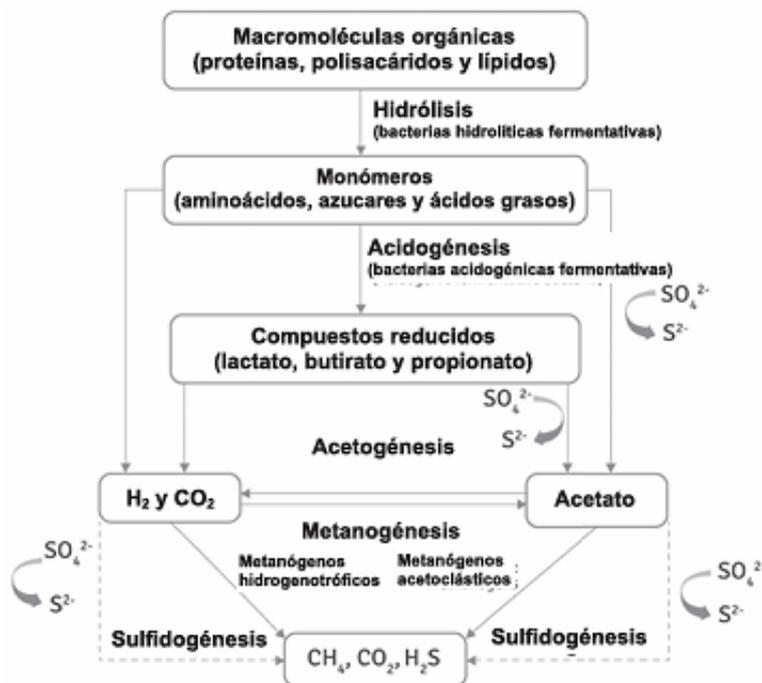


Fig. 1 Esquema de la degradación anaeróbica de la materia orgánica [18]

2.1.1.1 Preparación del sustrato

El primer paso en el proceso de producción de biogás es la preparación del sustrato. Consiste en la recolección y pretratamiento de materiales orgánicos para la digestión anaeróbica. Los desechos agrícolas, el estiércol animal, los desechos de alimentos y los lodos de las depuradoras son sustratos comunes [19]. Para mejorar las condiciones para la digestión anaeróbica, este paso puede incluir la trituración, mezcla y ajuste de la humedad del sustrato.

2.1.1.2 Hidrólisis

La hidrólisis es el proceso bioquímico fundamental de la digestión anaeróbica, que es un proceso metabólico controlado por enzimas extracelulares. En este paso, las moléculas orgánicas complejas e insolubles, como los carbohidratos, las proteínas y los



lípidos, se descompondrán en compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos [20]. Esta descomposición se produce bajo la influencia de enzimas hidrolíticas, lo que permite que los compuestos resultantes se utilicen como fuente de material y energía para las células microbianas. La hidrólisis es importante porque convierte la materia orgánica insoluble en compuestos solubles que pueden ser absorbidos y utilizados por los microorganismos, facilitando así la digestión anaeróbica [20].

2.1.1.3 Acidogénesis

Durante la etapa de acidogénesis (o fermentación), bacterias acidogénicas (facultativas y anaerobias estrictas) metabolizan monómeros, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga, convirtiéndolos en ácidos grasos volátiles (AGV) como acético, propiónico, butírico y valérico, junto con alcoholes, CO_2 e H_2 . Estas bacterias tienen una rápida proliferación, duplicándose en ~30 minutos. Algunas, como las homoacetogénicas, sintetizan ácido acético a partir de CO_2 e H_2 , generando sustratos clave para las fases posteriores de la digestión anaeróbica [18].

2.1.1.4 Acetogénesis

En esta etapa, las bacterias acetogénicas metabolizan los ácidos y alcoholes de la fase anterior, transformándolos en ácido acético, CO_2 e H_2 . Estas se dividen en: bacterias productoras de H_2 , que oxidan ácidos orgánicos (propionato, butirato) y alcoholes a acetato, CO_2 e H_2 - proceso termodinámicamente desfavorable y donde hasta el 30% de las bacterias en aguas residuales complejas (como mataderos) se especializan en degradar propionato; y bacterias productoras de acetato, que pueden ser autotróficas (sintetizan acetato a partir de H_2 y CO_2) o heterotróficas (usan sustratos como metanol o formiato



para producirlo). Este paso es crucial para generar los sustratos necesarios en la metanogénesis [18].

2.1.1.5 Metanogénesis

La metanogénesis es la etapa final de la digestión anaeróbica, donde arqueas metanogénicas transforman acetato, hidrógeno y CO_2 en metano (CH_4) y agua. Existen dos tipos principales: las acetoclásticas, que degradan ácido acético produciendo CH_4 y CO_2 , y las hidrogenotróficas, que combinan H_2 y CO_2 para generar metano. Este proceso es clave en la producción de biogás (compuesto principalmente por CH_4 y CO_2), determinando su calidad y rendimiento en sistemas de tratamiento anaeróbico [18].

2.1.1.6 Purificación del biogás

El biogás crudo contiene impurezas como sulfuro de hidrógeno, amoníaco, y vapor de agua que deben ser eliminadas para mejorar su calidad y eficiencia energética. La purificación del biogás implica la eliminación de estas impurezas mediante varios métodos, como absorción, adsorción, membranas de separación y procesos biológicos. El biogás purificado puede alcanzar una composición de metano superior al 95%, haciéndolo comparable al gas natural [21].

2.1.2 Parámetros que influyen en la producción de biogás

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo que requiere mantener condiciones óptimas para la realización de las reacciones químicas dentro de la matriz líquida del biorreactor, así como las reacciones bioquímicas intracelulares que sustentan la vida de los organismos implicados [22]. La producción de biogás está influenciada por una variedad de parámetros físicos, químicos y biológicos que afectan la calidad del



proceso. El control adecuado de estos parámetros es esencial para maximizar la producción de biogás, asegurando la eficiencia y estabilidad del proceso de digestión anaeróbica.

2.1.2.1 Tipo de Sustrato

El tipo de sustrato es uno de los factores más críticos en la producción de biogás. Diferentes materiales orgánicos tienen distintas composiciones y propiedades que afectan la degradabilidad y la producción de biogás. Los sustratos ricos en carbohidratos, proteínas y lípidos son ideales, mientras que materiales con alta lignina son menos eficientes. Los sustratos comunes incluyen estiércol animal, residuos agrícolas, lodos de depuradora y residuos de alimentos [23].

2.1.2.2 Condiciones del Proceso

La temperatura es un parámetro clave en la digestión anaeróbica, ya que influye en la eficiencia del proceso y la producción de biogás. A mayor temperatura, la degradación de la materia orgánica y la generación de gas aumentan. Existen tres rangos de temperatura:

- Psicofílico, con producción de gas variable según la estación y baja inversión en infraestructura.
- Mesofílico, con descomposición más lenta pero menor consumo energético.
- Termofílico, que ofrece una digestión rápida, alto rendimiento de biogás y tiempos de retención más cortos.



La selección del rango óptimo depende del equilibrio entre eficiencia, costos y condiciones ambientales, en la tabla 1 se muestran las distintas temperaturas y sus rangos óptimos de operación [24].

Tabla 1 Temperaturas optimas en la fermentación anaeróbica

TEMPERATURA	RANGOS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN
Psicrofílicos	15°C a 18°C
Mesofílicos	34°C a 38°C
Termofílicos	50°C a 60°C

Nota. Adaptado de Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia [24]

El pH óptimo para la digestión anaeróbica está entre 6,8 y 7,2 como se muestra en la tabla 2. Para mantener este rango es crucial para la estabilidad del proceso y la producción eficiente de biogás. El control tanto de la temperatura como del pH es esencial para optimizar la fermentación y maximizar la generación de gas [24].

Tabla 2 Rango de valores de pH en la generación de biogás.

VALOR PH	CARACTERÍSTICA
6.5 – 7.5	Óptimo
Menor de 6.4	Retardo por ácidos
Mayor a 7.6	Retardo por amonios

Nota. Adaptado de Rango de valores de pH en la generación de biogás [24].

2.1.2.3 Tiempo de Retención

En la tabla 3 se indican los tiempos de retención hidráulico (HRT) que es el tiempo que el sustrato permanece en el digestor. Un tiempo de retención adecuado asegura que la materia orgánica tenga suficiente tiempo para degradarse completamente, aumentando la producción de biogás. Un HRT demasiado corto puede resultar en una digestión incompleta, mientras que un HRT demasiado largo puede ser ineficiente y costoso [25].



Tabla 3 El Tiempo De Retención Hidráulico (Hrt)

TEMPERATURA	TIEMPOS DE RETENCIÓN
Psicrofílicos	Mayor a 40 días
Mesofílicos	10 a 40 días
Termofílicos	Menor a 10 días

Nota. Tiempo De Retención Hidráulico [25]

2.1.2.4 Carga Orgánica

La carga orgánica se refiere a la cantidad de materia orgánica introducida en el digester por unidad de volumen y tiempo. Una carga orgánica adecuada es crucial para mantener un equilibrio entre la producción de biogás y la estabilidad del proceso. Cargas orgánicas demasiado altas pueden provocar acumulación de ácidos grasos volátiles y fallo del sistema, mientras que cargas bajas resultan en baja producción de biogás [26].

2.1.2.5 Microorganismos

Los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia son esenciales para la descomposición de la materia orgánica. Estos incluyen bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y arqueas metanogénicas. La diversidad y actividad de estos microorganismos dependen de las condiciones del proceso y del tipo de sustrato. Mantener un entorno adecuado para estos microorganismos es crucial para una producción eficiente de biogás [18].

2.1.2.6 Aditivos y Productos Químicos

Los aditivos y productos químicos pueden ser utilizados para optimizar la producción de biogás. Estos incluyen nutrientes como nitrógeno y fósforo, que son esenciales para el crecimiento microbiano, y productos químicos como álcalis para ajustar



el pH. Además, se pueden añadir enzimas para mejorar la degradación del sustrato y aumentar la producción de biogás [27].

2.1.2.7 Inhibidores

Los inhibidores son sustancias que pueden afectar negativamente la actividad microbiana y la producción de biogás. Estos incluyen amoníaco, sulfuro de hidrógeno, ácidos grasos volátiles en exceso, y metales pesados. Identificar y controlar la presencia de inhibidores es crucial para mantener un proceso de digestión estable y eficiente [28].

2.1.3 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que un grupo determinado de bacterias descomponen la materia orgánica sin oxígeno. Este proceso produce biogás, un producto gaseoso principalmente compuesto por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), con proporciones de metano entre el 50 y el 70 por ciento. También puede incluir hidrógeno (H₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y otros gases [29].

El biogás se puede usar como combustible en calderas, motores o turbinas para producir calor o electricidad. Además, se produce un desecho sólido o líquido llamado digestato, que es una mezcla de compuestos minerales y se puede usar como fertilizante orgánico para cultivos agrícolas [30].

2.1.3.1 Digestión anaerobia húmeda

La digestión anaeróbica húmeda es un proceso biotecnológico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno en un ambiente acuoso o bajo en sólidos [22]. Este tipo de fermentación se caracteriza por un



contenido de sólidos inferior al 15%, produciendo una mezcla líquida o semilíquida de agua residual y agua, algunas de las tecnologías que se usan en la digestión húmeda son:

Tecnología WASA (Wet Anaerobic Sludge Anaerobic):

La tecnología WASA, también conocida como lodos anaeróbicos húmedos, es una tecnología utilizada en el tratamiento de aguas residuales. Se trata de un proceso de digestión anaeróbica que tiene como objetivo convertir los residuos orgánicos en biogás y estabilizar los lodos. El proceso implica el uso de bacterias anaeróbicas para descomponer la materia orgánica del lodo, produciendo biogás como subproducto [31].

El biogás se puede utilizar como fuente de energía renovable y los lodos estabilizados se pueden procesar o utilizar como fertilizante. La tecnología WASA tiene varias ventajas sobre los métodos tradicionales de tratamiento aeróbico. Requiere menos energía y produce menos lodos, lo que reduce los costos operativos y el impacto ambiental. Además, el biogás producido se puede utilizar para generar electricidad o calor, lo que aumenta aún más la durabilidad del proceso.

Digestores de Mezcla Completa (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor):

Los digestores de mezcla completa son uno de los tipos más comunes de digestores anaerobios. En estos sistemas, el sustrato se mezcla continuamente para asegurar una distribución homogénea de los microorganismos y nutrientes. Estos digestores son adecuados para una amplia gama de sustratos y son conocidos por su estabilidad operativa [32].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



El tipo de reactor más común utilizado en estos sistemas es el reactor continuo de tanque agitado (CSTR). Este reactor está diseñado para mantener una agitación perfecta, asegurando una conversión y concentración uniforme en todo su volumen. Funciona con un caudal de entrada igual al de salida, manteniendo constante el volumen del reactor. Para mantener la temperatura interna en el rango mesófilo, el digestor está equipado con un sistema de intercambio de calor. Este sistema de calefacción suele ser externo, lo que facilita su mantenimiento y contribuye a la estabilidad del proceso[32].

Tecnología UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket):

La tecnología UASB utiliza un reactor en el que el sustrato fluye hacia arriba a través de una manta de lodos anaerobios. Esta configuración permite una alta eficiencia de tratamiento y producción de biogás, ya que el contacto entre el sustrato y los microorganismos es maximizado. Los reactores UASB son especialmente efectivos para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica [33].

Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente y Lecho Fijo (UAFB - Upflow Anaerobic Filter Bed):

Similar a la tecnología UASB, los reactores UAFB utilizan un lecho fijo de medios inertes, como grava o plásticos, sobre el cual se adhieren los microorganismos. El sustrato fluye hacia arriba a través del lecho fijo, permitiendo una alta eficiencia en la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás. Esta tecnología es adecuada para tratar aguas residuales con sólidos suspendidos bajos a moderados[34].



Tecnología de Reactores de Lodo de Flujo Ascendente (ABR - Anaerobic Baffled Reactor):

Los reactores ABR están diseñados con múltiples compartimentos en los que el flujo de aguas residuales es forzado a moverse hacia arriba y hacia abajo a través de los compartimentos. Esta configuración permite una mayor retención de biomasa y una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica. Los reactores ABR son efectivos para una amplia gama de aguas residuales y pueden manejar cargas orgánicas fluctuantes[35].

Tecnología de Reactores de Biopelícula de Lecho Móvil (MBBR - Moving Bed Biofilm Reactor):

Los reactores MBBR utilizan medios plásticos móviles en los que se desarrolla la biopelícula de microorganismos. Estos medios proporcionan una gran superficie para la adherencia de microorganismos, mejorando la eficiencia del proceso de digestión. La agitación continua del lecho móvil asegura un buen contacto entre el sustrato y los microorganismos, resultando en una alta producción de biogás [36].

Digestores de Flujo Continuo con Contacto Anaerobio (AC - Anaerobic Contact Process):

En el proceso de contacto anaerobio, el sustrato es mezclado con lodos anaerobios en un tanque de contacto antes de ser separado en un tanque de sedimentación. Los lodos sedimentados son reciclados de vuelta al tanque de contacto para mejorar la degradación



de la materia orgánica y la producción de biogás. Este sistema es eficiente y puede manejar altos volúmenes de aguas residuales[37].

2.1.3.2 Digestión anaerobia seca

La digestión anaerobia seca se realiza con sustratos que tienen un bajo contenido de agua, generalmente inferior al 85%. Esta tecnología es adecuada para residuos sólidos.

Tecnología Linde (digestor horizontal):

Se un digestor horizontal para la digestión anaerobia seca. Este diseño permite una mejor mezcla y contacto entre el sustrato y los microorganismos, mejorando la eficiencia de la digestión. Los digestores horizontales son robustos y pueden manejar una amplia variedad de sustratos sólidos, lo que los hace ideales para residuos municipales sólidos y residuos agrícolas[38].

Tecnología Dranco (Dry Anaerobic Composting):

Proceso continuo de digestión seca en el que el sustrato se introduce en un digestor vertical donde se degrada anaeróbicamente. La principal característica de esta tecnología es la capacidad de manejar residuos sólidos con un contenido de sólidos secos de hasta el 40%. El digestor es diseñado para minimizar la necesidad de mezcla, utilizando la gravedad para el flujo de materiales[39].

Tecnología Kompogas:

Es un proceso de digestión anaerobia seca continua que utiliza un digestor horizontal. Este sistema está diseñado para procesar residuos orgánicos con un contenido de sólidos de entre el 20% y el 40%. Los digestores Kompogas tienen un mecanismo de



mezcla integrado que asegura una buena homogeneización del sustrato, mejorando la eficiencia de la digestión y la producción de biogás[39].

Tecnología Valorga:

Utiliza un digestor vertical con un contenido de sólidos secos de hasta el 35%. Este sistema se caracteriza por un diseño de flujo de pistón, donde el sustrato se mueve lentamente a través del digestor en una dirección, permitiendo un tiempo de retención largo y una degradación completa del material orgánico. La tecnología Valorga es adecuada para una amplia gama de residuos sólidos, incluyendo residuos municipales y agrícolas[39].

2.1.4 Comparativa entre las tecnologías de producción de biogás

En la tabla 3 se presenta una comparativa sobre las diferentes tecnologías de producción de biogás, analizando sus tipos de reactores, características operativas, ventajas y desventajas, así como los tipos de sustratos adecuados para cada una.

Tabla 4 Tabla comparativa sobre las tecnologías de producción de biogás

Tecnología	Sólidos Totales	Tiempo Retención	Producción Biogás	Requerimientos De Agitación	Aplicabilidad en PTAR
Digestión anaerobia húmeda					
WASA	3-7%	15-30	Media	Media	Moderada
CSTR	3-10%	15-40	Alta	Alta	Alta
UASB	2-5%	5-15	Media	Baja	Moderada
UAFB	2-8%	10-20	Media-Alta	Baja	Moderada
ABR	2-8%	10-20	Media	Baja	Moderada
MBBR	2-10%	10-30	Alta	Alta	Alta
AC	3-10%	15-40	Alta	Alta	Alta
Digestión anaerobia seca					
Linde	20-40%	20-30	Alta	Media	Moderada
Dranco	25-40%	15-25	Alta	Media	Moderada
Kompogas	25-40%	15-25	Alta	Media	Moderada



Valorga	25-40%	15-25	Alta	Media	Moderada
---------	--------	-------	------	-------	----------

Nota. Autoría propia.

En base a la tabla 4, el digestor CSTR (Reactor Continuamente Agitado) fue seleccionado para la PTAR Ibarra debido a su idoneidad para el tratamiento de lodos de alta humedad (>90%) y baja concentración de sólidos (2–5%). Su agitación continua asegura la homogeneización térmica ($\pm 1^\circ\text{C}$) y una conversión eficiente de materia orgánica en biogás. Opera típicamente a temperatura mesófila (35–38 °C), optimizando la actividad microbológica.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) en CSTR se ajusta entre 15 y 25 días, garantizando una degradación efectiva de sólidos volátiles (>50%). Además, soporta variaciones de carga con eficiencia, gracias a su estructura de mezcla total que evita sedimentaciones y estratificaciones internas. Frente a otros sistemas como UASB o digestores secos (Linde, Dranco, Kompogas), el CSTR ofrece mayor robustez operativa, tolerancia a sobrecargas y generación continua de biogás con 60–65% de CH_4 , ideal para cogeneración energética en plantas municipales.

2.2 Tecnologías de generación eléctrica a partir de biogás

El biogás, producido a partir de la digestión anaerobia de materia orgánica, es una fuente de energía renovable que puede ser utilizada para la generación de electricidad. Existen diversas tecnologías que aprovechan el biogás para producir electricidad. A continuación, se describen las principales tecnologías de generación eléctrica a partir de biogás.



2.2.1 Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna son una de las tecnologías más comunes para la generación de electricidad a partir de biogás. En estos motores, el biogás se mezcla con aire y se quema dentro de los cilindros, lo que genera una explosión controlada que mueve los pistones. El movimiento de los pistones se convierte en energía mecánica que, a su vez, acciona un generador eléctrico para producir electricidad. Los motores de combustión interna pueden ser de ciclo Otto (gasolina) o diésel modificados para funcionar con biogás[40].

2.2.2 Turbinas de gas

Generan electricidad utilizando la energía cinética del biogás en combustión para hacer girar una turbina. El biogás se mezcla con aire y se quema en una cámara de combustión, produciendo gases calientes a alta presión. Estos gases se expanden a través de las palas de la turbina, haciendo que esta gire. La energía mecánica generada por la rotación de la turbina se convierte en electricidad a través de un generador acoplado [48].

2.2.3 Microturbinas

Son versiones más pequeñas de las turbinas de gas, diseñadas para aplicaciones de generación distribuida. Funcionan de manera similar a las turbinas de gas, pero son más compactas y están diseñadas para manejar menores cantidades de biogás. El biogás se quema en una cámara de combustión, produciendo gases calientes que hacen girar una microturbina conectada a un generador eléctrico[41].



2.2.4 Células de combustible

Generan electricidad a través de una reacción electroquímica entre el biogás y el oxígeno. En una célula de combustible de biogás, el metano se oxida en el ánodo, produciendo dióxido de carbono, agua y electrones. Los electrones fluyen a través de un circuito externo, generando electricidad, mientras que el oxígeno se reduce en el cátodo. Este proceso electroquímico es altamente eficiente y produce electricidad con muy bajas emisiones[42].

2.2.5 Motores Stirling

Utilizan la expansión y contracción de un gas (en este caso, el biogás) para mover un pistón y generar electricidad. Estos motores funcionan mediante la combustión externa del biogás para calentar un fluido de trabajo, generalmente hidrógeno o helio, contenido en un circuito cerrado. El fluido de trabajo se calienta y se expande, moviendo un pistón que está conectado a un generador eléctrico. Después, el fluido se enfría y se contrae, repitiendo el ciclo[43].

2.2.6 Turbinas de vapor

Utilizan el calor generado por la combustión del biogás para producir vapor, que luego impulsa una turbina conectada a un generador eléctrico. En este sistema, el biogás se quema en una caldera para producir vapor a alta presión. El vapor se expande a través de las palas de la turbina, haciendo que ésta gire. La energía mecánica generada se convierte en electricidad mediante un generador acoplado[30].



2.2.7 Ciclos combinados

Combinan turbinas de gas y turbinas de vapor para mejorar la eficiencia de la generación eléctrica. En un ciclo combinado, el biogás se quema en una turbina de gas, generando electricidad y gases de escape calientes. Estos gases de escape se utilizan para producir vapor en una caldera de recuperación de calor. El vapor generado impulsa una turbina de vapor adicional, produciendo más electricidad. Este proceso aprovecha al máximo la energía contenida en el biogás, aumentando la eficiencia total del sistema[44].

2.2.8 Comparativa entre tecnologías de producción eléctrica a partir de biogás

La tabla comparativa que se presenta a continuación analiza diversas tecnologías de generación eléctrica a partir de biogás, especificando su principio de funcionamiento, así como sus respectivas ventajas y desventajas.

Tabla 5 Tabla comparativa tecnologías de producción eléctrica a partir de biogás

Tecnología	Principio de Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Motor de Combustión Interna	Combustión de biogás y aire en cilindros, mueve pistones que accionan un generador.	Bajo costo inicial, alta conversión eléctrica.	Mantenimiento periódico, emisiones, baja eficiencia en carga parcial.
Turbina de Gas	Combustión de biogás para hacer girar una turbina.	Eficiente en cargas parciales, menos mantenimiento.	Costo inicial alto, emisiones de gases.
Microturbina	Combustión de biogás en cámara para girar microturbina.	Compacta, bajo mantenimiento.	Menor capacidad, alto costo por kW generado.
Célula de Combustible	Reacción electroquímica entre biogás y oxígeno.	Alta eficiencia, bajas emisiones, operación silenciosa.	Costo elevado, sensible a impurezas.
Motor Stirling	Calentamiento externo mueve pistón para generar electricidad.	Operación silenciosa, buena eficiencia.	Baja eficiencia en carga parcial, baja capacidad.



Turbina de Vapor	Combustión de biogás genera vapor que impulsa una turbina.	Alta eficiencia, aprovecha calor residual.	Alto costo y mantenimiento, alto consumo de agua.
Ciclo Combinado	Combina turbinas de gas y vapor para maximizar eficiencia.	Máxima eficiencia, uso de calor residual.	Alta complejidad técnica y costo de instalación.
Motor de Combustión Interna	Combustión de biogás y aire en cilindros, mueve pistones que accionan un generador.	Bajo costo inicial, alta conversión eléctrica.	Mantenimiento periódico, emisiones, baja eficiencia en carga parcial.

Nota. Autoría propia.

Entre las tecnologías que emplean biogás expuestas en la tabla 5, los motores de combustión interna destacan como la opción más adecuada para plantas de tratamiento de aguas residuales, dado que permiten el aprovechamiento del calor residual en otros procesos. El sistema propuesto integra una turbina de gas y una turbina de vapor para optimizar la producción de energía. Durante este proceso, el biogás generado en los digestores anaerobios se quema en la turbina de gas, produciendo electricidad y gases de escape a alta temperatura.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología aplicada y los materiales utilizados para el desarrollo de la investigación. Se describe el proceso seguido para analizar la producción y aprovechamiento del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra.



3.1 Tipo de investigación

El presente proyecto de investigación se basa en una metodología mixta, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos. Cuantitativamente, se describe y analiza la producción de biogás, mientras que cualitativamente, se realiza una revisión de la literatura técnica y científica, complementada con consultas a expertos en cogeneración y tratamiento de aguas residuales. Este enfoque integral permite desarrollar una propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la PTAR de Ibarra.

La validez de la información recopilada fue verificada mediante la recolección directa de datos en la planta, con un enfoque particular en la cantidad de biogás recuperado durante los procesos de tratamiento. Se analizó la viabilidad de utilizar motores de combustión interna alimentados por biogás para la generación de energía eléctrica.

El dimensionamiento del generador se llevó a cabo en función de los datos de producción de biogás proporcionados por la PTAR de Ibarra, asegurando así la precisión y relevancia de la propuesta técnica.

3.2 Descripción del lugar de estudio

La propuesta técnica se realizó en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), ubicada en la provincia de Imbabura, en el cantón Ibarra, en la margen izquierda del río Tahuando. La planta se encuentra en la parte suroeste del río, entre la avenida Carchi y la calle María Angélica Idrobo, ocupando una superficie de aproximadamente 4.5 hectáreas. Esta instalación es operada por la Empresa Municipal de Agua Potable y



Alcantarillado de Ibarra (EMAPA-I), la cual es responsable de los servicios de agua y alcantarillado en todo el cantón[14].

El lugar de estudio está definido por las coordenadas geográficas que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6 Coordenadas geográficas del lugar de estudio

Parámetro	Descripción
Latitud	0,351013
Longitud	-78,11
Altitud	2175

Nota. Adaptado de los datos de la memoria técnica de la planta[45].

La PTAR, está ubicada a una latitud de 0.3510 y una longitud de -78.11, con una altitud de 2175 metros sobre el nivel del mar (msnm). En esta área, la temperatura anual varía entre un mínimo de 14°C y un máximo de 25°C.



Fig. 2 Ubicación de la PTAR Ibarra con ayuda del Google Maps[14].

La ruta de acceso a la planta de tratamiento de aguas residuales, tomando como inicio el campus de la Universidad Técnica del Norte y como destino el sitio de estudio. La distancia aproximada entre estos dos puntos es de 2.93 km, recorriendo en automóvil



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



la Av. 17 de Julio y luego el camino de la Piedra Chapetona, lo que lleva alrededor de 7 minutos hasta llegar a la PTAR como se muestra en la Fig. 1.

La PTAR de Ibarra fue diseñada para procesar y tratar las aguas residuales de la ciudad, con una capacidad de tratamiento de 432 litros por segundo (l/s). La planta maneja grandes volúmenes de agua a través de un complejo sistema de pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento biológico[46]. Uno de los componentes clave de la planta es la recuperación y utilización del biogás generado durante el tratamiento de las aguas residuales. Este biogás, producto de la digestión anaerobia de los lodos, en la Fig. 3 se presentan las actividades operativas relacionadas con las aguas residuales que se llevan a cabo en la PTAR-I, las cuales son esencialmente:

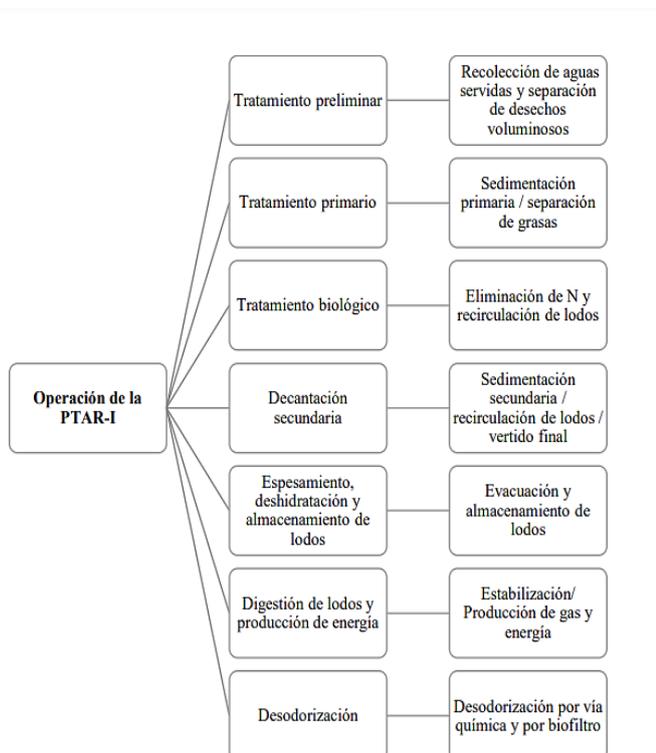


Fig. 3. Actividades operativas PTAR-I [46]



La planta, en sus procesos operativos, destaca especialmente en el área de digestión anaeróbica de lodos, donde se genera biogás a partir de la descomposición de materia orgánica.

3.3 Metodología del diseño de la central de cogeneración

El diseño técnico de la central de cogeneración se fundamenta en un enfoque metodológico mixto, que permitió integrar información teórica y empírica con datos reales operativos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra.

La metodología aplicada posibilitó el análisis del potencial energético del biogás, la selección de los equipos adecuados y la formulación de una propuesta técnica viable y contextualizada.

Este proceso incluyó la caracterización de los lodos residuales, la estimación del volumen de biogás disponible, el cálculo del poder calorífico, la evaluación del rendimiento energético y la integración de un sistema de generación eléctrica y térmica adaptado a las condiciones específicas de la planta.

3.3.1 Enfoque

La investigación emplea un enfoque metodológico mixto para cumplir con los objetivos de caracterizar las tecnologías de producción de biogás y generación de energía eléctrica y térmica, evaluar el potencial energético del biogás y desarrollar una propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra. Mediante la investigación cualitativa, se identificaron y analizaron las tecnologías vigentes en la producción de biogás y



cogeneración de energía, permitiendo establecer criterios preliminares para evaluar el potencial energético del biogás.

Posteriormente, con el enfoque cuantitativo, se trabajó con datos reales proporcionados por la planta, tales como la cantidad de lodos generados, el volumen de biogás producido, la presión y características del almacenamiento. Además, se realizaron visitas técnicas a la planta, lo que permitió obtener información directa y detallada sobre las condiciones operativas y el proceso de generación de biogás. Esta experiencia práctica fue crucial para comprender la realidad operativa de la planta y fortalecer la base de datos utilizada en los cálculos energéticos.

Este enfoque permitió sustentar el diseño técnico con fundamentos sólidos, considerando tanto experiencias previas como la realidad operativa del sistema de tratamiento.

3.3.2 Métodos

La metodología de esta investigación emplea los métodos inductivo y deductivo para evaluar el potencial del biogás como fuente de energía y desarrollar una propuesta técnica para la implementación de una central de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra.

Mediante el método inductivo, se recopilarán datos sobre tecnologías de tratamiento y aprovechamiento de biogás a través de la revisión bibliográfica en libros y documentos relevantes, así como de información específica de la planta de tratamiento, la municipalidad de Ibarra y la empresa de agua potable EMAPA. Esta recopilación



permitirá analizar prácticas y tecnologías utilizadas en plantas similares, identificando patrones y tendencias sobre la efectividad de las tecnologías de generación energética aplicables al contexto de la planta de Ibarra.

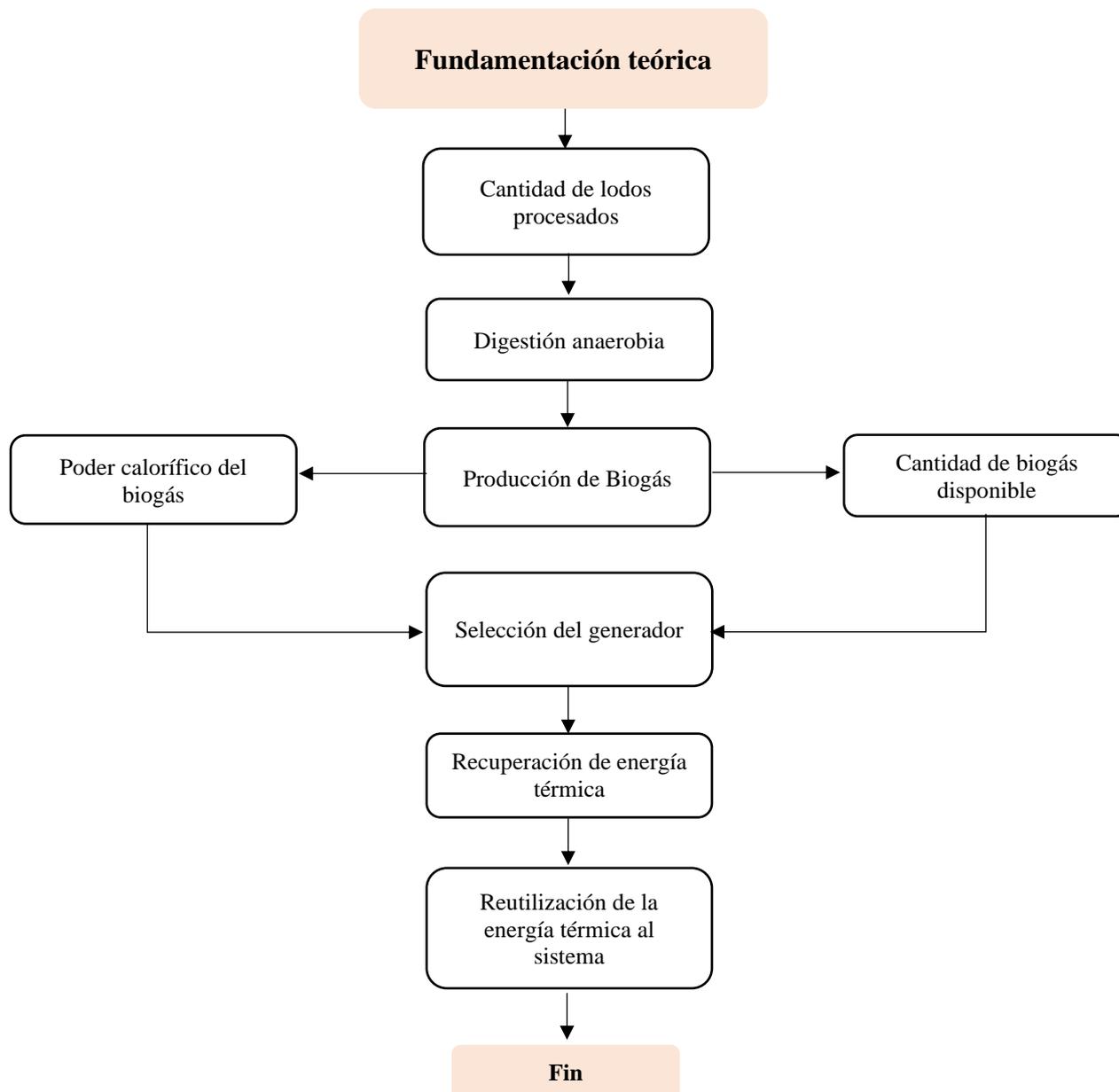
El método deductivo se empleó para evaluar la viabilidad técnica de implementar tecnologías de generación de energía a partir del biogás generado en la planta. Partiendo de principios teóricos y buenas prácticas de conversión energética, se analizaron datos específicos recopilados tanto de la PTAR de Ibarra como de fuentes bibliográficas relevantes.

Esta metodología permitió realizar cálculos energéticos detallados, estimar el potencial eléctrico y térmico del biogás disponible y dimensionar los equipos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de cogeneración.

Con base en esta evaluación técnica, se formuló una propuesta fundamentada, adaptada al contexto local y a las condiciones reales de producción y aprovechamiento del biogás en la planta.

3.3.3 Flujograma

Se ha establecido un modelo metodológico con él se realizó el proceso de evaluación y obtención de datos. Este modelo se articuló mediante una secuencia de pasos, estos llevaron el estudio hacia la culminación de las pruebas y datos requeridos, y el documento final.



3.4 Parámetros de diseño

La implementación de la central de cogeneración está condicionada por los principales parámetros de diseño, tales como:

- Determinación de la producción de lodos
- Digestión anaerobia



- Medición de producción de biogás
- Composición y tratamiento del biogás
- Potencial energético del biogás generado
- Aprovechamiento del calor residual

3.4.1 *Determinación de la producción de lodos*

Los lodos son generados principalmente en los procesos de sedimentación primaria y secundaria, donde los sólidos suspendidos se separan del agua residual tratada. Estos lodos son sometidos a un proceso de espesamiento para reducir su volumen y aumentar la concentración de sólidos, facilitando así su posterior tratamiento en los digestores anaerobios.

Tabla 7 Características de la digestión

Descripción	Cantidad
Peso total de lodos espesados	8811,31 kg/d
M.S. volátil	5984,93 kg/d
Concentración	67,92 %
Número de digestores	1
Volumen unitario	3369 m ³
Diámetro	17 m
Altura cilíndrica	9,90 m

Nota. Adaptado de los datos de la memoria descriptiva de la planta[45].

Los parámetros técnicos del diseño del tanque de fermentación anaeróbica se dan según los registros operativos de la planta en la tabla 7, la producción diaria de lodos espesados asciende a 8.811,31 kg, de los cuales 5.984,93 kg corresponden a materia seca volátil (MSV), que representa la fracción orgánica biodegradable utilizada como sustrato para la producción de biogás. La alimentación de los lodos al digestor anaerobio se realiza de forma continua mediante bombas sumergibles y un sistema de conducción,



garantizando un flujo constante y controlado que permite mantener las condiciones óptimas de operación.

3.4.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico realizado en el digester anaerobio de la PTAR de Ibarra, con un volumen de 3369 m³, diámetro de 17 m y altura de 9,90 m. Opera en condiciones mesofílicas a 35°C, gracias a un sistema de calefacción con calderas de 401.760 kcal/h alimentadas por biogás y gasoil. El tiempo de retención hidráulico (TRH) asegura la descomposición de la materia seca volátil (MSV) presente en los lodos espesados.

Para garantizar la homogeneización, se utiliza un agitador mecánico vertical de doble hélice, evitando la formación de capas inactivas. Como resultado, se produce biogás compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), acumulado en la parte superior del digester para su posterior aprovechamiento energético.

En la tabla 8, Se especifica de forma más clara los datos más relevantes del proceso de digestión anaerobia en la PTAR de Ibarra.

Tabla 8 Proceso de digestión anaerobia

Parámetro	Descripción/valor
Volumen del digester	3369 m ³
Diámetro del digester	17 m
Condición de operación	35°C
Dimensión de la caldera	401,760kcal/h.
Combustible de la caldera	Biogás y gasoil

Nota. Adaptado de los datos de la memoria descriptiva de la planta[45].



3.4.3 *Medición de producción de biogás*

La medición de la producción de biogás en la PTAR de Ibarra se realiza mediante un gasómetro de baja presión con capacidad de 550 m³, que permite almacenar y registrar el volumen diario de biogás generado, medido en m³/día. Este biogás es producido en el digestor anaerobio a partir de la degradación de la materia seca volátil (MSV) presente en los lodos.

El gasómetro no solo funciona como almacenamiento temporal, sino también como regulador intermedio para garantizar un flujo constante hacia los sistemas de aprovechamiento energético, como el motor generador y caldera.

En la tabla 9 se describe los datos más relevantes de la medición de biogás.

Tabla 9 Parámetros de almacenamiento del biogás

Parámetro	Descripción/valor
Sistema de medición	Gasómetro de baja presión
Volumen del gasómetro	550 m ³
Presión de servicio	20 mbar
Quemador de gas	200 Nm ³ /h

Nota. Adaptado de los datos de la memoria descriptiva de la planta[45].

En base a los datos recopilados sobre la producción de biogás desde el año 2001 hasta el 2024 se presentan la producción aproximada por año, mes, día y hora.



Tabla 10 Producción de biogás desde el año 2001 hasta el 2024

Producción de biogás 2021	Cantidad
Anual	192317.4 m ³ /año
mensual	16026.45 m ³ /mes
diario	526.86 m ³ /día
Hora	21.95 m ³ /h
Producción de biogás 2022	Cantidad
Anual	233496.3 m ³ /año
mensual	19458.03 m ³ /mes
diario	639.71 m ³ /día
Hora	26.66 m ³ /h
Producción de biogás 2023	Cantidad
Anual	203969.5 m ³ /año
mensual	16997.46 m ³ /mes
diario	558.83 m ³ /día
Hora	23.29 m ³ /hora
Producción de biogás 2024	Cantidad
Anual	181649.90 m ³ /año
mensual	15137.49 m ³ /mes
diario	495.67 m ³ /día
Hora	20.74 m ³ /hora

Nota. Adaptado de los datos compartidos del personal de la planta.

El análisis del periodo 2021-2024 revela una producción promedio anual de biogás de 202858 m³, lo que equivale a:

- 16871 m³/mes,
- 556 m³/día,
- 23,15 m³/hora.

Estos valores demuestran un funcionamiento estable y consistente del sistema de digestión anaerobia, con variaciones anuales mínimas que no comprometen su eficiencia global.



El caudal de biogás disponible, estimado en 2424 Nm³[46], confirma la viabilidad del sistema para su aprovechamiento energético. Este volumen representa una fuente confiable para la generación de electricidad.

3.4.4 *Composición y tratamiento del biogás*

El biogás generado en el digestor anaerobio está compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), junto con trazas de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua. Según la información recopilada durante la visita a la planta, la concentración de metano en el biogás producido varía entre el 60 % y el 68 %, con un valor promedio de aproximadamente 62 %.

El metano presente en el biogás posee un poder calorífico inferior de 11,950.3 kcal/kg y un poder calorífico superior de 13,264.8 kcal/kg, lo que lo convierte en una fuente energética viable para su aprovechamiento en la generación de electricidad y calor en la planta.

Tabla 11 Compuestos del biogás procedente del tratamiento de aguas residuales

Componente	Contenido
Metano	62%
Dióxido de carbono	35%
Sulfuro de hidrogeno	0,1%
Monóxido de carbono	0,1%
Nitrógeno	0,5%
Hidrogeno	0,1%
PCI metano	11950,3 kcal/kg
PCS metano	13264,8 kcal/kg

Nota. Fuente: personal operativo de la PTAR Ibarra.

La Tabla 11 presenta la composición completa del biogás generado en el tratamiento de aguas residuales. Uno de los principales desafíos en su aprovechamiento



es la presencia de H_2S , un gas corrosivo que daña los equipos y reduce la eficiencia energética. Para mitigar este problema, la planta emplea un sistema de dosificación de cloruro férrico ($FeCl_3$), el cual reacciona con el H_2S formando compuestos sólidos no corrosivos (como sulfuro férrico). Este tratamiento no solo mejora la calidad del biogás, sino que también permite su uso óptimo en motogeneradores para la producción de energía eléctrica y térmica. Como resultado, se garantiza una operación más segura, se prolonga la vida útil de los equipos.

3.4.5 Poder calorífico del biogás generado

El biogás producido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra presenta un contenido promedio de 62% de metano, con fluctuaciones observadas entre el 60% y el 68%. Con este porcentaje, el poder calorífico se calcula a partir de los valores estándar del metano puro.

El poder calorífico del metano en condiciones normales es:

- Poder Calorífico Inferior (PCI): 11950.3 kcal/kg,
- Poder Calorífico Superior (PCS): 13264.8 kcal/kg.

Utilizando el contenido promedio real de metano (62%) y aplicando la Ecuación 1[47] para el cálculo del poder calorífico, se determinaron los valores que se presentan en la Tabla 12.

$$PCI_{biogás} = (PCI_{CH_4})(X_{CH_4}) \quad [11]$$

Donde:



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



- $PCI_{biogás}$: Poder Calorífico Inferior (PCI) del biogás.
- PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano.
- X_{CH_4} : Fracción volumétrica de metano en el biogás.

Luego, el valor obtenido en kcal/kg se convierte a MJ/kg utilizando el factor:

$$1\text{kcal}=0,004184\text{ MJ}$$

Posteriormente, considerando la densidad del metano $P_{CH_4} = (0.717\text{kg}/\text{m}^3)$, se expresa el poder calorífico en MJ/m^3 .

Finalmente, para expresar el potencial energético en unidades eléctricas, se convierte el valor de MJ/m^3 a kWh/m^3 mediante:

$$1\text{MJ}=0,2778\text{ kWh}$$

Tabla 12 Resultados del poder calorífico calculado del biogás

Biogás	kcal/kg	MJ/kg	MJ/m³	kWh/m³
PCI	7409,2	30,99	22,22	6,17
PCS	8221,8	34,42	24,68	6,85

Nota. Autoría propia.

Los resultados obtenidos muestran que el Poder Calorífico Inferior (PCI) del biogás es de aproximadamente $22,22\text{ MJ}/\text{m}^3$, valor que se encuentra dentro del rango típico reportado en la literatura técnica para biogás generado por digestión anaeróbica de lodos residuales ($21\text{--}24\text{ MJ}/\text{m}^3$). Esto confirma que el biogás producido en la planta posee una calidad energética adecuada para su aprovechamiento en sistemas de cogeneración.



3.4.5.1 Comparación del biogás con el GLP

El biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra y el Gas Licuado de Petróleo (GLP) son dos fuentes de energía gaseosa ampliamente utilizadas en procesos térmicos y de generación eléctrica.

Ambos combustibles poseen características distintas en cuanto a composición, poder calorífico, estado físico y origen, lo que influye directamente en su desempeño energético y su impacto ambiental.

El biogás, compuesto principalmente por metano (62%) y dióxido de carbono, presenta un Poder Calorífico Inferior (PCI) de aproximadamente 22.22 MJ/m³ (6.17 kWh/m³). Por su parte, el GLP, compuesto por propano (C₃H₈) y butano (C₄H₁₀), posee un PCI mucho más elevado, del orden de 91.34 MJ/m³ (25.37 kWh/m³).

Tabla 13 Comparación: Biogás vs. GLP

Parámetro	Biogás (PTAR Ibarra)	GLP (Gas Licuado de Petróleo)
Principal componente	CH ₄	C ₃ H ₈ / C ₄ H ₁₀
Estado	Gaseoso	Licuado
PCI (MJ/m ³)	22.22	91.34
PCI (kWh/m ³)	6.17	25.37
Densidad Energética	Baja	Alta
Fuente	Renovable	Fósil
Aplicaciones	Electricidad, Calefacción	Cocina, Transporte

Nota. Adaptado de la Comparación de Poder calorífico del GLP con el Biogás [49].

Aunque el GLP posee un poder calorífico inferior significativamente mayor que el del biogás, este último se presenta como una opción viable para cogeneración en la PTAR Ibarra. El contenido energético del biogás, equivalente a 6.17 kWh/m³, es



suficiente para alimentar un sistema de cogeneración que permita generar electricidad y recuperar calor.

3.4.6 Potencial térmico del biogás

El potencial térmico del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra se estima considerando la producción diaria de biogás y su poder calorífico inferior (PCI). La cantidad de energía térmica disponible diariamente se determina mediante la ecuación 2[50]:

$$ET = (PB)(PCI) \quad [2]$$

Donde:

- ET: Energía térmica
- PB: Producción de biogás
- PCI: Poder Calorífico inferior

Para expresar esta energía en kilovatios hora (kWh), se utiliza el factor de conversión:

$$1\text{MJ}=0.2778 \text{ kWh}$$

Para calcular el potencial térmico del biogás se calculó utilizando los datos de producción de biogás (apartado 3.4.3) y su respectivo poder calorífico (apartado 3.4.5), lo que permitió determinar 12345,4 MJ/día equivalente a 3429,8 kWh/día.



Para expresar este valor en términos de potencia térmica (MW_t), se divide la energía diaria entre el número de segundos del día (86.400 s/día), lo que permite obtener una potencia promedio de 142,9 kW_t , equivalente a 0,1429 MW_t .

3.4.7 Potencial eléctrico del biogás

El potencial eléctrico del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra se estima a partir de su potencial térmico y la eficiencia eléctrica del sistema de cogeneración propuesto. El cálculo se lo realiza mediante la ecuación de potencial eléctrico[50]:

$$PE = (ET)(\eta) \quad [3]$$

Donde:

- PE: Potencial eléctrico diario (kWh/día),
- ET: Energía térmica diaria (kWh/día),
- η : Eficiencia eléctrica del motogenerador

A partir del potencial térmico del biogás y aplicando una eficiencia de conversión del 38%, se determinó que su potencial eléctrico es de 1303,3 kWh/día.

Esta cantidad de energía eléctrica disponible confirma la viabilidad del sistema de cogeneración propuesto, permitiendo el abastecimiento de una parte de las necesidades energéticas internas de la planta.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANALISIS



4 Introducción

Los resultados obtenidos en el capítulo 3 corresponden al potencial energético del biogás y servirán de base para el diseño y dimensionamiento de la planta de cogeneración propuesta en el siguiente capítulo.

4.1 Sistema de cogeneración

El diseño La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra produce biogás como resultado del tratamiento de los lodos. Este trabajo propone un sistema de cogeneración para convertirlo en electricidad (autoconsumo) y calor (para el digestor), reduciendo la dependencia energética externa. Se incluye el diseño técnico, selección de equipos y cálculos de producción.

4.1.1 Selección del Sistema de Cogeneración

La propuesta contempla instalar un motor de combustión interna alimentado por biogás. Este motor estará conectado a un generador eléctrico para producir electricidad, y además contará con un sistema de recuperación de calor.

El calor se recuperará de dos fuentes principales:

- Del sistema de escape (gases calientes)
- Del sistema de refrigeración del motor.

La energía térmica recuperada será integrada al sistema de calefacción de lodos existente, permitiendo mantener la temperatura óptima del digestor anaeróbico.

El sistema operará de manera flexible:



- Cuando haya biogás disponible, se usará el motogenerador para producir electricidad y calor.
- Cuando no haya biogás suficiente, se utilizará la caldera existente que puede funcionar con gasoil o biogás.

La Fig. 4 muestra un esquema general del sistema propuesto.

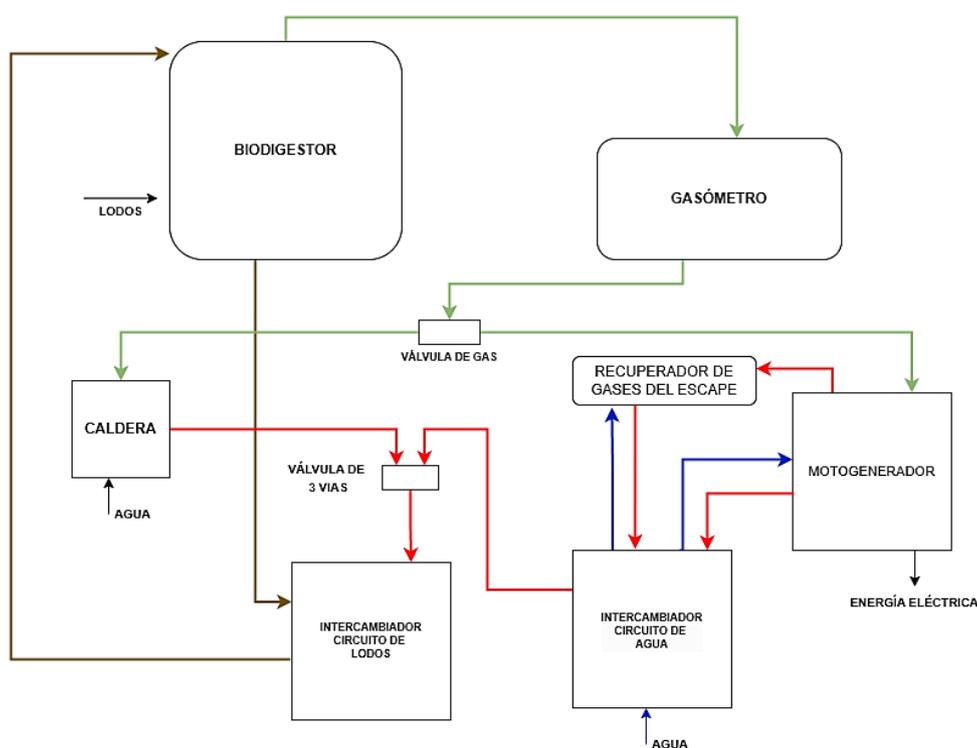


Fig. 4 Esquema general del sistema propuesto

El diagrama muestra el flujo de biogás desde el digestor hacia el gasómetro y posteriormente al motogenerador. La energía eléctrica generada se utilizará para el autoconsumo de la planta, mientras que el calor recuperado del motor será integrado al sistema de calefacción existente, compuesto por una caldera y un intercambiador de circuitos de lodos, permitiendo mantener la temperatura óptima del digestor anaeróbico.



4.1.2 Sistema de Calefacción de Lodos Existente

La planta dispone de un sistema de calefacción que incluye una caldera marca Calinter S.A., modelo S tipo 400, con una potencia útil de 462.8 kW, capaz de operar tanto con gasoil como con biogás, y un rendimiento del 95.5 %.

Complementariamente, se cuenta con un intercambiador de calor tipo espiral, marca Sedical, modelo SONSPV 500 Ø1000, diseñado para una superficie de transferencia de 11.6 m², una potencia térmica de 307 kW, una temperatura máxima de trabajo de 100 °C y una presión máxima de servicio de 3 bar.

Los datos técnicos de la caldera y del intercambiador de calor se presentan en el Anexo A y Anexo B, respectivamente.

4.2 Motogenerador

El sistema de cogeneración propuesto requiere la instalación de un motor generador que permita el aprovechamiento eficiente del biogás producido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra.

El motor generador será el encargado de convertir la energía química del biogás en electricidad para autoconsumo, y simultáneamente, de recuperar el calor residual para su integración al sistema de calefacción de lodos existente.

En los siguientes apartados se presenta la selección del equipo y las principales características técnicas del motogenerador elegido para este proyecto.



4.2.1 Selección del Motor Generador a Biogás

Para la implementación del sistema de cogeneración en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra, se requiere un motogenerador que opere utilizando biogás como combustible principal.

La selección se realizó considerando:

- Producción diaria de biogás: 556 m³/día
- Poder Calorífico Inferior (PCI) del biogás: 22.22 MJ/Nm³

Con base en estos parámetros, se seleccionó el motogenerador modelo FGLD180 de Dresser-Rand / Siemens Energy, diseñado para operar con biogás en rangos de poder calorífico de 22 a 26 MJ/Nm³, conforme a los catálogos técnicos del fabricante (Anexo C).

El motor ofrece una eficiencia eléctrica del 41 %, permitiendo un aprovechamiento efectivo del biogás, además de la posibilidad de recuperar calor de los gases de escape y del sistema de refrigeración, optimizando la producción simultánea de energía eléctrica y térmica.

La elección del modelo FGLD180 se fundamenta en su compatibilidad con el biogás disponible y en su capacidad para cumplir los requerimientos energéticos de la planta.



4.2.2 Motogenerador FGLD180 Dresser-Rand

El motogenerador seleccionado para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra es el modelo FGLD180 de la marca Dresser-Rand / Siemens Energy presentado en la Fig.5.

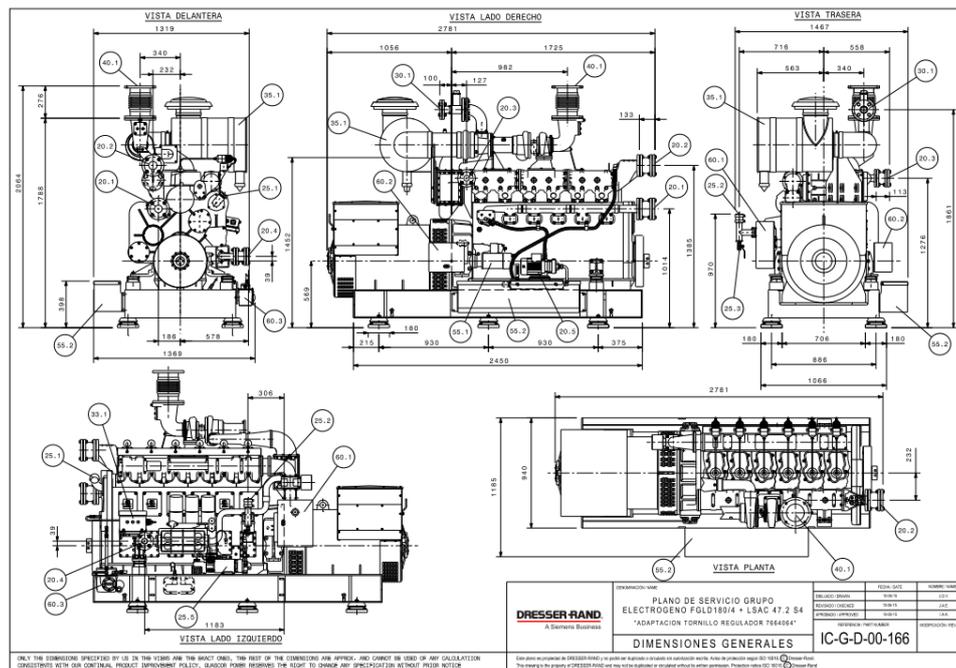


Fig. 5 Motogenerador FGLD180 Dresser-Rand

Este equipo está diseñado específicamente para operar con biogás de bajo poder calorífico, permitiendo la generación de energía eléctrica.

El motogenerador cuenta con un motor de combustión interna que convierte la energía química del biogás en energía mecánica, la cual se transforma en electricidad mediante un generador acoplado. Las principales características técnicas del motogenerador se resumen en la Tabla 14.



Tabla 14 Características técnicas principales del motogenerador FGLD180

Parámetro	Descripción
Modelo	FGLD180
Fabricante	Dresser-Rand / Siemens Energy
Potencia aparente	255 kVA
Voltaje de operación	460/230 Vac
Frecuencia	60 Hz
Velocidad de operación	1800 rpm
Eficiencia eléctrica	41 %
Tipo de combustible	Biogás (22–26 MJ/Nm ³)

Nota. Adaptado de la placa técnica del motogenerador Anexo D

La placa de datos del motogenerador se presenta en el Anexo D, mientras que la información detallada de su funcionamiento y especificaciones adicionales se encuentra en los catálogos técnicos del fabricante, incluidos en el Anexo C.

4.3 Sistema de recuperación térmico

El fabricante del motogenerador modelo FGLD180 suministra un paquete de recuperación térmica que permite aprovechar el calor residual generado durante la operación del motor.

El sistema de recuperación térmico se basa en dos fuentes principales:

- El circuito de refrigeración del motor
- Los gases de escape.

En los apartados siguientes se describen los componentes que integran el sistema de recuperación térmico y las características de su funcionamiento.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



4.3.1 Intercambiador de calor en el circuito principal

En el sistema de cogeneración propuesto, el intercambiador de calor de placas cumple la función de transferir la energía térmica recuperada del circuito de refrigeración del motor hacia el sistema de calefacción de lodos.

El intercambiador se conecta directamente a la salida del sistema de enfriamiento del motogenerador, captando el calor residual del agua de refrigeración a alta temperatura. De esta forma, el fluido térmico intercambia calor de con el agua del circuito de calefacción sin mezclarse, asegurando un control térmico preciso.

A continuación, en la Figura 6, se presenta el modelo de intercambiador de placas seleccionado:

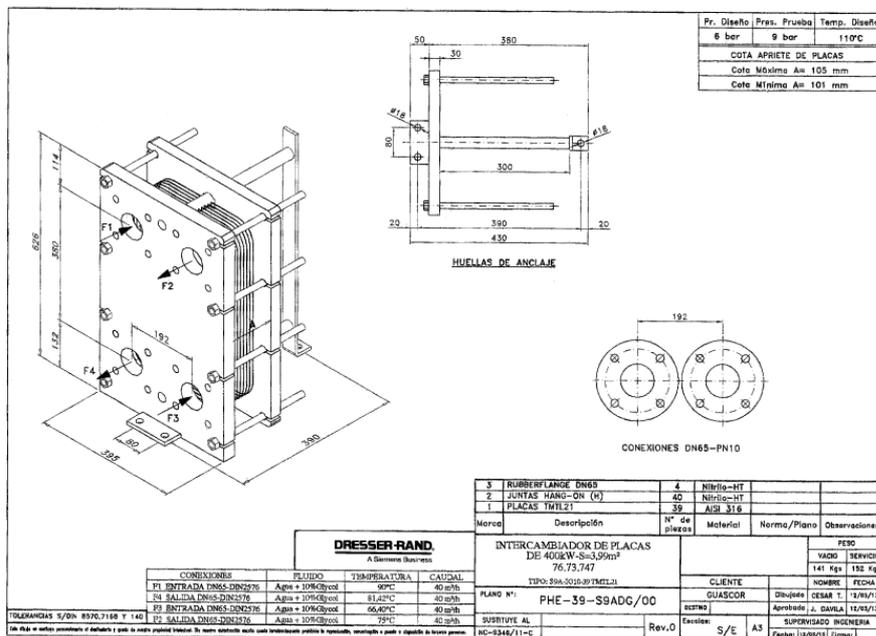


Fig. 6 Intercambiador de calor en el circuito principal



Las principales características del intercambiador se resumen en la Tabla 15:

Tabla 15 Características técnicas principales del intercambiador de placas

Parámetro	Cantidad / Descripción
Tipo de intercambiador	Placas desmontables
Superficie de intercambio	4,85 m ²
Presión máxima de operación	6 bar
Temperatura máxima de operación	110 °C
Fluido de operación	Agua + 10 % glicol
Caudal de diseño	40 m ³ /h (lado caliente y frío)
Temperatura de entrada (lado caliente)	90 °C
Temperatura de salida (lado frío)	75 °C
Pérdida de carga	0,4 bar

Nota. Adaptado del manual de instalación del motogenerador FGLD180

4.3.2 Recuperador de gases de escape

Se implementa un recuperador de gases de escape piro-tubular horizontal para aprovechar la energía térmica de los gases de combustión del motogenerador, en la Fig. 6 se muestra el diseño del recuperador.

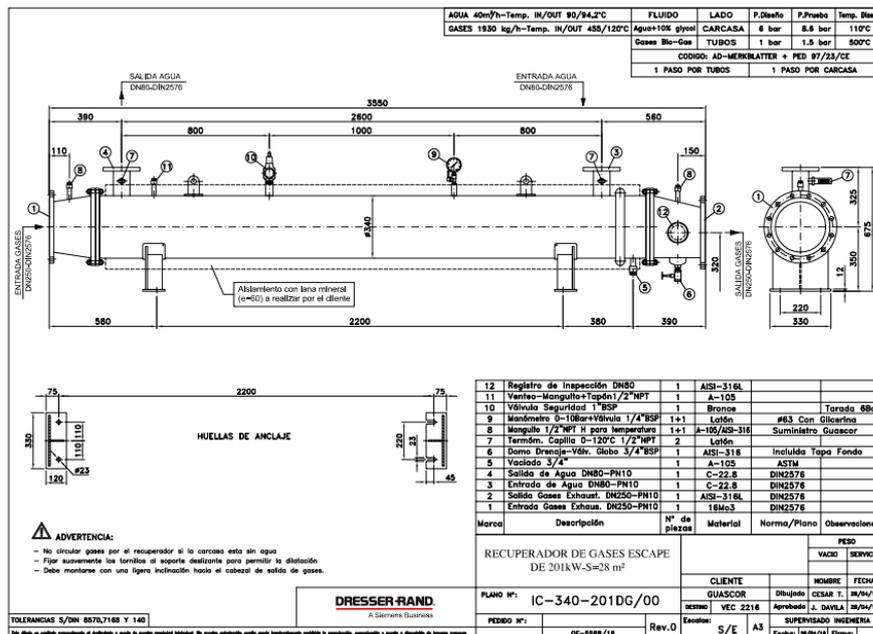


Fig. 7 Recuperador de gases de escape



Los gases circulan por los tubos interiores y el fluido de servicio (agua + 10% glicol) por la carcasa exterior, logrando una transferencia de calor eficiente.

El equipo opera con gases a 455 °C y un fluido de refrigeración entre 90 °C y 94,2 °C, recuperando hasta 201 kW de potencia térmica. Dispone de termómetros, manómetro, válvulas de seguridad y drenaje para control operativo, y está construido íntegramente en acero para resistencia a la corrosión. La energía recuperada se destina al calentamiento de lodos en el digestor anaerobio.

Las características técnicas principales se detallan en la Tabla 15:

Tabla 16 Características técnicas principales del recuperador de gases

Parámetro	Lado Carcasa (Agua + Glicol)	Lado Tubos (Gases de Escape/Biogás)
Fluido	Agua + 10% glicol	Gases de escape / Biogás
Caudal de diseño máximo	40 m ³ /h	Según balance
T de entrada/salida máxima	90 / 94,2 °C	455 / 120 °C
Presión de diseño	6 bar	1 bar
Temperatura de diseño	110 °C	550 °C
Área de transferencia térmica	28 m ²	—
Potencia térmica máxima recuperada	201 kW	—
Margen de seguridad mínimo	12 %	—

Nota. Adaptado del manual de instalación del motogenerador FGLD180

4.3.3 Reintegración del calor al sistema de calefacción existente

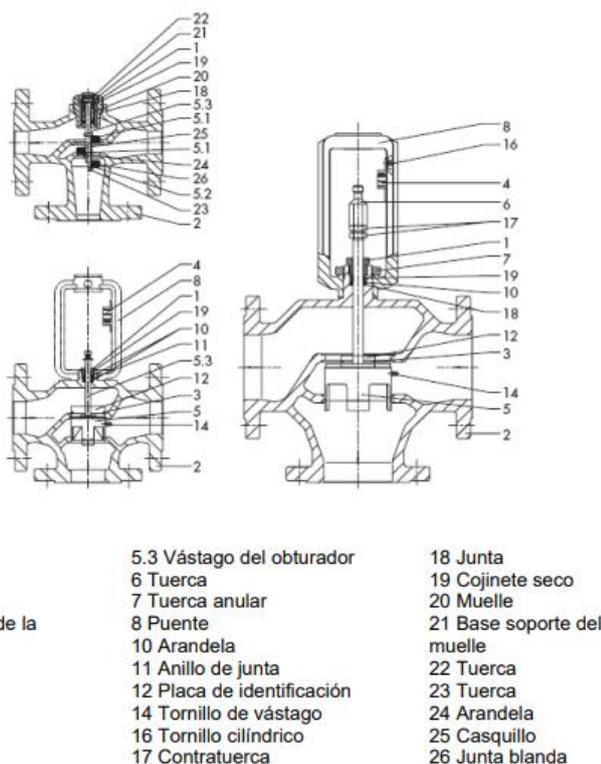
El aprovechamiento del calor residual, tanto del circuito de refrigeración del motor como del sistema de recuperación de gases de escape, se realiza mediante la conducción de agua caliente hacia el sistema de calefacción de lodos. Para la gestión y control de este flujo térmico se emplean válvulas de tres vías, las cuales permiten mezclar



corrientes de agua a diferentes temperaturas, alcanzando así una temperatura de consigna adecuada para el proceso de digestión anaerobia.

Estas válvulas funcionan principalmente como mezcladoras, aunque también pueden actuar como divisoras en caso de necesidad, por ejemplo, cuando no se dispone de recuperación de calor. Se instalan en el circuito principal de recuperación térmica, permitiendo dirigir el flujo de agua proveniente del motor y del recuperador de gases hacia el sistema de calefacción de lodos.

A continuación, en la Fig.8, se presenta el modelo de válvula seleccionada:



- | | | |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 Estopada | 5.3 Vástago del obturador | 18 Junta |
| 2 Cuerpo | 6 Tuerca | 19 Cojinete seco |
| 3 Pasador | 7 Tuerca anular | 20 Muelle |
| 4 Placa indicación de la carrera | 8 Puente | 21 Base soporte del muelle |
| 5 Obturador | 10 Arandela | 22 Tuerca |
| 5.1 Obturador, mezcladora | 11 Anillo de junta | 23 Tuerca |
| 5.2 Obturador, distribuidora | 12 Placa de identificación | 24 Arandela |
| | 14 Tornillo de vástago | 25 Casquillo |
| | 16 Tornillo cilíndrico | 26 Junta blanda |
| | 17 Contratuerca | |

Fig. 8 Válvula de tres vías DN65



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



La válvula DN65 está diseñada para soportar altas presiones y temperaturas, así como mezclas de agua con glicol, garantizando un control térmico en condiciones de operación exigentes.

Las principales características técnicas se resumen en la siguiente Tabla 17:

Tabla 17 Características técnicas principales de la válvula de tres vías DN65

Parámetro	Cantidad / Descripción
Tipo de válvula	Mezcladora de tres vías
Diámetro nominal (DN)	DN65
Presión nominal (PN)	16 bar
Temperatura de operación	-15 °C a +150 °C
Contenido máximo de glicol	50 %
Tiempo de recorrido del actuador	90 segundos
Potencia absorbida	3 VA

Nota. Adaptado del manual de instalación del motogenerador FGLD180

4.4 Potencial de Producción de Energía Eléctrica-Térmica

El sistema de cogeneración propuesto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra está diseñado para transformar el biogás generado en el digestor anaerobio en energía eléctrica y térmica.

La producción actual de biogás es de 23,15 Nm³/h, con una composición promedio de metano del 62 %, resultando en un poder calorífico inferior (PCI) estimado de 6,17 kWh/Nm³. El motogenerador seleccionado posee una potencia nominal de 255 kVA (equivalente a 204 kW de potencia activa), y requiere un caudal de biogás de 81 Nm³/h para operar a plena carga.

El cálculo de la producción de energía eléctrica y térmica se realiza aplicando las expresiones descritas en el Capítulo 3, considerando los rendimientos eléctricos y



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



térmicos obtenidos del balance térmico del motogenerador (Anexo F), correspondientes a un 41 % de rendimiento eléctrico y 48 % de recuperación térmica.

Con base en estos parámetros, se analizan dos escenarios de operación.

4.4.1 Escenario 1: Producción Actual (23,15 Nm³/h)

La producción de cogeneración, calculada en función de la operación del motogenerador con el biogás disponible, se detalla en la Tabla 18.

Tabla 18 Resultados de Producción Parcial

Parámetro	Valor
Producción de biogás	23,15 Nm ³ /h
Potencia eléctrica estimada	58,6 kW
Potencia térmica estimada	68,58 kWt

Nota. Autoría propia.

El motogenerador operaría aproximadamente al 29 % de su capacidad nominal sin considerar pérdidas de algún tipo.

4.4.2 Escenario 2: Operación a Plena Carga (81 Nm³/h)

La producción de cogeneración, calculada en función de la operación del motogenerador a plena carga, se detalla en la Tabla 19.

Tabla 19 Resultados de Producción A Plena Carga

Parámetro	Valor
Producción de biogás	81 Nm ³ /h
Potencia eléctrica estimada	204 kW
Potencia térmica estimada	239,89 kWt

Nota. Autoría propia.

En estas condiciones, el sistema operaría al 100 % de su capacidad nominal sin considerar pérdidas de algún tipo, optimizando el aprovechamiento del biogás disponible.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



El sistema de cogeneración permite usar el biogás que se genera en la planta. Con el caudal actual de 23,15 Nm³/h, se pueden producir aproximadamente 58,6 kW de electricidad y 68,58 kW de calor. Si el caudal aumenta a 81 Nm³/h, sería posible generar 204 kW de electricidad y 239,89 kW de calor. Esto ayudará a que la planta pueda cubrir parte de su necesidad de energía usando el biogás que produce.

Conclusiones

- El estudio del marco teórico determinó que la producción de biogás en la PTAR de Ibarra se basa en la digestión anaerobia de lodos, un método ampliamente utilizado. Además, se identificó que los motores de combustión interna con generadores eléctricos son la opción más viable para la cogeneración en esta planta, asegurando un aprovechamiento efectivo del biogás.
- El biogás producido alcanza un caudal promedio de 23,15 m³/h, con una composición de 62 % de metano (CH₄). A partir de esta composición, se determinó un Poder Calorífico Inferior (PCI) de 22,22 MJ/m³ y un Poder Calorífico Superior (PCS) de 24,68 MJ/m³. Estos valores confirman que el biogás generado posee las características necesarias para su aprovechamiento en sistemas de cogeneración.
- Con el caudal actual de 23,15 Nm³/h de biogás, se estima que se pueden generar aproximadamente 58,6 kW de electricidad y 68,58 kW de calor. Al incrementar el caudal a 81 Nm³/h, la planta podría producir 204 kW



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



eléctricos y 239,89 kW térmicos. Esto ayudará a que la planta pueda cubrir parte de su necesidad de energía usando el biogás que produce.

Recomendaciones

- Para futuros proyectos, se recomienda evaluar el potencial energético del lodo seco generado en el tratamiento de aguas residuales, con un rango aproximado de 50 000 a 80 000 kg/mes, como posible combustible para la generación eléctrica.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. E. Alférez Rivas and N. Nieves Pimiento, "Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado," *Caribeña de Ciencias Sociales*, no. junio, 2019.
- [2] A. K. Vargas, J. Calderón, D. Velásquez, M. Castro, and D. A. Núñez, "Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 28, no. 2, pp. 315-322, 2020.
- [3] J. B. Rojas, M. Á. I. Palazuelo, K. J. G. Tun, and B. S. Rangel, "Cogeneración de energía en el tratamiento de aguas residuales Energy cogeneration in wastewater treatment," *Temas de Ciencia y Tecnología*, vol. 27, no. 79, 2023.
- [4] S. González Barredo, "Diseño de una central de cogeneración y district heating alimentada por combustibles obtenidos a partir de residuos sólidos urbanos," 2021.
- [5] A. Domínguez Rodríguez, "Integración energética en EDAR mediante simulación de un ciclo térmico de aprovechamiento de biogás," 2023.
- [6] D. M. Chávez, J. A. Ramón, and O. M. D. Vera, "VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DEL BIOGÁS EN UN RELLENO SANITARIO," *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, vol. 9, no. 2, 2019.
- [7] M. Las Heras Campos, "Redes urbanas de calor con biomasa. El caso de Soria," 2020.
- [8] J. B. i Martí, "La gestión de los servicios públicos y la cocreación de la ciudad."
- [9] M. V. Fonseca, "Aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento de esgotos sanitários: estudo de caso da ETE Brasília Sul com enfoque na digestão anaeróbia dos lodos gerados," 2019.
- [10] M. Bavaresco, "Análise do potencial de geração de energia elétrica oriundo do biogás gerado a partir dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul-RS."
- [11] K. G. Espinosa Mantilla, "Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable: análisis del potencial de la ciudad de Quito," Quito, EC: Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, 2021.
- [12] N. Mancilla-Duarte and K. L. Molina-Rodríguez, "Modelado del proceso de lodos activados para la remoción de materia orgánica, de la planta de tratamiento de aguas residuales Salitre, mediante el uso del software Lynx ASM1," 2021.
- [13] D. J. B. ORTIZ, "PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN NARANJITO," UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, 2023.
- [14] L. D. Ayala Itas, "Estudio de Pre-Factibilidad para la implementación de una micro central hidroeléctrica utilizando el caudal de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), Ibarra," 2021.
- [15] M. Y. S. Sigüencia, J. Solano-Peláez, and J. A. P. Camacho, "Análisis sobre la gestión de aguas residuales en la ciudad de Cuenca: Caso ETAPA-EP," *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, vol. 7, no. 8, pp. 513-532, 2022.



- [16] J. Bran More and J. C. Manturano Taquiri, "Implementación de una planta de cogeneración Para reducir los costos de consumo de energía eléctrica en el centro comercial la Rambla San Borja," 2020.
- [17] R. A. Parra Huertas, "Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria," *Producción+ limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142-159, 2015.
- [18] S. F. Aquino, J. C. Araújo, F. Passos, T. P. Curtis, and E. Foresti, "Capítulo 3 Fundamentos del tratamiento anaeróbico de aguas residuales," 2024.
- [19] J. Mamani *et al.*, "Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas," *Agroindustrial Science*, vol. 11, no. 2, pp. 239-247, 2021.
- [20] G. Espitia Rincón and N. Ruiz Padilla, "Desarrollo de una propuesta de digestión anaerobia en dos fases para la obtención de biogás mediante residuos cítricos," 2022.
- [21] L. C. M. Rosero, "Biogás: Una Fuente de Energía Sostenible para un Futuro Más Verde," *EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria*, vol. 2, no. 2, pp. 6-10, 2023.
- [22] M. Y. Huaraya Huahualuque and T. C. Sancho Moya, "Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria," 2020.
- [23] I. Atienza Lama, "Aprovechamiento energético de los residuos agroalimentarios en la región de Huelva," 2024.
- [24] M. J. Jaramillo Gutiérrez and D. F. Tamayo Mateus, "Evaluación de la producción de biogás a partir de lodos residuales recolectados de una PTAR, en un reactor de la Pontificia Universidad Javeriana," 2019.
- [25] G. A. Montenegro Ortiz and M. A. Rojas Chuquillanqui, "Efecto de la temperatura y el tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás en una planta piloto de digestión anaerobia," 2019.
- [26] L. K. Castro Lopez, "Evaluación del pretratamiento térmico de residuos alimenticios, para la producción de biogás mediante digestión anaerobia," 2019.
- [27] M. Simón Amorós, "Estudio Experimental y Viabilidad Económica de la Digestión Anaerobia de Residuos Agropecuarios," 2024.
- [28] A. A. Francisco Rodríguez, "Producción de biogás a partir de residuos generados en el sector hotelero para su autoabastecimiento desde el punto de vista energético," 2019.
- [29] D. Bennardi, "Digestión Anaeróbica. Obtención de Biogás," ed, 2019.
- [30] D. O. Bennardi, "DIGESTIÓN ANAERÓBICA: OBTENCIÓN DE BIOGÁS Segunda edición."
- [31] M. Zhou *et al.*, "Methanogenic activity and microbial communities characteristics in dry and wet anaerobic digestion sludges from swine manure," *Biochemical engineering journal*, vol. 152, p. 107390, 2019.
- [32] A. Pomberger *et al.*, "A continuous stirred-tank reactor (CSTR) cascade for handling solid-containing photochemical reactions," *Organic process research & development*, vol. 23, no. 12, pp. 2699-2706, 2019.



- [33] M. Mainardis, M. Buttazzoni, and D. Goi, "Up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) technology for energy recovery: a review on state-of-the-art and recent technological advances," *Bioengineering*, vol. 7, no. 2, p. 43, 2020.
- [34] S. E. Nayono and D. Purwantoro, "Potential Use of Locally Available Filter Media in a UAFB Reactor Coupled with Natural Treatment in Soybean Industry Wastewater Treatment," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 601, no. 1: IOP Publishing, p. 012007.
- [35] P. L. Lau and A. P. Trzcinski, "A review of modified and hybrid anaerobic baffled reactors for municipal wastewater treatment with a focus on emerging contaminants," *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2024.
- [36] Z. Aslam *et al.*, "Recent developments in moving bed biofilm reactor (MBBR) for the treatment of phenolic wastewater-A review," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, p. 105517, 2024.
- [37] N. Carreras, "Tipos de digestores, selección en función del residuo en Energía de la Biomasa," 2024.
- [38] C. A. Ibarra Ariza, "Estudio de la norma ISO 14001: 2015 en un sistema de generación de biogás a partir de desechos orgánicos," 2022.
- [39] K. Aboudi, L. A. Fernández-Güelfo, C. J. Álvarez-Gallego, and L. I. Romero-García, "Biogas, biohydrogen, and polyhydroxyalkanoates production from organic waste in the circular economy context," in *Sustainable biofuels*: Elsevier, 2021, pp. 305-343.
- [40] A. F. Ladino Cardenas, "Revisión bibliográfica: HCCI" El futuro de los motores a combustión interna", " 2020.
- [41] M. Ortiz Mora, "Estudio del estado del arte de la tecnología de recarga autónoma en vehículos eléctricos mediante micro-turbinas de gas," 2020.
- [42] C. Cervantes, J. Mora, C. Valdes, and A. González, "Celdas de combustible SOFC para Aprovechamiento de Gas Natural y Biogás," *Revista EJE-Engineering Journal ECCI*, vol. 2, no. 1, pp. 35-48, 2022.
- [43] J. E. Z. Castillo and R. A. R. Alvarado, "BIOGÁS Y LAS MÁQUINAS DE VAPOR BIOGAS AND STEAM ENGINES," in *MEMORIAS CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA DE LA FÍSICA*, p. 77.
- [44] A. Jerez Cañadas, "Planta para la digestión anaerobia para la obtención de biogas para planta de ciclo combinado," Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [45] C. A. A.-E. (UTE), "Memoria descriptiva de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra," Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra (EMAPA-I), Ibarra, Ecuador, 2014
- [46] C. A. A. Eduinter, "'Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Cantón de Ibarra (PTAR Ibarra)'," in "FuturEnviro Magazine," EMAPA-I (Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra), Ecuador, 2017. [Online]. Available: https://img.interempresas.net/docs-futur/EDAR_Ibarra.pdf



- [47] C. M. Corsino Cortez and K. L. Delgado Pantoja, "Generación de energía eléctrica a partir de lodos de aguas residuales de la PTAR San Pedro de Ancón, Lima 2019," 2019.
- [48] A. Álvarez, "Balance energético y cálculo de pausas," 2023.
- [49] E. N. Andrade Estévez and Á. A. Moposita Baño, "Análisis de la eficiencia del biogás generado por el biodigestor Solar Cities en el campus CEASA, Período 2021-2022," 2022.
- [50] O. O. S. Varela, "Viabilidad de la utilización del biogás para generación de energía eléctrica como autoconsumo en la planta de tratamiento de aguas residuales de Juticalpa, Olancho," Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, 2023.



Anexos

Anexo A Placa de Datos de la Caldera





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Anexo B Placa de Datos del Intercambiador de Calor Tipo Espiral



Seducal

Técnica para el ahorro de energía

Txorierrri Etorbidea 46, pab. 12 P
 Apartado Postal 22
 E-48150 Sondika (Bizkaia)
 www.seducal.com
 Tel.: +34 914 710 460
 E-mail: sedical@seducal.com

Modelo intercambiador	SONSPV 500 Ø1000	
Fabricación: Número/año	SP 10181 / 2016	
TAG	YI - 745 - 01	
Superficie de transferencia	m ²	11,6
Potencia nominal	kW	307
Caudal	kg/h	54640 - 65194
Temp. mínima trabajo	°C	0
Temp. máxima trabajo	°C	100
Presión máxima de trabajo	bar	3
	bar	3
Presión máx. diferencial	bar	3
	bar	3
Volumen	l	109
	l	141

Fabricado de acuerdo a la
 OEP 97/23/CE artículo 3.3.

IMPORTANTE

Al puesta en marcha del intercambiador
 debe realizarse sin golpes de ariete y con
 las válvulas cerradas.

La presión máxima de trabajo no se debe
 exceder en ningún momento.

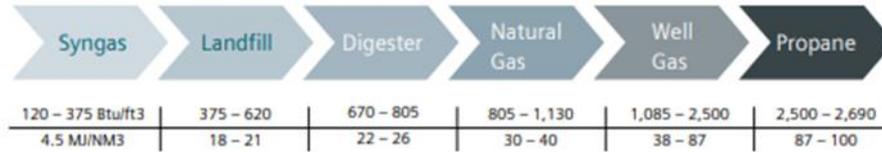


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Anexo C Catalogo de motogeneradores Siemens

Siemens engines fuel flexibility



Natural gas ²⁾ fueled engines & gen-sets - MN=75 ¹⁾

Model SGE-FR ³⁾	Cylinders	Disp. (l)	(kWb)		(kWe)	
			1,500 rpm	1,800 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm
SGE-18FR	6L	18	150	180	142	171
SGE-24FR	8L	24	200	238	191	226

Model SGE-FL ³⁾	Cylinders	Disp. (l)	(kWb)		(kWe)		
			1,500 rpm	1,800 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm	
SGE-18FL	55	6L	18	275	300	264	287
SGE-24FL	55	8L	24	360	400	347	385
SGE-36FL	55	12V	36	550	600	529	577
SGE-48FL	55	16V	48	725	792	703	761

Model SGE-SL-SM	Cylinders	Disp. (l)	(kWb)			(kWe)		
			1,200 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm	1,200 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm
SGE-18SL	6L	18	251	314	350	240	304	336
SGE-24SL	8L	24	335	419	453	320	405	436
SGE-36SL	12V	36	502	630	700	482	609	678
SGE-48SL	16V	48	670	838	906	642	812	880
SGE-56SL	16V	56	788	985	1,067	759	957	1,028
SGE-56SM	16V	56	-	1,055	1,100	-	1,025	1,065

Model SGE-HM	Cylinders	Disp. (l)	(kWb)			(kWe)		
			1,200 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm	1,200 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm
SGE-24HM	8L	24	-	520	520	-	500	500
SGE-42HM	12V	42	-	1,040	1,040	-	1,011	1,011
SGE-56HM	16V	56	1,040	1,240	1,350	1,007	1,200	1,308

Model SGE-EM	Cylinders	Disp. (l)	(kWb)			(kWe)		
			1,200 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm	1,200 rpm	1,500 rpm	1,800 rpm
SGE-86EM	12V	86	-	2,065	-	-	2,012	-

1) For other MN (methane number) contact the Sales team
 2) According to fuel specification IC-G-D-30-002
 3) FR and FL series not available in USA market



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Anexo D Placa de especificaciones motogenerador FGLD180



<u>DRESSER-RAND.</u>			
Plant Instalación	ACCIONA (ECUADOR)		
Aplicación Aplicación	FGLD180-255 KVA-460Vac - 60Hz		
VEC	2216	Ref. 2.002216.020	Date Fecha 06-06-2016
Generator Generador	460/230 Vac	255 KVA	60 Hz
Control Voltage Tensión Control	230 Vac	24 Vdc	
DRESSER-RAND Guascor Engines and Gensets Barrio Oikia, 44 - 20750 Zumaia (Guipuzcoa) SPAIN +34 943 865 200 / www.dresser-rand.com			



Anexo E Placa de especificaciones intercambiador de placas



TERMOJET, S.A. - www.termojet.com Pho.+ 34986487267- FAX+ 34986487336		CE PED 97/23CE
PLATE HEAT EXCHANGER / INTERCAMBIADOR DE PLACAS		
Nº FABR. / SERIAL Nº: 5580-16	AÑO / YEAR: 2016	FECHA PRB. / TEST PRESS.: 06-05-16
CATEGORIA / CLASS: AP3	MODULO / MODULE: ART. 3	TIPO / TYPE: S9A-1610-47
FLUIDO CIRCULANTE: / CIRCULATING FLUID:	HOT SIDE: AGUA + GLYCOL	COLD SIDE: AGUA + GLYCOL
CAUDAL: / FLOW RATE:	40 m ³ /h	40 m ³ /h
PRESION DE DISEÑO: / DESIGN PRESSURE:	6 bar	6 bar
PRESION PRUEBA: / TEST PRESSURE:	9 bar	9 bar
TEMPERATURA DE DISEÑO: / DESIGN TEMPERATURE:	110 °C	SUPERFICIE: / SURFACE: 4.85 m ²
<p style="text-align: center;">Apriete de Placas MAXIMUM: 127 mm. MINIMUM: 122 mm. Tightening Measurement Plates</p>		
INSPECCION: / CLASIFICACION: T.J.	PESO: / WEIGHT: 136	
Design & Manufactured by TERMOJET		



Anexo F Balance térmico Motogeneradores Siemens



Siemens introduces the SGE-42HM gas engine for natural gas and biogas fuels. The new engine completes the high-efficiency Siemens H series engine family.

Benefits

- Continuous service solutions at high efficiencies
- A suitable solution for cogeneration projects, such as district heating and industries with high thermal demand

Model: SGE-42HM		
12V, 50Hz, 60 Hz	1,500 rpm	1,800 rpm
Displacement (l)	42	42
Bore (mm/inches)	160/6.30	160/6.30
Stroke (mm/inches)	175/6.89	175/6.89
Compression ratio	12:1	12:1
Weight (kg/lb)	6,250/13,779	6,250/13,779
Exhaust temperature(°C/°F)	420/785	455/849
Mechanical power (kW/bhp)	1,040/1,395	1,040/1,395
Electrical power (kW/bhp)	1,007/1,351	1,007/1,351
BMEP (bar/psi)	19.8/287	16.5/239
Mechanical efficiency (%)	44.2	42.5
Electrical efficiency (%)	43.0	41.2
Thermal efficiency HT (%)	46.4	48.4
Global efficiency (%)	89.4	89.6
NOx emissions (mg/Nm ³ g/bhp.hr)	500/1.1	500/1.1