

**Universidad Católica de Santa María**  
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica  
Eléctrica y Mecatrónica**



**“EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN  
INTERNA OTTO USANDO COMO COMBUSTIBLE BIOMETANO  
PRESURIZADO EN UN GENERADOR ELÉCTRICO”**

Tesis presentada por la Bachiller:  
**Apaza Katata, Mailson Thomas**  
para optar el Título Profesional de  
**Ingeniero Mecánico**

Asesor:  
**Mg. Castro Valdivia, Jorge Luis**

**Arequipa - Perú  
2021**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA**  
**TITULACIÓN CON TESIS**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE PROYECTO / PLAN**

Arequipa, 29 de Agosto del 2020

Dictamen: 001191-C-EPIMMEM-2020

Visto el proyecto / plan del expediente 001191, presentado por:

2010202311 - APAZA KATATA MAILSON THOMAS

Titulado:

**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO USANDO COMO  
COMBUSTIBLE BIOMETANO PREZURIZADO EN UN GENERADOR ELÉCTRICO**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

1530 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO  
DICTAMINADOR



1893 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS  
DICTAMINADOR



## Dedicatoria

A Dios, que día a día me ayuda a encontrar el sentido a la vida.

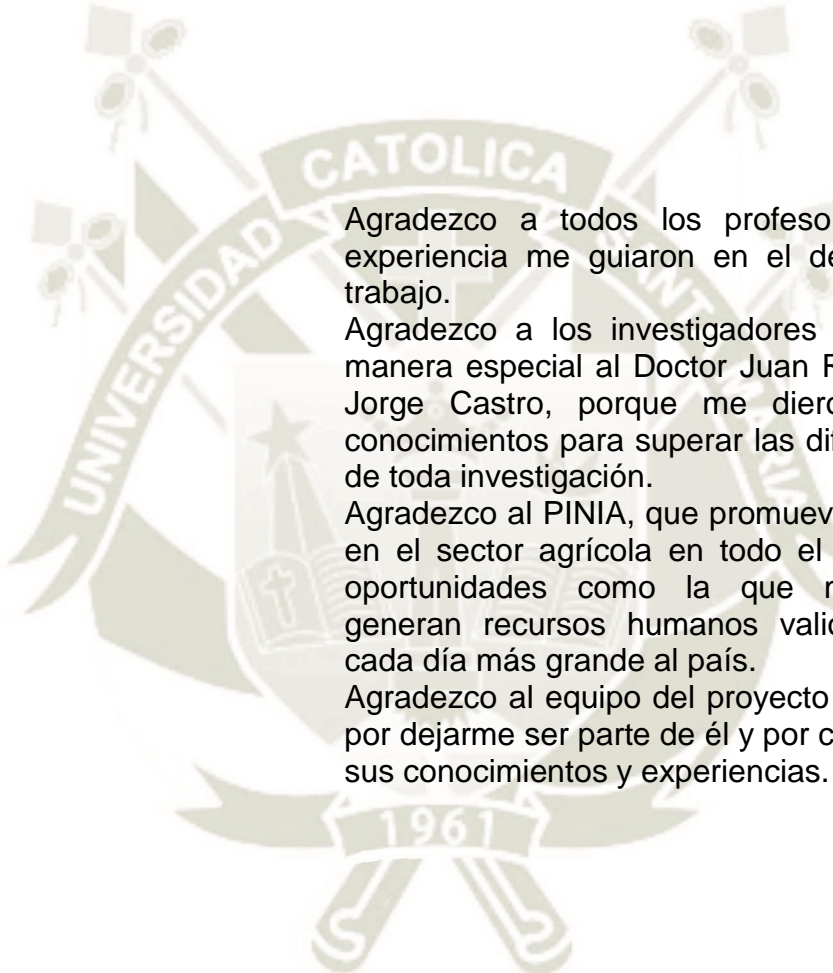
A María madre de Dios, que me acompaña en cada escalón hacia el cielo.

A mis padres Dora y Tomas, por ser las personas que más amo y que siempre me han apoyado en todo momento y circunstancia.

A mis hermanos Carol y Sebastián, que hacen que mis días sean mejores y cada vez más felices.

A Dulce, que me apoyó en todo este tiempo así como en todos los proyectos que emprendo.

## Agradecimientos



Agradezco a todos los profesores que con su experiencia me guiaron en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a los investigadores del proyecto, de manera especial al Doctor Juan Reategui y al Ing. Jorge Castro, porque me dieron su tiempo y conocimientos para superar las dificultades propias de toda investigación.

Agradezco al PINIA, que promueve la investigación en el sector agrícola en todo el Perú, y que con oportunidades como la que me concedieron, generan recursos humanos valiosos, que harán cada día más grande al país.

Agradezco al equipo del proyecto de investigación, por dejarme ser parte de él y por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias.

## RESUMEN

El presente trabajo que se titula “Evaluación de desempeño de un motor de combustión interna otto usando como combustible biometano presurizado en un generador eléctrico” tuvo como finalidad implementar un kit de conversión de Gasolina a GNV en un generador eléctrico de 7.5 KW para realizar diferentes evaluaciones dentro del motor y obtener resultados del desempeño del motor cuando en un ámbito técnico y económico que nos muestre las ventajas o desventajas del uso de Biometano.

Para las pruebas de evaluación se aplicaron diferentes instrumentos que nos ayudaron en la medición de parámetros, desde un analizador de gases que nos permite medir las emisiones de gases de escape del motor cuando fue usado con gasolina o biometano, también fue necesario instrumentos como una balanza y un flujómetro para la medición del flujo de combustible, se construyó un módulo de focos para el consumo y medición de la potencia proporcionada por el motor con el uso del combustible, se usó también pistolas de temperatura para evaluar parámetros energéticos; esto nos permitió recolectar información para la correcta evaluación del desempeño del motor.

Los resultados en cuanto a Potencia muestran que el biometano tiene una baja potencia comparándola con el uso de Gasolina y GLP, esto puede mejorarse aumentando la eficiencia de purificación del biometano, que actualmente lo tenemos en 75.5% de CH<sub>4</sub>; también los niveles de emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y HC son bajos respecto a los mostrados por la gasolina y GLP; importante resaltar que el Biometano tiene un costo del 62% menos respecto a la gasolina y del 45% menos respecto al GLP.

## PALABRAS CLAVES

Biometano, energía, generador, Gas Licuado de Petroleo GLP.

## ABSTRACT

This work entitled "Performance evaluation of an otto internal combustion engine using pressurized biomethane as fuel in an electric generator" was to implement a Gasoline to NGV conversion kit in a 7.5 KW electric generator to carry out different evaluations within the engine and obtain engine performance results when in a technical and economic field that shows us the advantages or disadvantages of using Biomethane.

For the evaluation tests, different instruments were applied that helped us in the measurement of parameters, from a gas analyzer that allows us to measure the exhaust gas emissions of the engine when it was used with gasoline or biomethane, instruments such as a balance were also necessary. and a flow meter for the measurement of fuel flow, a module of lights was built for the consumption and measurement of the power provided by the engine with the use of fuel, temperature guns were also used to evaluate energy parameters; This allowed us to collect information for the correct evaluation of the performance of the engine.

The results regarding Potency show that biomethane has a low potency compared to the use of Gasoline and LPG. This can be improved by increasing the purification efficiency of biomethane, which currently we have at 75.5% of CH<sub>4</sub>; Also the levels of CO, CO<sub>2</sub> and HC emissions are low compared with the gasoline and LPG; It is important to note that Biomethane has a cost of 62% less than gasoline and 45% less than LPG.

## KEYWORDS

Biomethane, energy, generator, Liquefied Petroleum Gas LPG.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la presente Tesis Proyecto de Evaluación de desempeño de un motor de combustión interna Otto usando como combustible biometano presurizado en un generador eléctrico, consta de cinco capítulos como lo describiremos a continuación:

- 1° Planteamiento del problema e introducción
- 2° Marco teórico
- 3° Métodos para la evaluación de rendimiento del motor de combustión interna Otto
- 4° Resultados y discusiones
- 5° Conclusiones

El Primer Capítulo está relacionado con el planteamiento del problema, los objetivos, antecedentes en el desarrollo del tema.

El Segundo Capítulo desarrollamos el marco teórico correspondiente a toda la base para el sustento de la ingeniería del proyecto y delineando los conceptos básicos de la combustión y motores, así como conceptos del biogás, biodigestores y el impacto ambiental que se reconoce en el uso de biometano.

El Tercer Capítulo son los diferentes métodos planteados en la presente Tesis correspondientes a la evaluación del rendimiento del motor Otto.

El Cuarto Capítulo se hace una evaluación a los resultados y se forma discusión en cada prueba de ensayo realizada.

El Quinto Capítulo son las conclusiones.

## INDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>vii</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENUNCIADO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	3
1.4.2. OBJETIVO SECUNDARIO.....	3
1.5. ALCANCES.....	3
1.6. TIPO DE INVESTIGACIÓN: CAMPO, ÁREA, LÍNEA.....	4
1.7. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.8. ANTECEDENTES EN LA GENERACIÓN Y USO DE BIOGÁS.....	5
1.8.1. FUNDO AMERICA - AREQUIPA PERÚ.....	5
1.8.2. GRANJA POZO VERDE - CALI COLOMBIA.....	6
1.8.3. FUNDO SAN ISIDRO CHACHAPOYAS PERÚ.....	8
1.8.4. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO BÁSICO DE EQUIPO DE PURIFICACIÓN UTILIZANDO SCRUBBER PARA MEJORAR EL BIOGÁS REDUCIENDO SU CONTENIDO DE DIÓXIDO DE CARBONO EN EL DISTRITO DE MAJES-AREQUIPA.....	9
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>10</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
2.1. MARCO CONCEPTUAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMETANO.....	11
2.1.1. BIOMASA COMO BIOENERGÍA.....	11
2.1.2. BIOGÁS.....	14
2.1.3. REACTORES ANAERÓBICOS.....	21
2.1.4. BIODIGESTOR HPTC.....	30
2.1.5. BIOMETANO.....	33
2.1.6. COMPRESIÓN DE GASES.....	39
2.2. MARCO CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DE MCI.....	43
2.2.1. TEORÍA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	43
2.2.2. PARAMETROS DE DESEMPEÑO Y EFICIENCIA EN MCI.....	45
2.2.3. ASPECTOS TÉCNICOS MCI A BIOGÁS/BIOMETANO.....	53
2.2.4. EMISIONES DE MCI.....	57
2.2.5. COMBUSTIBLES USADO EN MCI.....	60
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>68</b>
<b>3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO.....</b>	<b>68</b>
3.1. APARATO EXPERIMENTAL.....	68
3.1.1. GRUPO MOTOR GENERADOR.....	68
3.1.2. COMBUSTIBLES A USAR.....	71
3.2. METODOS Y MATERIALES DE ENSAYO.....	75

3.2.1.	RENDIMIENTO DE MOTORES.....	75
3.2.2.	MEDICIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE.....	76
3.2.3.	ANALIZADOR DE EMISIONES.....	78
3.2.4.	TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE.....	78
3.3.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO.....	79
3.3.1.	CONSUMO ESPECÍFICO DEL COMBUSTIBLE Y SU EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA.....	79
3.3.2.	CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES.....	80
3.3.3.	ANÁLISIS ENERGÉTICO.....	87
3.3.4.	ANÁLISIS EXERGÉTICO.....	91
3.3.5.	ANALISIS DE COSTOS.....	93
	<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>94</b>
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>94</b>
4.1.	POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA DEL MOTOR GENERADOR.....	94
4.2.	COMPARACIÓN ENTRE CONSUMOS ESPECÍFICO Y EFICIENCIA.....	95
4.3.	RESULTADO DE EMISIONES.....	98
4.3.1.	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	98
4.3.2.	EMISIONES DE CO.....	99
4.3.3.	EMISIONES DE HC.....	100
4.3.4.	EMISIONES DE O <sub>2</sub> .....	102
4.4.	ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES.....	103
4.4.1.	DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA EN LOS COMBUSTIBLES.....	104
4.5.	ANÁLISIS DE EXERGÍA.....	105
4.5.1.	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EXERGÉTICA.....	106
4.5.2.	ANÁLISIS DE LA EXERGIA EN PARTES DEL SISTEMA.....	106
4.6.	ANÁLISIS DE COSTE POR ENERGÍA DE CADA COMBUSTIBLE.....	110
4.7.	TEMPERATURAS EN LOS GASES DE ESCAPE.....	112
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>114</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>117</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>124</b>

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Características del Biogás.....	15
Tabla 2: Consumo y eficiencia de artefactos a biogás. ....	21
Tabla 3: Valores PME efectivos .....	47
Tabla 4: Densidades de combustibles líquidos a 15°C y viscosidad 40°C .....	62
Tabla 5: Propiedades de algunos combustibles .....	63
Tabla 6: Propiedades de algunos combustibles .....	64
Tabla 7: Composición de biogás derivado de diferentes fuentes .....	66
Tabla 8: Especificaciones técnicas Gasolina 90 octanos .....	67
Tabla 9: Características del Grupo Motor-Generador.....	69
Tabla 10: Propiedades Físico-químicas Gasolina y Etanol .....	71
Tabla 11: Propiedades del GLP .....	72
Tabla 12: Composición de Biometano - Fundo de Majes UCSM .....	74
Tabla 13: Características generales de los componentes del Biometano .....	75
Tabla 14: Densidad de la mezcla Gasolina y Etanol .....	80
Tabla 15: Densidad GLP .....	81
Tabla 16: Densidad Biometano .....	81
Tabla 17: Poder calorífico de la mezcla Gasolina y Etanol .....	82
Tabla 18: Poder calorífico del GLP .....	82
Tabla 19: Poder Calorífico del Biometano.....	82
Tabla 20: Porcentaje en masa de la mezcla Gasolina y Etanol .....	83
Tabla 21: Porcentaje en masa de la mezcla Gasolina y Etanol .....	91
Tabla 22: Porcentaje en masa de la mezcla Gasolina y Etanol .....	92
Tabla 23: Datos de la potencia generada.....	94
Tabla 24: Datos del consumo específico.....	96
Tabla 25: Datos de la eficiencia global.....	97
Tabla 26: Datos de las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	98
Tabla 27: Datos de las emisiones de CO .....	100
Tabla 28: Datos de emisiones HC.....	101
Tabla 29: Datos de las emisiones O <sub>2</sub> .....	102
Tabla 30: Tabla de precios de combustibles .....	110
Tabla 31: Temperaturas en los gases de escape de los ensayos.....	112

### INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Uso de biogás en Fundo América .....	6
Figura 2: Motores Blackstone y Perkins .....	7
Figura 3: Generador Eléctrico 1 kW .....	9
Figura 4: Etapas de la digestión anaeróbica. ....	19
Figura 5: Biodigestores Batch. ....	26
Figura 6: Biodigestores de baja, media y alta tecnología respectivamente.....	28
Figura 7: Equipamiento e instalación del biodigestor Empresa Ecoalia en Burgos –....	32
Figura 8: Tecnologías para la eliminación de sulfuro de Hidrógeno.....	37
Figura 9: La transmisión de fuerzas en el principio de Pascal. ....	40
Figura 10: Ciclo Otto .....	44
Figura 11: Desplazamiento del cilindro en un motor .....	48
Figura 12: Diferentes avances de encendido y presión en la cámara de combustión...	50
Figura 13: Variación del punto de avance de encendido según la velocidad del motor	51
Figura 14: Comportamiento de la presión del motor según el ángulo de encendido....	52
Figura 15: Relación entre los rendimientos indicados y térmico y el coeficiente .....	52
Figura 16: Mezclador Venturi con suministro de gas.....	55
Figura 17: Reducción de emisiones de biometano comparando diésel / gasolina .....	58
Figura 18: Generador GENERAC GP 7500E .....	68
Figura 19: Implementación del Kit de Gas Naturalv .....	70
Figura 20: Implementación del Kit de GLP .....	70
Figura 21: Proceso de obtención de biometano Majes .....	74
Figura 22: Modulo de Focos.....	76
Figura 23: Flujómetro .....	77
Figura 24: Balanza para medir el peso que se consume por minuto .....	77
Figura 25: Analizador de gases.....	78
Figura 26: Pirómetro.....	78
Figura 27: Volumen de Control del Motor.....	79
Figura 28: Gráfico de la potencia generada .....	95
Figura 29: Grafico del consumo especifico .....	96
Figura 30: Gráfico de la eficiencia global .....	97
Figura 31: Gráfico de las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	99
Figura 32: Gráfico de las emisiones de CO .....	100
Figura 33: Gráfico de emisiones HC .....	101
Figura 34: Gráfico de las emisiones O <sub>2</sub> .....	102
Figura 35: La energía del combustible utilizado en los ensayos. ....	103
Figura 36: Distribución de Energía .....	104
Figura 37: Exergía de combustible.....	105
Figura 38: Eficiencia Exergetica del motor .....	106
Figura 39: Exergías el sistema con gasolina .....	107
Figura 40: Exergías el sistema con gasolina tipo Grassmann.....	107
Figura 41: Exergías el sistema con GLP. ....	108
Figura 42: Exergías el sistema con GLP Grassmann.....	109
Figura 43: Exergías del sistema con Biometano. ....	109
Figura 44: Exergías del sistema con biometano. ....	110

Figura 45: Costo en R \$ / kWh de los combustibles utilizados en los ensayos ..... 111  
Figura 46: Eficiencia..... 112



## **CAPÍTULO 1**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. ENUNCIADO DEL PROBLEMA**

“EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO USANDO COMO COMBUSTIBLE BIOMETANO PRESURIZADO EN UN GENERADOR ELÉCTRICO”

#### **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En todo el mundo, el gas natural renovable está dominado por el biometano, que puede generarse a partir de materiales orgánicos y residuos de la agricultura, la producción de alimentos y el procesamiento de residuos. “Los principales países productores de biometano incluyen Alemania, el Reino Unido, Suecia, Francia y los Estados Unidos, y muchos otros planean usar el gas renovable más ampliamente. Un informe de 2017 sugiere que el gas natural renovable podría cubrir el 76% de la demanda de gas natural de Europa para 2050” (McCabe, B., 2018).

“En Europa, el número de plantas de biometano ha aumentado rápidamente en los últimos años, de 187 plantas en 2011 a un total de 540 plantas en 2017. El número de plantas de biometano en Francia aumentó en 18 el 2017, haciendo un total de 44 plantas de biometano francesas. Menos de un año después, en el tercer trimestre de 2018, se informó de un total de hasta 67 plantas de biometano. Aunque el mercado de biometano no creció en Alemania en 2017, Alemania todavía tiene, con mucho, el mayor número de plantas de biometano (195), seguido por el Reino Unido con 92 plantas de biometano (ver Figura UE-13). Sin embargo, en términos del número de plantas por millón de cabezas de población, Suecia, Luxemburgo e Islandia encabezan la lista” (EBA, 2018).

“La tasa de aumento en el número de plantas europeas de biometano de 2016 a 2017 fue la mitad que entre 2014 y 2015, pero la producción de biometano continuó creciendo, aumentando un 12% en 2017. Para el biometano y el biogás, existe una tendencia hacia Instalaciones más grandes. En 2017 se alcanzó un total de 19,352 GWh o 1.94 bcm” (EBA, 2018).

Hay dos formas principales de suministrar biometano a los vehículos: “La Primera son estaciones de servicio minoristas dedicadas que solo suministran biometano (comprimido o licuado), que a menudo proviene de una planta cercana o se envía en forma licuada (similar al GNL); La segunda son estaciones de combustible que están conectadas a la red de gas y ofrecen gas natural mezclado con biometano. Por lo cual, de un total de 343 millones de vehículos de carretera en Europa, solo 1.2 millones funcionaron con gas natural (y biometano) en 2014, lo que equivale al 0.7% del mercado total de vehículos” (EBA,2016).

“Haciendo un balance general, en toda América aún no se cuenta con este uso masivo del biogás, ni con la cultura de disponer correctamente los residuos (salvo en contadas regiones del continente), pero si se han comenzado a desarrollar proyectos a pequeña escala que permita que poblaciones necesitadas de energía, se vean beneficiadas con este proceso biológico de conversión de biomasa” (Aparicio, A., 2015).

Respecto al estado actual del biometano nos dice Hidalgo, D (2019) “En América Central y del Sur, Brasil está tomando medidas regulatorias para explotar su enorme potencial.”; y en otros países de América Latina como Argentina entre otros, nos mencionan FAO (2019a) “Las barreras que enfrenta la incorporación de biometano a la red de gas natural de la Argentina son las mismas que presenta la producción y uso de biogás en general: barreras de orden tecnológico, económico y normativo.”

### 1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema central es el escaso conocimiento tecnológico en Perú sobre la producción y uso de biometano presurizado como combustible renovable en equipos con motores a combustión interna en el sector agrícola.

### 1.4. OBJETIVOS

#### 1.4.1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Evaluación técnica en el uso de Biometano presurizado a 200 bar en un Grupo electrógeno estacionario de 7.5 KW.

#### 1.4.2. OBJETIVO SECUNDARIO

- Evaluación técnica comparativa entre diferentes combustibles respecto a su potencia, eficiencia y consumo específico.
- Análisis de gases de escape de los diferentes combustibles a utilizar.
- Análisis energético de los diferentes combustibles utilizados respecto al biometano.
- Análisis de costo por energía de cada combustible.

### 1.5. ALCANCES

El presente proyecto contempla el estudio del uso de biogás purificado (biometano) presurizado en un motor de combustión interna Otto; para lo cual se obtendrá biogás de la planta de alta performance y doble cámara hidrolítica ubicada en Majes, se realizará la purificación del biogás a biometano, se realizará la compresión, se instalará un Kit de conversión de gasolina a Gas Natural para un generador eléctrico con motor a combustión interna y se usará el biometano comprimido como combustible en el generador eléctrico para que pueda realizarse evaluaciones técnicas en el motor y poder

sacar conclusiones que puedan aportar en el desarrollo tecnológico en el uso de biometano presurizado en el sector agrícola.

### 1.6. TIPO DE INVESTIGACIÓN: CAMPO, ÁREA, LÍNEA

<b>CAMPO</b>	<b>Ciencias Físicas y Formales</b>
<b>ÁREA</b>	Energía Renovable
<b>LÍNEA</b>	Investigación
<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	Aplicada a Campo

### 1.7. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de conocimiento en la producción y uso de biometano presurizado es de gran importancia en el Perú para la sustitución de combustibles fósiles en la matriz energética, según el proyecto “Producción y uso de biometano presurizado como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola” en Arequipa en las zonas rurales, el uso de combustibles como fuente primaria de energía representa una fracción muy importante de todas las necesidades energéticas de la población; la producción de excretas contribuye con el 7% del efecto invernadero, lo que se traducirá en una emisión de entre 20 y 30 millones de toneladas anuales de metano que se envía a la atmosfera, se menciona que cada  $m^3$  de metano provoca un efecto invernadero equivalente al efecto invernadero que provoca  $23m^3$  de  $CO_2$ ; el procesamiento de residuos agroindustriales para producir energía, es una gran oportunidad que tiene el sector para incrementar su competitividad, sostenibilidad económica y ecológica; la falta de presurización de biometano genera que los equipos (generador) que usen este

combustible no tengan un grado de independencia eficiente; evaluaciones del uso de biometano en equipos a motores de combustión interna son requeridas para evaluar su rendimiento y eficiencia en el equipo que usa este combustible.

## 1.8. ANTECEDENTES EN LA GENERACIÓN Y USO DE BIOGÁS

Se tienen diferentes casos del uso de biogás purificado en Latinoamérica, a continuación, se mostrará algunos de los casos que existen actualmente

### 1.8.1. FUNDO AMERICA - AREQUIPA PERÚ

Fundo privado ubicado en el distrito de Santa Rita de Siguaná en la provincia de Arequipa. El Fundo América está dedicado a la producción de leche y cultivo de hortalizas. Se estuvieron desarrollando dos proyectos financiados por INNOVATE PERÚ relacionados a la generación de energía eléctrica a partir de biogás.

**“Características de la tecnología** Biodigestor de dos cúpulas de 350 m<sup>3</sup> cada una y una laguna de recepción de biol de 350m<sup>3</sup> instalados el 2008. Produce diariamente 350m<sup>3</sup> de gas metano y 14 m<sup>3</sup> de Biol.

**Uso y aprovechamiento del biogás y biol:** El Fundo América en convenio con la Universidad de San Pablo de Arequipa ganaron el 2010, a través de INNOVATE PERU del Ministerio de la Producción, el financiamiento de dos proyectos "Desarrollo de tecnología para el aprovechamiento industrial del biogás por tri-generación y por celdas de combustible en la región Arequipa" y "Desarrollo de tecnología para el procesamiento eficiente del biogás en la región Arequipa".

**Principales logros y aprendizajes que se han alcanzado:** El primer proyecto busca lograr el ahorro del 70% en el consumo de energía del fundo, bajando sus costos en el pago de este servicio, con lo que se da un uso económico al biogás. El segundo proyecto se deriva de la creación del biodigestor ya en marcha para dar paso a la

purificación del gas obtenido y obtener electricidad aplicando el proceso de Trigeneración (25 kw) que es la obtención de electricidad para procesos de calefacción y/o enfriamiento y de celdas de combustible (1Kw). Las celdas de combustible son una tecnología limpia, que permite utilizar el biogás para generar electricidad obteniendo como residuo agua. A nivel internacional es más difundida la cogeneración (generación de electricidad y calor), con este proyecto se incluye un componente más para generar frío, que pueda ser utilizado por la empresa para la producción de quesos” (MINAGRI, 2011).



Figura 1: Uso de biogás en Fundo América

Fuente: MINAGRI (2011)

### 1.8.2. GRANJA POZO VERDE - CALI COLOMBIA

“En 2008, en el marco de una pasantía de investigación y fortalecimiento de capacidades en energías renovables, en Colombia; se visitó la Granja Pozo Verde en Cali para conocer el proyecto de investigación realizado por la fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria del Valle (CIPAV). El biodigestor es de manga de polietileno calibre 800, protegido con resina contra la luz UV, de 1.25 m de ancho y 24 m de largo, de operación continua donde se procesa el estiércol de la granja de cerdos y opera a 4 cm de presión de agua. El H<sub>2</sub>S se elimina en

un cartucho de tubo de PVC de 6" de diámetro por 2 m de largo relleno con 2/3 de viruta de fierro y de 1/3 de esponja de fierro (en la entrada y en la salida).

Después el biogás se conduce a través de una tubería de PVC de 1.5" hasta el hangar donde están los grupos electrógenos, en esta tubería hay un ramal en T que permite eliminar el agua condensada. De esta manera llega el biogás sin H<sub>2</sub>S y sin vapor de agua para emplearlo como combustible de motores de combustión interna a petróleo. Del balón de almacenamiento se conduce el biogás por la tubería de PVC de 1.5" hacia el filtro de aire de cada motor, por donde ingresa para su combustión en los cilindros.

Se debe tener en cuenta que un motor petrolero no tiene bujías y que la combustión del petróleo en los cilindros ocurre por la elevada compresión; por ello, no se puede reemplazar el 100% del petróleo por biogás. En la Granja Pozo Verde tienen un motor Blackstone de 3 cilindros, 100 KW de potencia (135 HP), 600rpm, acoplado a un generador eléctrico de 92 KW, en este motor se reemplaza el 47% de petróleo diesel por biogás; también poseen un motor Perkins de 6 cilindros, 74KW de potencia (100 HP), 1800rpm, acoplado a un generador eléctrico de 63 KW, este segundo motor se reemplaza el 67% del petróleo diesel por biogás" (Barreda et al., 2019).

Figura 2: Motores Blackstone y Perkins



Fuente: Barreda (2019)

### 1.8.3. FUNDO SAN ISIDRO CHACHAPOYAS PERÚ

“Los motores de combustión interna a gasolina tienen bujías que generan una chispa eléctrica casi al final de la etapa de compresión, para dar inicio a la combustión. Por ello, se puede reemplazar el 100% de la gasolina por biogás, lo que es demostrado con el apoyo de Evans Tejedo Soberón, mecánico de motocicletas, en las que hizo funcionar dos motocicletas a biogás. Estos logros motivaron a Evans Tejedo para hacer su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial en la UNTRM, en la que se adaptó el motor a gasolina de 2.4 HP de un grupo electrógeno de 1KW para que funcione a biogás y también el motor a gasolina de 9HP de una picadora de pasto. Las evaluaciones se hicieron en el Campus de la UNTRM y en la estación Experimental de Pomacochas del INDES-CES de la UNTRM.

Para adaptar el motor a biogás, se construyó un dispositivo en forma de T, con accesorios de PVC de  $\frac{1}{2}$ " y de una llave de compuerta de bronce de  $\frac{1}{2}$ " para regular el paso del biogás. Para el ingreso de la mezcla biogás-aire al carburador se empleó accesorios de PVC de  $1\frac{1}{2}$ " en el extremo una llave de paso de  $1\frac{1}{2}$ " de plástico para regular el ingreso de aire. Este dispositivo se conectó en el filtro de aire de motor.

El grupo electrógeno a biogás produjo 244 W (24.4% de la generada por el mismo motor a gasolina) para el encendido de un foco de filamento de 100 W y de 8 focos ahorradores de 18 W cada uno. El arranque se hizo con gasolina y luego paso a operación con biogás. Aunque el motor reduce su potencia nominal, se produce la energía para el funcionamiento de 8 focos ahorradores de 18 W que iluminan como foco de filamento de 80 W, suficientes para la iluminación de varios ambientes de la vivienda en zona rural.

Con un dispositivo con los mismos componentes empleados para el grupo electrógeno, conectado en el lugar del filtro de aire, se adaptó el motor gasolinero de 9

HP de la picadora de pasto con el que funcionó a biogás sin problemas. La llave de compuerta de bronce permite regular finamente el paso del biogás al motor hasta estabilizar su funcionamiento. El arranque se hizo con gasolina y luego se pasó a operación con biogás” (Barreda et al., 2019).



Figura 3: Generador Eléctrico 1 kW

Fuente: Barreda (2019)

#### 1.8.4. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO BÁSICO DE EQUIPO DE PURIFICACIÓN UTILIZANDO SCRUBBER PARA MEJORAR EL BIOGÁS REDUCIENDO SU CONTENIDO DE DIÓXIDO DE CARBONO EN EL DISTRITO DE MAJES-AREQUIPA

“El presente trabajo de investigación se centró en el diseño, construcción y la elaboración de las evaluaciones básicas iniciales de un equipo optimizador de la calidad del biogás. La calidad de biogás medida por su contenido neto en porcentaje de metano se consigue centralmente por la extracción del contenido de dióxido de carbono de alrededor de 45% en volumen presente en su

composición. En esta investigación, dicho procedimiento utiliza el control de presión de lavado para lograr el retiro de los gases deseados y así mejorar la calidad del gas. Al final de la investigación se obtuvo una columna de purificación tipo Scrubber de absorción de CO<sub>2</sub> con agua, que posee 6 bares como presión de operación y 30°C como temperatura de operación. El equipo funciona con una alimentación de 3,12 LPM de agua para un caudal de 1 Nm<sup>3</sup>/h de biogás crudo. Dicho equipo es una torre vertical de empaquetamiento aleatorio que posee monturas Berl de cerámica con tamaño nominal 12 mm. La torre posee diámetro de 6" y cédula 10, está construida en acero inoxidable A304 y altura total de 1,97 metros. El costo de construcción del equipo fue S/. 11 499 y tiene costo de operación de 1,31 soles/Nm<sup>3</sup> de biogás. Se concluye que es posible diseñar un equipo de mejoramiento de calidad de biogás, se espera que en trabajos futuros se lleven a cabo pruebas de evaluación de biogás tratado en sistemas que normalmente utilizan gas natural metano." (Zeballos, 2018)

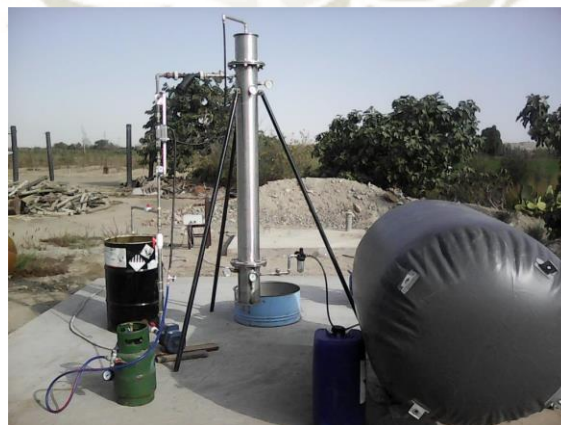


Figura 4: Vista frontal Inferior del sistema de purificación de biogás

Fuente: Zeballos (2018)

## CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMETANO

#### 2.1.1. BIOMASA COMO BIOENERGÍA

La bioenergía según Moraga, A (2017): “Corresponde a toda aquella energía que puede obtenerse de la biomasa, bien sea a través de su combustión o su procesamiento para conseguir otro tipo de combustibles, como el biogás o biocombustibles líquidos. La energía de la biomasa proviene en última instancia del sol. Mediante la fotosíntesis, el reino vegetal absorbe y almacena parte de la energía solar que llega a la tierra. Las células vegetales utilizan la radiación solar para formar sustancias orgánicas a partir de sustancias simples y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en el aire. El reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía. En ambos procesos de transformación se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos.” (p.6).

Una de las energías renovables usadas alrededor del mundo es la biomasa. “Los recursos bio-másicos incluyen cualquier fuente de materia orgánica, como desechos agrícolas, forestales y animales, así como basura urbana, los que se someten a modernos procesos de conversión, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles. La biomasa tiene características específicas que determinan su uso: su composición física y química determina el tipo de combustible que se puede generar, el contenido de humedad posibilita la conversión energética, el porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material, el poder calorífico determina la energía disponible en la biomasa y la densidad aparente define el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta” (FOCER, 2002).

“La biomasa es una fuente de energía flexible y diversa, abundante en nuestro país y el mundo. Con este recurso podemos generar energía en varias localidades y regiones, incluso en lugares más carentes de fuentes de energía. Puede convertirse esta fuente en combustible gaseoso, líquido o sólido, utilizando las tecnologías de conversión conocidas. Por lo tanto, esta fuente puede ser considerado como un portador universal de energía renovable que se puede utilizar en amplia gama de aplicaciones en el sector de la energía. La biomasa puede ser utilizado en una gama de aplicaciones de calefacción, de procesamiento de combustible gas, fertilizantes y otras aplicaciones” (Silva, et al., 2008).

“El uso tradicional de la biomasa sigue siendo la forma más extendida de energía, principalmente en el cocinado de alimentos, para las personas que no tienen acceso a otros procesos de conversión o a fuentes de energía más modernas, a pesar de que estas formas de aprovechamiento son poco adecuadas y provocan notables impactos económicos, medioambientales y sobre la salud. Son varias las razones que conducen a este hecho: se trata del combustible utilizado tradicionalmente, suele ser más accesible que otros combustibles más modernos y tiene unos costes económicos inferiores a los que presentan las tecnologías alternativas” (EsF, 2012, p.23).

En general, los costes de inversión para instalaciones de biomasa son superiores a sus homólogos para instalaciones de combustibles convencionales. “Esto se debe, no sólo a la falta de desarrollo de sistemas de producción en serie para algunos componentes, sino que también influyen las características especiales requeridas por los equipos para poder utilizar biomasa de forma eficiente. En cambio, cuando nos referimos a los costes de operación o explotación de plantas de biomasa, su comparación frente a combustibles convencionales puede ser favorable o no según el tipo de aplicación. La

principal componente de los costes de explotación en este tipo de instalaciones es la compra de la biomasa” (IDAE, 2007, p.33).

“Si normalmente a los sistemas de producción de energías renovables se les otorga un beneficio claro, la disminución de la carga contaminante provocada por los combustibles fósiles, en el caso de la biomasa existen otros beneficios como propiciar el desarrollo rural y proporcionar el tratamiento adecuado de residuos, en algunos casos contaminantes, o gestionar los residuos procedentes de podas y limpiezas de bosques limitando la propagación de incendios” (IDAE, 2007, p.43).

Paralelamente otro de los beneficios según Petersson, et al. (2007) “es el uso de la biomasa como combustible renovable puede contribuir a reducir la contaminación, la emisión de gases de efecto invernadero y puede ayudar a minimizar el cambio climático y otros problemas ambientales. Cuando se utiliza la energía almacenada en la biomasa, se emiten gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Sin embargo, la cantidad liberada es la misma que la consumida durante el proceso de fotosíntesis, por lo que las fuentes de biomasa se consideran neutrales, en relación con el daño climático, derivado del efecto invernadero.”

“El fomento de la producción de biomasa para uso energético permite el desarrollo de una nueva actividad en las áreas rurales, sobre la base de un mercado con una demanda continua y sin fluctuaciones, que genera puestos de trabajo estables, bien remunerados y supone una nueva fuente de ingresos para las industrias locales” (IDAE, 2007, p.46).

Finalmente, el biogás es un combustible que se genera por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos y otros factores en ausencia de oxígeno. “La producción de biogás por descomposición

anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible de valor, además de genera un efluente que puede aplicarse como abono energético. Todos los residuos orgánicos, por ejemplo: basura de cocina, restos vegetales y animales, aguas servidas, aserrines, virutas, excrementos, son adecuados para ser fermentados anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno). Las bacterias consumen el carbono y el nitrógeno y como resultado se produce el biogás” (Castillo & Tito, 2011).

## 2.1.2. BIOGÁS

### 2.1.2.1. *Definición*

“El Como el nombre lo indica, el biogás se produce en un proceso biológico. En ausencia de oxígeno (anaeróbico significa sin oxígeno), la materia orgánica se descompone formando una mezcla de gases conocida como biogás. Ese proceso se encuentra ampliamente en la naturaleza y ocurre, por ejemplo, en los páramos o en el fondo de los lagos en pozos de lodo líquido y en el rumen de los rumiantes. La materia orgánica se convierte casi enteramente en biogás gracias a la acción de una gama de distintos microorganismos. También se genera energía como calor y nueva biomasa” (FNR, 2010, p.21).

### 2.1.2.2. *Composición y características*

“Se llama biogás a la mezcla constituida por metano  $CH_4$  en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno” (Hilbert, s.f., p.34).

Tabla 1: Características del Biogás

CARACTERISTICAS	CH4	CO2	H2-H2S	OTROS	BIOGAS
<b>Proporciones (%Volumen)</b>	55-70	27-44	1	3	100
<b>Valor Calorífico (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	35,8	-	10,8	22	21,5
<b>(kCal/m<sup>3</sup>)</b>	8600	-	2581	5258	5140
<b>Ignición (% en aire)</b>	5-15	-	-	-	6-12
<b>Temp. Ignición (°C)</b>	650-750	-	-	-	650-750
<b>Presión crítica (Mpa)</b>	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5-8,9
<b>Densidad Nominal (g/l)</b>	0,7	1,9	0,08	-	1,2
<b>Densidad Relativa</b>	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
<b>Inflamabilidad (Vol. en % aire)</b>	5-15	-	-	-	6-12

Fuente: Hilbert (s.f)

### 2.1.2.3. Producción de Biogás

“El Biogás se produce de manera natural de las siguientes fuentes:

- Vegetación cuando se descompone, libera gas metano.
- Cultivos sumergidos como plantaciones de arroz y totorales.
- Pantanos y humedales del cual se pudre la vegetación en el fondo.
- Estiércol de animales de granja como de vacuno, ovino, equino, cerdos, pollos cuyes que al descomponerse producen metano.
- Desagües en su tratamiento en digestores anaeróbicos produce metano.
- Relleno Sanitario del cual la basura orgánica produce metano en su descomposición” (Barreda et al., 2019).

“La producción de biogás es un proceso complejo que requiere de la acción coordinada de un grupo de microorganismos especializados en la degradación de una amplia variedad de sustratos orgánicos (restos de comida, desperdicios orgánicos de industrias, subproductos orgánicos de bajo valor comercial, cultivos energéticos, residuos cloacales, estiércol de animales, etc.). La descomposición de estos residuos en el ambiente natural o en reactores especializados, bajo condiciones de anoxia (ausencia de oxígeno), genera las condiciones imprescindibles para el proceso. El biogás producido se encuentra compuesto principalmente por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), y en menor medida otros gases, entre los que se destaca el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), un gas altamente tóxico, responsable del olor fuerte y desagradable que se percibe en los ambientes naturales donde se genera biogás por la degradación anaeróbica de la materia orgánica” (FAO, 2019b, p.3).

“La conversión de sustrato en biogás ocurre con la participación de tres grupos principales de microorganismos: bacterias fermentativas acidogénicas; bacterias sintróficas acetogénicas; y arqueobacterias metanogénicas. Además, ante la presencia de sulfatos proliferará un grupo adicional de arqueobacterias sulfatorreductoras, las cuales compiten por sustrato con bacterias metanogénicas, por lo que disminuye la producción de metano” (Lopez et al., 2017, p.29).

**Del hidrólisis y acidogénesis**, “la primera fase que ocurre es la hidrólisis en la materia orgánica, en la cual las bacterias liberan enzimas que convierten los carbohidratos complejos en monómeros y azúcares; las proteínas en

aminoácidos, y los lípidos (grasas) en ácidos grasos. En paralelo, estas mismas bacterias fermentan la materia orgánica hidrolizada, mediante la acidogénesis de los productos obtenidos y con esto forman moléculas más pequeñas. De manera natural, las bacterias fermentativas están presentes en gran cantidad y son las primeras en actuar en la etapa secuencial de la degradación del sustrato. En consecuencia, pueden beneficiarse energéticamente en un mayor grado que los microorganismos en las etapas siguientes. El proceso de acidificación puede comenzar incluso desde la red de alcantarillado o cuando el lodo con alto contenido de materia orgánica permanece cierto tiempo en condiciones anaerobias” (Lopez, J., 2017, p.29).

En la **Acidogénesis y acetogénesis** “hay distintos grupos de microorganismos, denominados acidogénicos y acetogénicos, procesan esa materia orgánica soluble y liberan principalmente hidrógeno molecular ( $H_2$ ),  $CO_2$  y acetato ( $CH_3COO^-$ ). Dado que la acidogénesis es considerada la etapa más rápida del proceso global, resulta fundamental controlarla para evitar que el descenso de pH (acidificación) del medio interfiera con la acción del consorcio microbiano” (FAO, 2019b, p.5).

Durante la **Metanogénesis** “se consume el hidrógeno y el acetato producido. Este proceso puede ser inhibido por exceso de acidez. La disminución en la producción de metano (causada, por ejemplo, por la competencia con las bacterias sulfatorreductoras, etapa de sulfurogénesis) resulta en la acumulación de hidrógeno y probablemente también de acetato, con la consecuente inhibición

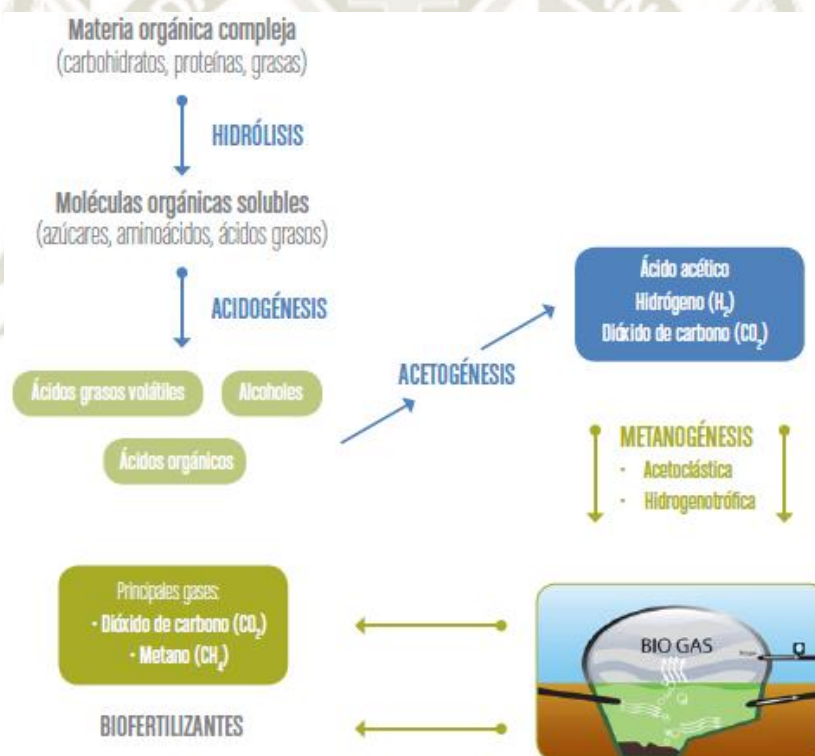
de la acetogénesis. Al final de la cadena de degradación anaerobia en los reactores ocurren dos fenómenos principales: primero, la producción del biogás - constituido principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), lo cual facilita la remoción del carbono de la fase líquida-; y segundo, el mantenimiento de una baja presión parcial de hidrógeno y acetato en esa fase líquida, lo que favorece la producción de los propios sustratos al mantener las condiciones de crecimiento de los microorganismos anaerobios, sumamente sensibles ante la presencia de agentes inhibidores” (Lopez, J., 2017, p.29).

“La **Sulfurogénesis** tiene importancia cuando los sustratos, el agua residual y el lodo municipal contienen ciertas cantidades de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) u otros compuestos del azufre. Los microorganismos sulfatorreductores (grupo diverso de bacterias y arqueobacterias) utilizan los compuestos azufrados, principalmente sulfato, para oxidar bioquímicamente compuestos orgánicos (ácidos orgánicos, azúcares, glicerol, etanol, aminoácidos y acetato), con lo que se producen los gases sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o en el caso de una degradación incompleta,  $\text{H}_2\text{S}$  y compuestos orgánicos de menor complejidad. Pero hay un problema: las bacterias sulfatorreductoras compiten por todos los compuestos orgánicos formados en la cadena y reducen la eficacia de generación de biogás. Además, el  $\text{H}_2\text{S}$  generado puede inhibir la reproducción de las arqueas metanogénicas” (Lopez, J., 2017, p.29).

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. “Debido a que cada grupo de bacterias

intervinientes en las distintas etapas del proceso responde en forma diferencial a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Por lo tanto, nos limitaremos a dar una valoración cualitativa y en algunos casos se darán cifras y cuadros que deben tomarse como orientativos ya que los valores pueden sufrir importantes variaciones” (Hilbert, s.f., p.6).

Figura 5: Etapas de la digestión anaeróbica.



Fuente: FAO (2019b)

#### 2.1.2.4. *Uso de Biogás*

“**Las cocinas y calentadores** son fácilmente modificables, agrandando el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala. **Las lámparas a gas** tienen una muy

baja eficiencia y el ambiente donde se las utilice debe estar adecuadamente ventilado para disipar el calor que generan. **Las heladeras domésticas** constituyen un interesante campo de aplicación directo del biogás debido a que tienen un consumo parejo y distribuido a lo largo de las 24 horas del día lo cual minimiza la necesidad de almacenaje del gas. Estos equipos funcionan bajo el principio de la absorción (generalmente de ciclo amoníaco refrigerante - agua absorbente). Recientemente se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y/u otros productos agrícolas lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del mismo. **Los quemadores infrarrojos** comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes (especialmente en criadores y parideras) presentan como ventaja su alta eficiencia lo cual minimiza el consumo de gas para un determinado requerimiento térmico. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido. En los **motores de Ciclo Otto** el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen funcionando con un 100% de biogás con una merma de la potencia máxima del 20% al 30%. A los **motores de Ciclo Diesel** se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás - diesel y pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual los hace muy confiables. El gasoil no puede ser reemplazado en los motores funcionando a campo del 85% al 90%, debido a que la autonomía conseguida menor comparada con la original. La proporción de H<sub>2</sub>S en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de

determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los aceites lubricantes. El grado de deterioro en los motores varía considerablemente y los resultados obtenidos experimentalmente suelen ser contradictorios. Los motores a biogás tienen amplio espectro de aplicación siendo los más usuales el bombeo de agua, el picado de raciones y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural. El otro uso muy generalizado es su empleo para activar generadores de electricidad” (Hilbert, s.f., pp. 36-37).

Tabla 2: Consumo y eficiencia de artefactos a biogás.

ARTEFACTO	CONSUMO	RENDIMIENTO (%)
Quemador de cocina	300 - 600 l/h	50 - 60
Lámpara a mantilla (60W)	120 - 170 l/h	30 - 50
Heladera de 100 L	-30 - 75 l/h	20 - 30
Motor a gas	0,5 m <sup>3</sup> /kWh o Hph	25 - 30
quemador de 10 kW	2 m <sup>3</sup> /h	80 - 90
Infrarrojo de 200 W	30 l/h	95 - 99
Cogenerador	1 kW elect. 0,5 m <sup>3</sup> /kwh: :2kW térmica	hasta 90

Fuente: Hilbert (s.f)

### 2.1.3. REACTORES ANAERÓBICOS

“Los biodigestores pueden tener tecnologías muy variadas, que incluyen desde construcciones caseras con diversos materiales, hasta plantas con tecnología de punta completamente automatizadas. La realidad es que no existe una tecnología mejor que otra, sino tecnologías que se adaptan mejor a una situación que otras, y su elección depende del objetivo que se persiga, de los recursos de que se disponga, del dinero y tipo de financiamiento para realizar la inversión, y de la clase de sustrato que alimentará al biodigestor, entre los aspectos más relevantes” (FAO, 2019b, p.14).

Estos biodigestores están controlados por parámetros físico-químicos de los cuales los describimos a continuación:

- “PH: Es una medida de la acidez o alcalinidad de una determinada solución. Guarda una relación con la actividad de los iones hidrógeno y los procesos de generación y degradación de ácidos orgánicos dentro del biodigestor. Es fundamental controlar este factor ya que, el sistema biológico encargado de la generación de biogás es altamente dependiente del pH, en especial los microorganismos metanogénicos encargados de la producción de metano” (FAO, 2019b, p.8).
- POTENCIAL REDOX: “Para adecuado crecimiento de los anaeróbios obligados el valor del potencial redox se debe mantener entre -220 mV a -350 mV a pH 7.0 de manera de asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad. Cuando se cultivan metanogénicas, se incorporan agentes reductores fuertes tales como sulfuro, cisteína o titanio III para ajustar el medio a un potencial redox adecuado” (FAO, 2011, p.46).
- TEMPERATURA: “La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura. Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y

- termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación” (FAO, 2011, p. 38).
- TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAÚLICA THR: “El tiempo promedio en que la materia orgánica es degradada por los microorganismos. Se ha observado que a un tiempo corto de retención se produce mayor cantidad de biogás, pero un residuo de baja calidad fertilizante por haber sido parcialmente digerido. En tiempos largos de retención se obtiene un rendimiento bajo de biogás, con un efluente (residuo) más degradado y con excedentes característicos como fuente de nutrimento” (Landeros, 2013, p. 25)
  - VELOCIDAD DE CARGA ORGÁNICA: “Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. La velocidad de carga orgánica (OLR) dependerá del tipo de sustrato orgánico utilizado, ya que este determina el nivel de actividad bioquímica que ocurre dentro del biodigestor. Valores bajos de OLR implican elevados TRH y/o baja concentración de sólidos volátiles (SV) en el influente, mientras que incrementos en la OLR conllevan una reducción en la producción de biogás por unidad de SV introducida. La OLR óptima deberá determinarse para cada instalación y sustrato a utilizar, para optimizar la operación técnica y económica del biodigestor” (FAO, 2019b, p.10).
  - SÓLIDOS VOLÁTILES: “Este uno de los criterios decisivos para seleccionar el tipo de reactor anaerobio por emplear. Se han clasificado en sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, sólidos fijos y sólidos sedimentales. Los

- sólidos Totales, se refieren al material residual dejado en la capsula después de la evaporación de una muestra simple y su posterior secado en una estufa a una temperatura definida. Incluyen a los sólidos suspendidos totales (porción de sólidos totales retenida por un filtro), y los sólidos totales disueltos (porción que pasa a través de un filtro) Los sólidos fijos son los residuos totales, suspendidos o disueltos, después del calentamiento o evaporación por un tiempo específico a una temperatura determinada. El peso perdido en la ignición se denomina “sólido volátil” o también es considerado una porción orgánica de la muestra. Los sólidos sedimentales, son el material sedimentado fuera de suspensión dentro de un periodo de tiempo definido. Puede incluir material flotante, dependiendo de la técnica empleada” (Landeros, 2013, p. 26).
- PRESENCIA DE INHIBIDORES: “La producción de gas puede inhibirse por varias razones. Estas incluyen causas técnicas que afectan la operación de la planta. Las sustancias conocidas como inhibidores también pueden hacer más lento el proceso. Existen sustancias que, bajo ciertas circunstancias, incluso en pequeñas cantidades, bajan la tasa de descomposición o, en concentraciones tóxicas, detienen por completo el proceso de descomposición. Se debe hacer una distinción entre inhibidores que ingresan al digestor a través de la adición de sustrato y aquellos que se forman como productos intermedios a partir de las etapas individuales de descomposición” (FNR, 2010, p. 25-26).
  - RELACIÓN CARBONO/NITROGENO: “Los alimentos principales de las bacterias anaerobias son el carbono (en forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, amoníaco, etc.) El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la reconstrucción de estructuras celulares. Las bacterias

- metabolizan el C treinta veces más rápido que el N. La digestión anaerobia, se lleva mejor acabo cuando las materias primas suministradas a las bacterias contienen ciertas cantidades de C y de N al mismo tiempo. La razón de C a N representa la porción de los dos elementos. Una razón C/N de 30 (30 veces más carbono que nitrógeno) permitirá que la digestión se lleve a cabo a un ritmo óptimo, considerando que las otras condiciones sean favorables” (Magaña et al., 2006). “El N es un nutriente esencial para los microorganismos anaerobios junto con el C. El N juega un papel importante en el desarrollo de las bacterias anaerobias pues no inhibe el proceso de fermentación, pero en su forma ion amonio si afecta el proceso de digestión anaerobia” (Landeros, 2013, p. 26).
- RELACIÓN ACIDOS ORGANICOS VOLÁTILES/CARBONATO INORGÁNICO TOTAL: “El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschat – FAL) desarrolló el análisis de ácidos orgánicos volátiles (FOS) y carbonato inorgánico total (TAC) a partir de un test de valoración (Método Nordmann), con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. La relación FOS/TAC se mide en miligramos de carbonato de calcio por litro (mg CaCO<sub>3</sub>/l). Este parámetro de control sirve como valor guía para evaluar el proceso de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente. Cada planta tiene su propio valor óptimo de FOS/TAC, que sólo puede determinarse mediante una observación de largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato. En general, una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 se considera normal” (FAO, 2019b, p.12).

LOS BIODIGESTORES TIPO BATCH “es un sistema que funciona por ciclos y no en flujo continuo, donde cada ciclo de operación se divide en cuatro etapas como alimentación, reacción, sedimentación, descarga” (FAO, 2011, p.89). “Los biodigestores en Batch normalmente se usan para investigación en laboratorios. Se utilizan para conocer si un material es apto para producir biogás o no, cuánto produce y en qué tiempo, con lo que permiten determinar potenciales de producción de biogás de diferentes sustratos. Pueden ser de distintos materiales y tamaños, pero en general son pequeños, lo que hace más fácil operarlos y manipular diferentes variables, como la agitación y la temperatura, sin grandes costos, lo que permite simular distintos escenarios. Estos biodigestores pueden ser de mezcla completa o parcial; húmedos, semihúmedos o secos, y con o sin manejo del sustrato” (FAO, 2019b, p.14).



Figura 6: Biodigestores Batch.

Fuente: Cátedra de Química Analítica – FAUBA, FAO (2019b)

LOS BIODIGESTORES CONTINUOS HUMEDOS SIN MANEJO DE SUSTRATO “consisten en un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos. Esto se consigue mediante un sistema de agitación. Ésta puede ser mecánica (agitador de hélice o palas,

de eje vertical u horizontal) o neumática (recirculación de biogás a presión), y nunca violenta. Esta tipología de reactor no ofrece problemas de diseño y es el más utilizado para residuos. Comparativamente a otros reactores, el tiempo de retención necesario es alto, debido a que la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente. Si la velocidad de reacción depende de la concentración, como es el caso de los procesos biológicos, la velocidad será baja, y la forma de compensarla es aumentando el tiempo de reacción” (IDAE, 2007, p.25).

“Este tipo de biodigestores poseen diferentes tipo de tecnologías, de los cuales existen biodigestores rurales de bajas tecnologías que no disponen de sistemas de agitación continua o utilizan el mismo flujo de carga para generar la agitación, también en la mayoría de casos no poseen un sistema de calefacción o aislamiento térmico por lo cual dependen de las condiciones externas, dentro de este grupo de biodigestores encontramos los biodigestores tubulares fabricados con diferentes tipos de membrana así como los biodigestores chinos o rígidos hechos con materiales como ladrillo u hormigón. Existen también los biodigestores de media tecnología que son construidos en lagunas de tratamientos de efluentes, tiene poco a casi nulo sistema de agitación y su sistema de aislamiento depende del exterior, estos tipos de biodigestores producen gran cantidad de biogás debido a sus dimensiones y no tanto por su eficiencia en el proceso y funcionan mejor en zonas tropicales. Los biodigestores de alta tecnología pueden trabajar en los 3 rangos de temperatura (psicrofílico, mesofílico, termofílico) bajo cualquier condición externa climática y altas cargas de solidos como orgánicos, estos son construidos con hormigón, acero al carbono o inoxidable, materiales que puedan resistir

el ataque químico de la producción de biogás teniendo una vida útil estimada de 15 a 20 años con una generación constante de biogás” (FAO, 2019b, p.17).



Figura 7: Biodigestores de baja, media y alta tecnología respectivamente.

Fuente: FAO (2019b)

LOS BIODIGESTORES CONTINUOS HUMEDOS CON MANEJO DE SUSTRATO ósea con recirculación de sustrato, “se sabe que regulando la recirculación es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Esto es a costa de aumentar el tiempo de retención de los microorganismos, gracias a su confinamiento en el sistema mediante la separación en el decantador y recirculación. Debido a la necesaria separación de microorganismos en el decantador, este sistema sólo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), para las que sea posible una separación de fases líquido-sólido, con la fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos. Antes del decantador se debe disponer de un sistema de desgasificación, sin el cual la decantación se puede ver impedida” (IDAE, 2007, p.26).

LOS BIODIGESTORES CONTINUOS HUMEDOS CON DOS ETAPAS “Estos sistemas consisten en un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Si la primera etapa

consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc” (FAO, 2011, p.93).

LOS BIODIGESTORES CONTINUOS HUMEDOS CON DOS FASES “que, a diferencia de los sistemas de dos etapas, la separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. La separación es de tipo cinético, controlando el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a las más altas tasas de crecimiento de las bacterias acidogénicas. Este tipo de sistema ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos con fibras y, en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis” (IDAE, 2007, p.30).

LOS BIODIGESTORES SEMIHUMEDOS SIN MANEJO DE SUSTRATO “funcionan con mezclas de alimentación que contienen entre 25 y 35% de materia seca. Son idóneos para trabajar con FORSU, con sustratos con bajo contenido de humedad o en zonas en las que no se cuenta con recursos hídricos para diluir las mezclas. Hay distintos diseños de estos reactores, que pueden ser de flujo vertical y horizontal. Para el movimiento de la mezcla de alimentación y del digerido se utilizan bombas de tipo hormigoneras. Estos sistemas tienen la ventaja de que son menos sensibles a la presencia de materiales inertes en la mezcla de alimentación y no producen espuma y/o

costra en el interior del reactor. Si bien se reducen las cantidades de líquidos que se deben manipular con respecto a una planta de digestión húmeda, estos reactores deben contemplar algún sistema para separar el digerido sólido del líquido (prensa helicoidal y/o centrífuga), para su posterior utilización o tratamiento” (FAO, 2019b, p.20).

LOS BIODIGESTORES CONTINUOS SECOS SIN MANEJO DE SUSTRATO “se muestran en sistemas, normalmente denominados “bioceldas”, que sirven como biodigestores para sustratos con alto contenido de sólidos (hasta 50% MS). El proceso es muy similar al que ocurre naturalmente en los rellenos sanitarios, con la diferencia de que la fase anaeróbica se encuentra totalmente controlada, lo que eficientiza la producción de biogás por tonelada de sustrato. El THR para estos sistemas es aproximadamente de 28 días, con valores de 25 a 50% de MS. El mayor desarrollo tecnológico se encuentra en los portones, que se abren para llenar cada compartimiento y luego se cierran, lo que garantiza la hermeticidad y la anaerobiosis dentro de cada reactor. Si bien estos sistemas tienen una menor eficiencia de producción de biogás comparados con los reactores húmedos o semihúmedos, presentan ciertas ventajas como que necesitan sistema de agitación interna, son robustos y resisten la presencia de inertes pesados y/o plásticos, no presentan cortocircuitos hidráulicos, tienen baja pérdida de sustancia biodegradable durante el pretratamiento, resisten picos de concentración de sustratos o sustancias tóxicas, realizan pretratamientos mínimos y más económicos, demandan agua en cantidad reducida en el proceso, requieren calentar mínimamente el reactor anaeróbico” (FAO, 2019b, p.21).

#### 2.1.4. BIODIGESTOR HPTC

Dentro de los reactores o plantas de última generación podemos dar a conocer la Planta de Biogás de altas prestaciones o alta eficiencia que es experimental; “esta planta llega

al Perú dentro del marco del Proyecto “develop PPP –Public Private Partnerships” del Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung” (BMZ; Ministerio Alemán para Colaboraciones y Desarrollo Económico), cuyos fondos correspondientes lo gestiona la sociedad SequaGmbh, Kepler, Ingeniería y Ecogestión; este ha sido desarrollado en las Instalaciones de la empresa Ecoalia/Biogasnalía ubicada en el P.I. de Villonquejar del cual se tiene una Planta Experimental de Biogás de tamaño pequeño y de altas prestaciones y/o alto rendimiento. Una vez finalizados los ensayos la planta fue destinada para la formación de los estudiantes de la Universidad Católica Santa María de Arequipa/Perú.” (Kepler, 2014).

Diseñado en un sistema modular, Construido en 2 contenedores marítimos de 20' más una bolsa de biogás, con un volumen del digestor de 30 m<sup>3</sup>, reactores de hidrólisis de 3 m<sup>3</sup> cada uno con sistema SONW LEOPARD. Autoconsumo inferior al 20% de la energía producida. Caldera de gas de 6 kW. y Almacén de biogás de 60 m<sup>3</sup>.

La Planta de Biogás de Altas Prestaciones (Alta Performance), se ha diseñado para el procesamiento de residuos orgánicos con alto valor energético como son generalmente los residuos de cocina o agroindustriales, ricos en grasas, proteínas y azúcares. El óptimo procesamiento de estos residuos es posible gracias al proceso biológico desarrollada por la empresa alemana SNOW LEOPARD PROJECTS en el que se separa la hidrolización y la metanización en dos unidades físicas distintas.



Figura 8: Equipamiento e instalación del biodigestor Empresa Ecoalia en Burgos – España donde se presentó el biodigestor que vino hacia Arequipa. (Instalado en dos contenedores).

Fuente: Kepler (2014)

“Dentro de las características de su utilidad se mencionan: Eliminación de casi todos los residuos orgánicos ahorrando costes de gestión. Reducción del tonelaje de los residuos orgánicos de hasta un 95%. Producción de gas metano. Producción de fertilizantes (sin olores, baja DQOt, etc.). Generación de energía eléctrica. Generación de energía térmica. Protección del medio ambiente y ahorro de CO<sub>2</sub>. Tiene como ventajas: Los cambios en la alimentación no producen problemas. Hasta un 95 % de la Materia Orgánica se convierte en Biogás. Producción variable según la disponibilidad de residuos. Producción variable según la demanda energética. Bajo contenido de azufre en el Biogás. Planta prefabricada. Alto nivel de automatización. Sistema modular que permite una fácil ampliación. Fertilizantes con bajo contenido de sólidos volátiles (sin olor). Adaptable a las necesidades del cliente.” (Kepler, 2014).

### 2.1.5. BIOMETANO

“El biometano es la forma mejorada del biogás, el cual puede ser intercambiable con el gas natural convencional, es decir, tiene los mismos usos finales que el combustible fósil. Para que el biogás llegue a ser biometano, debe someterse a un proceso de refinación o purificación, en el cual se remuevan todos los componentes dañinos, e incluso, los microorganismos patógenos para su uso doméstico” (Aparicio, 2015, p. 65).

“El refinado del biogás genera nuevas posibilidades para su uso, pero también aumenta los costes asociados con la producción de biogás. Por tanto, es importante contar con procesos de upgrading optimizados en términos de bajo consumo de energía, alta eficiencia y capaces de evitar, o al menos minimizar, las pérdidas de metano en cualquier corriente que abandone el tratamiento de refinado, lo que es importante tanto desde un punto de vista económico como ambiental” (Hidalgo, 2019, p.15).

#### 2.1.5.1. *Filtrado de CO<sub>2</sub>*

El filtrado de CO<sub>2</sub> se da de diferentes procesos como absorción física, absorción química, absorción en superficie sólida, adsorción y separación por membrana, separación criogénica, entre otros los cuales son descritos a continuación.

“**La absorción física** son métodos de absorción fisicoquímicos poco complejos, requieren poca infraestructura y son costo/efectivo. Un método fácil y económico utiliza agua presurizada como adsorbente en contra corriente. La base del proceso de limpieza con agua es aumentar la presión de limpieza del biogás crudo con el agua presurizada. Esto remueve una significativa proporción de los contaminantes ácidos del gas incluyendo el dióxido de carbono que puede ser liberado del agua de lavado en una torre de arrastre con vapor o aire. El agua regenerada resultante puede ser recirculada y utilizada muchas

veces. La principal desventaja de la limpieza del agua es la gran potencia consumida asociada con el bombeo y el manejo de los flujos de recirculación. Sin tales flujos, el producto producido no tendría una concentración adecuadamente baja de dióxido de carbono. Este proceso también remueve sulfuro de hidrógeno. Este es quizás el método más simple de limpieza de biogás” (Morero, 2014, p. 20).

“**Absorción química** el proceso básicamente consiste en dos columnas (torres) denominadas de absorción y de regeneración (desorción), el biogás con contenido de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  es introducido en la torre absorbidora y se desplaza a través de ella, en contracorriente circula una solución acuosa de un compuesto de aminas la cual al mezclarse con el biogás absorbe el contenido de  $\text{CO}_2$ ; por la parte superior sale el gas muy rico en metano (gas dulce) y con muy pocas trazas de  $\text{CO}_2$  y por la parte inferior sale la solución de amina rica en  $\text{CO}_2$ . Posteriormente, la amina rica pasa por un intercambiador de calor y llega a la segunda torre (desorción) en la cual se regenera con calor y separa el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  de la solución, saliendo limpia de la torre por la parte inferior, por la parte superior sale vapor de la amina con  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , posteriormente este vapor es condensado (para volverlo a reinyectar a la segunda torre) y separado del  $\text{CO}_2$ ” (EPM, s.f, p. 96).

“**Absorción en superficie sólida**, este proceso involucra la transferencia de soluto en la corriente de gas a una superficie de un material sólido, que se concentra principalmente como resultado de las fuerzas físicas de Van der Waals. Los adsorbentes comerciales son generalmente sólidos granulares con grandes áreas superficiales por unidad de volumen. A partir de una buena elección del adsorbente, el proceso puede remover  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , humedad y otras impurezas selectivamente o simultáneamente desde el biogás. La purificación del biogás se puede llevar a cabo usando alguna forma

de silicio, alúmina, carbón activado o silicatos, que son también conocidos como tamices moleculares. La adsorción normalmente se lleva a cabo a alta temperatura y presión. Tiene una buena capacidad para remover la humedad, tiene un diseño simple y es fácil de operar. Pero es un proceso costoso, con altas caídas de presión y altos requerimientos de calor. Se reportó que el CO<sub>2</sub> puede ser removido del biogás a partir de adsorción por balance de presión que consiste en al menos tres lechos de carbón activado. Uno de los lechos es alimentado con biogás bajo presión (6 bar) y el CO<sub>2</sub> es adsorbido. Cuando hay saturación de CO<sub>2</sub> en el lecho de adsorción el proceso se cambia al segundo lecho. El lecho saturado es despresurizado a la presión ambiente. La eficiencia de este proceso es superior al 98%" (Morero, 2014, pp. 24-25).

**“Adsorción y separación de membrana**, este método tiene por objetivo “filtrar” el biogás. Así la corriente gaseosa a purificar se desplaza a través de una membrana selectiva, debido a la fuerza motriz generada por diferencias de presión. El factor determinante es la permeabilidad que poseen las moléculas que componen la corriente de gas a purificar. El proceso de permeación de un gas a través de una membrana polimérica no rugosa es un proceso complejo que puede involucrar varios pasos: 1) Adsorción del gas en una interfase de la membrana. 2) Solución del gas en la membrana en esa interfase. 3) Difusión activada del gas en y a través de la membrana. 4) Desprendimiento del gas de la solución por la interfase opuesta. 5) Desorción del gas de la última interfase. Los materiales de las membranas son formulados especialmente para separar selectivamente determinados gases, principalmente CO<sub>2</sub> del CH<sub>4</sub> presente en el biogás, siendo la permeabilidad de la membrana una función directa de la solubilidad química del gas específico en la membrana. Las membranas usadas hasta el presente son muy frágiles y tienen poros excesivamente pequeños, por lo que se requiere que el

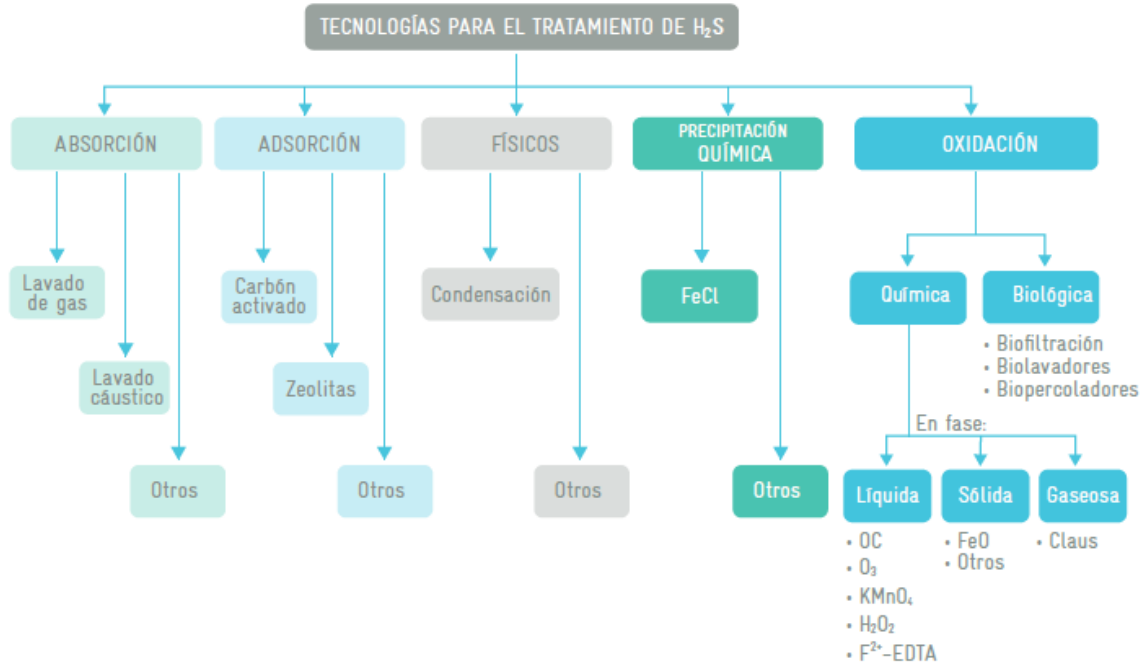
gas de entrada a las membranas esté limpio de material particulado. Estos sistemas son caros y generalmente se consideran no adecuados para aplicaciones a pequeña escala, aunque se han obtenido buenos resultados en estudios a nivel piloto” (Varnero et al., 2012, p. 35).

“**Separación criogénica**, en este proceso, el biogás es comprimido en múltiples etapas hasta una presión elevada y enfriado a temperaturas de  $-55$  a  $-110^{\circ}\text{C}$ , lo que permite la separación de  $\text{CH}_4$  y del  $\text{CO}_2$ . Al inicio el gas es enfriado a  $-55^{\circ}\text{C}$  por intercambiadores de calor y en seguida se reduce la presión y la temperatura disminuye a  $-110^{\circ}\text{C}$ . Al final del proceso, la fase de gas contenido de metano de más de 97% se calienta antes de salir del sistema de tratamiento. Para evitar problemas como la congelación, se requiere previamente remover vapor de agua y sulfuro de hidrógeno. El tratamiento criogénico del gas comprende la rectificación (licuefacción de gases), que origina el  $\text{CO}_2$  líquido, así como la remoción a temperaturas bajas, que ocasiona la congelación del  $\text{CO}_2$ . Ambos procesos son muy complejos y exigen la desulfuración y el secado del gas previos a este proceso. Cabe aclarar que esos procesos no han sido probados en la práctica en aplicaciones con biogás. El mayor problema es el elevado consumo de energía; sin embargo, la elevada calidad del gas que se puede alcanzar y las pequeñas pérdidas de metano ( $<0.1\%$ ) justifican el futuro de esta moderna tecnología” (López et al., 2017, p. 130).

#### **2.1.5.2. Filtrado de $\text{H}_2\text{S}$**

Existen varios procesos mencionados anteriormente que remueven a la par el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , de estos procesos mencionaremos algunos de ellos y mostraremos otros en un cuadro resumen.

Figura 9: Tecnologías para la eliminación de sulfuro de Hidrógeno



Fuente: López (2017)

“Absorción con compuestos de hierro: Se utilizan limallas de hierro colocadas en columnas de purificación que se encuentran humedecidas de forma discontinua con agua y rellenas con otro material por ejemplo, el aserrín; para ayudar a la hidrodinámica del sistema. El proceso opera a distintas presiones, logrando eliminar eficientemente el H<sub>2</sub>S a temperatura ambiente o superiores, con un contenido de humedad de las limallas entre 30 y 60 %, debiendo realizarse la operación a pH entre 7,5 y 8,5. Es posible emplear óxido de hierro (III) hidratado para la purificación del biogás, adición de cloruro de hierro (III), utilización de pelets de hierro, utilización de residuos de la extracción de níquel, lavado con solución de hidróxido de sodio, así como también, otros sustratos “secos” tales como óxido de zinc, sólidos alcalinos, entre otros. También se ha utilizado hierro quelatado en fase líquida para la absorción del H<sub>2</sub>S presente en el biogás” (Morero, 2014, pp. 27-28).

“En el proceso de adsorción también llamados de lecho seco, se llevan sobre un material sólido fijo, los sólidos usualmente usados son carbón activado, sílicagel y tamices moleculares de zeolitas o tamices moleculares de carbón, la reacción puede verse afectado por la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas. En la actualidad las tecnologías más usada es el Pressure Swing Adsorption (PSA) y usa carbón activado así como zeolitas o ambos, los métodos de purificación por adsorción presentan la ventaja de ser muy efectivos en la reducción y remoción de contaminantes dejando purezas de hasta 95% de CH<sub>4</sub>, sin embargo presentan costos de operación altos, debido al consumo eléctrico de los compresores que alcanza presiones de 100 PSIG, por lo que su aplicación en países en vías de desarrollo se encuentra limitada” (Varnero et al., 2012, pp. 33-34).

“En el proceso por el método de filtración por membrana, el biogás se filtra a través de una membrana selectiva, debido a la fuerza motriz generada por la diferencia de presión, el factor determinante es la permeabilidad que poseen las moléculas que compone el biogás. Los materiales de las membranas son formulados especialmente para separar selectivamente determinados gases, principalmente CO<sub>2</sub> del CH<sub>4</sub> presente en el biogás, siendo la permeabilidad de la membrana una función directa de la solubilidad química del gas específico en la membrana. Las membranas usadas hasta el presente son muy frágiles y tienen poros excesivamente pequeños, por lo que se requiere que el gas de entrada a las membranas esté limpio de material particulado. Estos sistemas son caros y generalmente se consideran no adecuados para aplicaciones a pequeña escala, aunque se han obtenido buenos resultados en estudios a nivel piloto” (Varnero et al., 2012, p. 35).

### **2.1.5.3. Filtrado de H<sub>2</sub>O**

“El agua debe ser removido o eliminado del biogás para proteger así los componentes metálicos que vayan a estar en contacto, protegerlos de la corrosión; dentro de la diversidad de los procesos que se cuentan son secado por condensación, secado por absorción y secado por adsorción. En el proceso de secado por condensado, Éste es el proceso más utilizado y se basa en el principio de la remoción del condensado por enfriamiento del biogás debajo del punto de rocío. El secado del biogás es frecuentemente realizado en la tubería de gas. Si ésta es instalada con cierta inclinación, el condensado se recolecta en una trampa de goteo localizada en el punto más bajo de la tubería, aprovechando que en tuberías enterradas el enfriamiento es aún mayor. Para que el biogás pueda ser enfriado es necesario que la tubería de gas sea suficientemente larga. Además del vapor condensado, también se eliminan sustancias tales como gases solubles en agua. Ya que las trampas de goteo deben ser vaciadas en intervalos regulares, deben ser fácilmente accesibles y su instalación debe ser a prueba de congelación. Para el enfriamiento también se pueden usar un intercambiador de calor (agua fría como refrigerante), también comprimiendo el biogás previamente es más eficiente el proceso” (López et al., 2017, pp. 122-123).

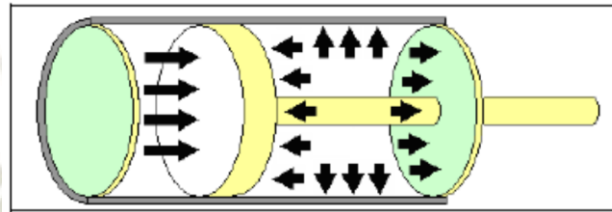
### **2.1.6. COMPRESIÓN DE GASES**

#### **2.1.6.1. Ley de Pascal**

Como Giles, et al. (1996), la operación de transmisión de energía a través de la compresión de fluido está compuesto por el principio enunciado de Pascal "La presión (P) ejercida por un fluido confinado opera en forma estática a todos los sentidos y direcciones con la misma intensidad, ejerciendo fuerzas iguales (F), en las mismas áreas (A) ".

Dónde la presión es igual es la fuerza dividida entre el área. La aplicación de esta fórmula para el caso de un cilindro en compresores recíprocos se ilustra en la siguiente figura donde se aprecia el principio de la transmisión de fuerzas en todo el émbolo.

Figura 10: La transmisión de fuerzas en el principio de Pascal.



Fuente: Giles (1996)

#### 2.1.6.2. Ecuación de Estado de Gas Ideal

“Cualquier ecuación que relacione la presión, la temperatura y el volumen específico de una sustancia se denomina ecuación de estado. Las relaciones de propiedades que comprenden a otras pertenecientes a una sustancia que se halla en estados de equilibrio, también se conocen como ecuaciones de estado. Hay varias ecuaciones de estado, algunas sencillas y otras muy complejas: la más sencilla y mejor conocida para sustancias en la fase gaseosa es la ecuación de estado de gas ideal, la cual predice el comportamiento P-V-T de un gas con bastante exactitud, dentro de cierta región elegida adecuadamente” (Cengel & Boles, 2011, p. 138).

La ecuación se muestra a continuación:

$$P = R\left(\frac{T}{V}\right)$$

Donde:

P: Presión Absoluta.

T: Temperatura Absoluta.

V: Volumen Específico.

R: Constante del Gas, diferente dependiendo del tipo de gas a usarse.

### 2.1.6.3. *Procesos de compresión de gases*

Durante estos procesos debemos asumir que el gas con el cual se trabaja está en estado de gas ideal, por lo cual el factor de compresibilidad Z debe ser igual a 1. Entre los tipos de compresor con el cual se trabaje, puede ser continuo (axiales, centrífugos) o intermitente (de desplazamiento positivo como reciprocantes o paletas deslizantes) y para su análisis común se realizará un artificio considerando un flujo promedio que ingresa durante todo el tiempo en el mismo estado para compresores intermitentes. Pudiendo realizar este análisis el trabajo realizado por el compresor se puede hallar mediante la fórmula:

$$w = \frac{n * R * T_1}{1 - n} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Donde:

w: Trabajo

n: Índice Politrópico

R: Constante del gas

T1: Temperatura Inicial

P1 t P2: Presión Inicial y Final respectivamente

En el caso de la potencia la podemos determinar como el producto de la masa aspirada por unidad de tiempo y por el trabajo efectuado sobre la sustancia de trabajo resultando en la siguiente formulación:

$$\dot{w} = \frac{n * p_1 * \dot{v}_1}{1 - n} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$\dot{w}$ : Potencia

$\dot{v}_1$ : Volumen aspirado por unidad de tiempo

Definir los procesos dentro de la compresión ayuda a poder realizar un buen análisis, estos procesos están determinados por el valor “n”; en el caso de procesos isoentrópicos en la compresión, el valor del índice politrópico en donde la transferencia del calor al exterior es nula y despreciable se determina siempre como una constante para el tipo de gas que se use tenía a “n” igual a “k”; en el caso de procesos isotérmicos que se da en compresores lentos con una refrigeración bastante capaz realizando el proceso a una temperatura constante, tenemos al índice politrópico “n” igual a 1.

#### **2.1.6.4. Compresión por etapas**

El trabajo de los compresores llega a ser mínimo cuando se mantiene a una temperatura constante, ósea en un proceso ideal isotérmico, pero la realidad en los compresores en un proceso real es que sean politrópicos y una de las formas de disminuir la magnitud del trabajo consiste en comprimir por etapas, teniendo una refrigeración intermedia entre etapa y etapa, dentro del análisis se tiene esta fórmula.

$$w = \frac{z * n * R * T_1}{1 - n} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{z*n}} - 1 \right]$$

w: Trabajo total de etapas

z: Numero de etapas

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL PARA LA EVALUACIÓN DE MCI

### 2.2.1. TEORÍA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

“El motor de combustión interna es el encargado de transformar la energía térmica que le proporciona el combustible en energía mecánica. Estos motores se llaman de combustión interna porque realizan su trabajo en el interior de una cámara cerrada mediante la aportación del calor producido al quemarse el combustible. En este caso la presión de los gases de la combustión y el calor generado en el interior, provocan el movimiento de un mecanismo que se aprovechara como fuente de energía” (Martinez 2004, p.8).

Estos motores en funcionamiento siguen un mismo principio y su desarrollo solo se da en actualizaciones o en algunas variantes que se realizan en el área de tecnología o diseño, trabajando en distintas aplicaciones, esto permite un uso extendido en diferentes ramas de la ingeniería. Existen diferentes motores de combustión conocidos como son Diesel y gasolina, estos con los gases resultantes de la combustión empujan un pistón haciendo que este pistón se desplace en el interior de un cilindro, esto transfiere la energía del movimiento a un cigüeñal y este a su vez al eje de salida; a continuación, describiremos su funcionamiento:

MOTOR A GASOLINA, “el motor convencional del tipo Otto es de cuatro tiempos, es decir, que el ciclo completo del pistón tiene cuatro fases; admisión, compresión, explosión y escape. La eficiencia de los motores Otto modernos se ve limitada por varios factores, entre otros la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración. En general, la eficiencia de un motor de este tipo depende del grado de compresión, la proporción entre los volúmenes máximo y mínimo de la cámara de combustión. Esta proporción suele ser de 7 a 1 o 10 a 1 en la mayoría de los motores Otto modernos. Se pueden utilizar

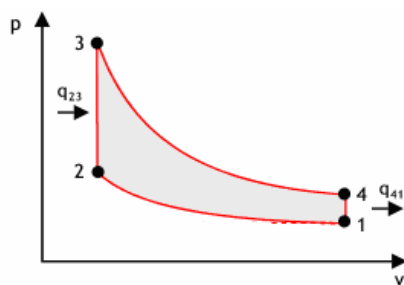
proporciones mayores, como de 12 a 1, aumentando así la eficiencia del motor, pero este diseño requiere la utilización de combustibles de alto índice de octano. La eficiencia media de un buen motor Otto es de un 20 a un 25% (o sea, que sólo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica)” (UTC, s.f., p.3).

MOTOR DIESEL; “el motor a Diésel tiene el mismo principio de funcionamiento que el motor a gasolina, con la diferencia que el encendido del combustible se produce debido a la alta temperatura generada por la compresión del aire en el cilindro (Ciclo Diésel)” (Ramirez, 2013, p.7).

En nuestro caso trabajaremos con el motor a gasolina (Otto) debido que es el que usaremos en nuestros ensayos para el motor del generador eléctrico; por lo cual hablaremos de su ciclo termodinámico.

“El ciclo otto generalmente está representado por el ciclo de aire estándar, que se considera un ciclo ideal, donde: el proceso 1-2 es una compresión isoentrópica del aire (1ª vez); en el proceso 2-3 se transfiere calor ( $q_{2-3}$ ) durante el encendido del combustible (cuando el pistón está en el PMS o punto muerto superior); en el proceso 3-4 hay una expansión isoentrópica y; en el proceso 4-1 hay rechazo de calor ( $q_{4-1}$ ), mientras que el pistón está en el PMI o punto muerto inferior (WYLEN et al, 1998). La figura 1.4 muestra el proceso descrito anteriormente” (Melegari, 2016, p.11).

Figura 11: Ciclo Otto



Fuente: Melegari (2016)

## 2.2.2. PARAMETROS DE DESEMPEÑO Y EFICIENCIA EN MCI

### 2.2.2.1. *Eficiencia de Motores de Combustión Interna*

La eficiencia también conocida como rendimiento indica un proceso de conversión o transferencia de energía y de manera general es representada por la salida que uno desea y la entrada que se requiera, esto se muestra en la siguiente formula:

$$\text{Desempeño} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Salida requerida}}$$

Donde

Desempeño: Eficiencia

Salida deseada: Potencia de la salida de motor o generador eléctrico

Salida requerida: Recurso disponible que genera la energía, en el caso de motores de combustión interna los combustibles.

La eficiencia puede ser mencionada en varios procesos y formas de conversión de energía, los ejemplos para el caso de equipos que usan combustible y transforman energía química en mecánica está basada en el Poder Calorífico del combustible. Por esto el desempeño del equipo que usa combustible puede estar caracterizado por la eficiencia de combustión en la siguiente formula:

$$n_c = \frac{Q}{PC}$$

$n_c$ : Eficiencia de combustión

Q: Calor liberada durante la combustión

PC: Poder Calorífico del combustible

“En un generador eléctrico existen muchos parámetros de por medio que caracterizan el proceso de conversión de energía, por un lado tenemos la antes mencionada eficiencia de combustión, por otro lado tenemos al generador que convierte

la energía mecánica del motor a energía eléctrica y su efectividad es caracterizada por la eficiencia del generador que es la relación entre la salida de potencia eléctrica y la entrada de potencia mecánica, también tenemos la eficiencia térmica del motor que se define como la relación entre la salida de trabajo neto de la turbina y la entrada de calor al fluido de trabajo; todas estas eficiencia más los efectos de otros factores se define una eficiencia global para el generador eléctrico que relaciona la salida neta de potencia eléctrica y la tasa de entrada de energía del combustible a usar con lo cual tenemos”: (Cengel, 2012, p.80).

$$\eta_{global} = \eta_{combustión} * \eta_{térmica} * \eta_{generador} = \frac{W_{neto\ eléctrico}}{\dot{m} * PC}$$

$\eta_{global}$ : Eficiencia Global

$\dot{m}$ : Flujo másico de combustible

PC: Poder Calorífico de combustible

W: Potencia eléctrica Neta

“Las eficiencias globales están entre 26 y 30% para motores de automóviles a gasolina, entre 30 y 40% para los de diesel y entre 40 y 60% para las grandes centrales eléctricas” (Cengel, 2012, p.80).

Actualmente siempre se busca más tecnologías que mejoren el rendimiento de los motores para poder aprovechar el mayor porcentaje de energía del combustible a usar, así como sea sustentable para el medio ambiente; por ello también los países tienen sus reglamentos en cuanto a emisiones vehiculares, exigiendo a los fabricantes de autos u equipos de motor de combustión interna poder cumplir con los límites normalizados.

#### **2.2.2.2. Consumo específico de combustible**

“El rendimiento efectivo que muchas veces se quiere hallar, nos sirve para evaluar la eficiencia de un motor, aunque existen otras formas de hallar el rendimiento que es el consumo específico; el consumo específico, se define como el consumo horario de combustible en relación a la potencia producida” (Payri, 2011, p. 63). se detona en la siguiente formula:

$$CE = \frac{\dot{m}_f}{W}$$

CE: Consumo específico de combustible (g/kWh)

$\dot{m}_f$ : Flujo másico de combustible (g/h)

W: Potencia en términos de energía (kW)

### 2.2.2.3. Presión media Efectiva

“Se denomina presión media indicada PME a aquella presión constante que durante la carrera de expansión produciría un trabajo igual al trabajo indicado efectivo” (Payri, 2011, p. 63). del cual la fórmula es la siguiente:

$$PME = \frac{W * n_R}{V_d * N}$$

PMI: Presión media Efectiva

W: Potencia del motor

$n_R$ : Número de revoluciones del motor por ciclo de combustión (1 para motores de 2 tiempos y 2 para motores de 4 tiempos).

$V_d$ : Volumen desplazado del pistón en el motor en cada ciclo.

N: Número de revoluciones del motor.

“Se muestra a continuación los valores orientativos de presión media efectiva máxima de distintos motores” (Payri, 2011, p. 63).

Tabla 3: Valores PME efectivos

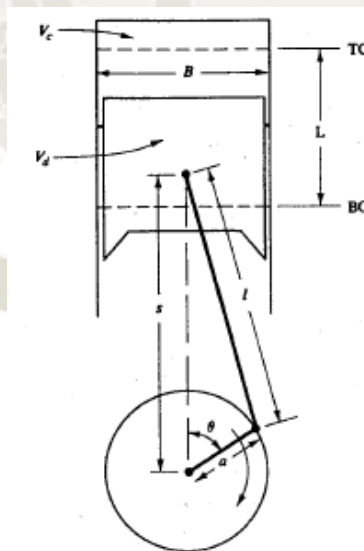
	MOTORES MEP	pme (bar)	MOTORES MEC	pme (bar)
4T	Competición	16	Automóvil	12
	Atmosféricos	13	Automóvil sobrealimentado	23
	Sobrealimentados	17	Industrial vehículo pesado	23
2T	2T pequeño tamaño	12	2T gran tamaño	25

Fuente: Payri (2011)

#### 2.2.2.4. Factores que influyen en la eficiencia

“RELACIÓN DE COMPRESIÓN es la relación entre el volumen total del motor y el volumen de la cámara de combustión, consecuentemente se puede ver que existe un desplazamiento del pistón en la cámara de combustión entre máximo y mínimo durante un proceso de combustión” (Sampaio, 2011, p.20).

Figura 12: Desplazamiento del cilindro en un motor



Fuente: Sampaio (2011)

Entonces la relación de compresión puede estar dada por la siguiente fórmula:

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

$r_c$ : Relación de compresión

$V_d$ : Volumen de desplazamiento del pistón

$V_c$ : Volumen de cámara o volumen muerto de motor

“Para el ciclo teórico con suministro de calor a volumen constante, la dependencia entre el rendimiento térmico y la relación de compresión se determina por la siguiente ecuación” (Jóvaj, 1982, p.183):

$$n_t = \frac{1}{r^{k-1}}$$

$n_t$ : Eficiencia térmica

$r$ : Relación de compresión

$K$ : Coeficiente de expansión adiabática

“La mejora de la eficiencia volumétrica en un motor de combustión interna tiene un efecto análogo al efecto de incrementar la relación de compresión, ya que, entre otros factores, es posible colocar más masa de aire para la misma relación de compresión. Como ejemplo, en algunos motores con sistema de turbocompresor, la relación de compresión nominal del motor es menor, ya que la eficiencia volumétrica se mejora con el sobre suministro de aire. El octanaje del combustible es un factor limitante para la relación de compresión del motor” (Sampaio, 2011, p.21).

Al usar otros combustibles como el biogás, se reduce este efecto ya que el combustible utiliza mayor cantidad de volumen por estar en un estado gaseoso, mientras que un combustible líquido como la gasolina ocupa menos volumen.

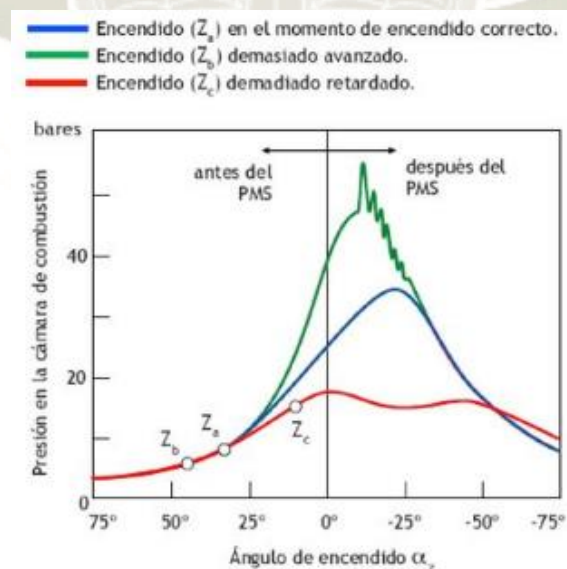
“ANGULO DE AVANCE DE ENCENDIDO, el punto de avance de ignición es el momento en que se produce el inicio de la combustión en los motores de ciclo Otto. Manteniendo constantes las cantidades de aire y combustible, se puede optimizar la

presión de combustión variando el punto de avance del encendido del motor en relación con el ángulo de giro del cigüeñal” (Sampaio, 2011, p.21).

“El ángulo de avance al encendido determina el desarrollo del proceso de combustión con respecto al PMS y en correspondencia con esto, la plenitud del aprovechamiento de calor caracterizado por el rendimiento indicado. Al cambiar el ángulo varían la temperatura, la presión y las condiciones de turbulización de la carga en el periodo en que se desarrolla el proceso de combustión. Siendo excesivo el incremento del ángulo de avance al encendido el proceso de combustión se va hasta PMS y al final del proceso de compresión se gasta cierto trabajo adicional” (Jóvaj, 1982, p.190).

A continuación, se llega a mostrar cómo es que adelantar o retrasar demasiado el ángulo de avance del encendido puede ocasionar diferentes problemas en el motor, esto se detalla en la siguiente figura:

Figura 13: Diferentes avances de encendido y presión en la cámara de combustión

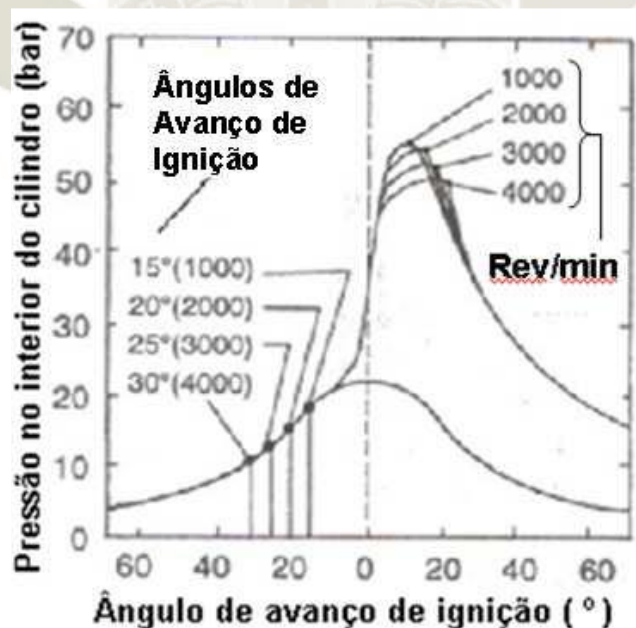


Fuente: Molina (2018)

De la imagen se puede entender que en Za se usa un ángulo de encendido correcto, mientras que en Zb existe un adelanto del punto de avance de encendido por lo cual surge un golpe en la cámara de combustión deteriorándola muy pronto, en Zc se observa que el ángulo de encendido está muy atrasado, por lo cual no genera una potencia eficiente.

En este mismo contexto, “a medida que aumenta la velocidad del motor, se debe corregir el punto de avance del encendido (generalmente hacia adelante) para aprovechar al máximo el trabajo del motor, en la siguiente figura se representa el comportamiento del avance de encendido según la velocidad del motor. Se observa que ocurren pocas variaciones en los valores de presión con la corrección del punto de avance de encendido” (Sampaio, 2011, p.22).

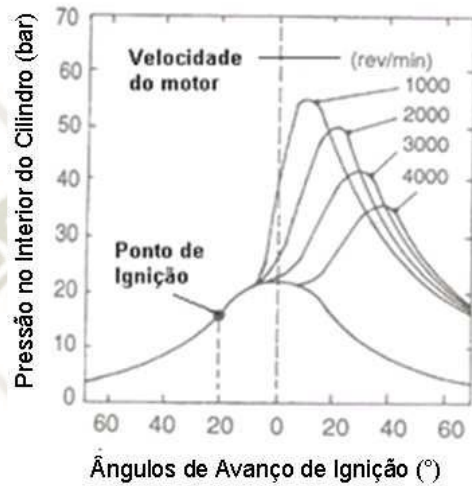
Figura 14: Variación del punto de avance de encendido según la velocidad del motor



Fuente: Heisler (1995)

Sin embargo, “el resultado del aumento de la velocidad del motor sin correcciones en los valores del ángulo de encendido. En este caso, se puede observar una gran disminución de presión dentro de la cámara de combustión”. (Sampaio, 2011, p.22).

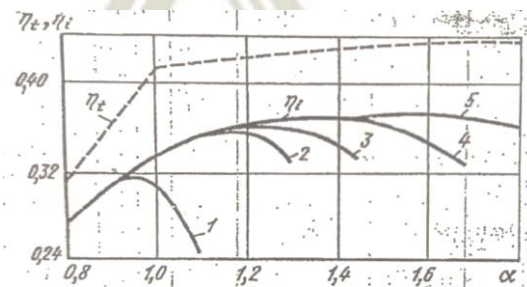
Figura 15: Comportamiento de la presión del motor según el ángulo de encendido



Fuente: Heisler (1995)

COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA, para el ciclo termodinámico con suministro de calor a volumen constante y fluido operante real, la variación del rendimiento térmico en función del coeficiente de exceso de aire lo podemos ver en la siguiente figura:

Figura 16: Relación entre los rendimientos indicados y térmico y el coeficiente



Fuente: Jójvaj (1982)

“En las zonas de mezclas ricas mayores ( $\alpha$  menor a 1) el rendimiento térmico  $\eta_t$  bruscamente decrece, lo que se explica por la disminución de la cantidad de calor

suministrado, ya que al disminuir el coeficiente de exceso de aire se incremente la diferencia entre la cantidad de calor suministrado y desprendido en el ciclo. Cuando la mezcla tiene una composición estequiométrica ( $\alpha$  es 1) el calor desprendido por ciclo es siempre prácticamente igual al suministrado. Al seguir empobreciendo la mezcla ( $\alpha$  es mayor a 1) la cantidad de calor suministrado, referida a la mezcla aire-combustible, disminuye y correspondientemente decrecen las temperaturas máximas del ciclo y de la expansión, así mismo el contenido relativo del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en los productos de combustión. Ambos factores disminuyen la capacidad calorífica del fluido operante y elevan el exponente adiabático medio de expansión  $k$ , por efecto de lo cual existen un crecimiento paulatino de  $n_t$  en la zona de  $\alpha$  es mayor a 1” (Jóvaj, 1982, p.187).

### 2.2.3. ASPECTOS TÉCNICOS MCI A BIOGÁS/BIOMETANO

#### 2.2.3.1. *Motores de Combustión a Biogás/Biometano*

“El biogás o biometano de por si consiste en una proporción variable de  $\text{CH}_4$  (metano) y  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) del cual se le llama biogás a la composición que tiene mas baja proporción de metano, entre 40 a 60% aproximadamente y se le llama biometano al que posee mayor cantidad de proporción de metano, entre 85% a 100%, el biometano pasa por un proceso de filtrado para reducir sus trazas y disminuir la cantidad de  $\text{CO}_2$ , esto permite obtener mayor energía a la hora de realizar la combustión en motores de combustión interna.

Existen algunos parámetros importantes en el proceso de combustión de un motor de combustión interna, uno de ellos es la inflamabilidad del  $\text{CH}_4$  en mezcla con el aire el cual en una combustión de da eventualmente entre 5 a 15% volumen de  $\text{CH}_4$  y 95 a 85% volumen en aire, en mezclas fuera de este rango no se llega a encender el motor

correctamente. También podemos mencionar la velocidad de combustión  $C_c$  en una mezcla de metano y aire a una presión de  $p=1\text{bar}$  como se detalla a continuación” (Mitzlaff, 1988, p.29).

$C_c=0.20\text{ m/s}$  al 7% de  $\text{CH}_4$

$C_c=0.38\text{ m/s}$  al 10% de  $\text{CH}_4$

$C_c=0.20\text{ m/s}$  al 13% de  $\text{CH}_4$

“Temperatura a la que el  $\text{CH}_4$  se enciende en mezcla con el aire es entre los  $645^\circ\text{C}$  Y  $750^\circ\text{C}$ , la relación de compresión de un motor llamado “e” a la que las temperaturas alcanzan valores suficientemente altos para autoignición en mezcla de aire es entre 15 a 20, como dato se tiene que el contenido de  $\text{CO}_2$  disminuye la inflamabilidad, es decir que aumenta el índice de compresión. El metano y en sí el biogás son muy estables frente a los “golpes” por tanto, pueden utilizarse en motores de relaciones de compresión más altas que los motores de gasolina. También la relación estequiométrica de aire / combustible en base a la masa a la que se completa la combustión de  $\text{CH}_4$  con aire, pero sin exceso de aire inutilizado es” (Mitzlaff, 1988, p.29).

$$\frac{m_{\text{CH}_4}}{m_{\text{air}}} = \frac{1\text{ kg CH}_4}{14.5\text{ kg air}}$$

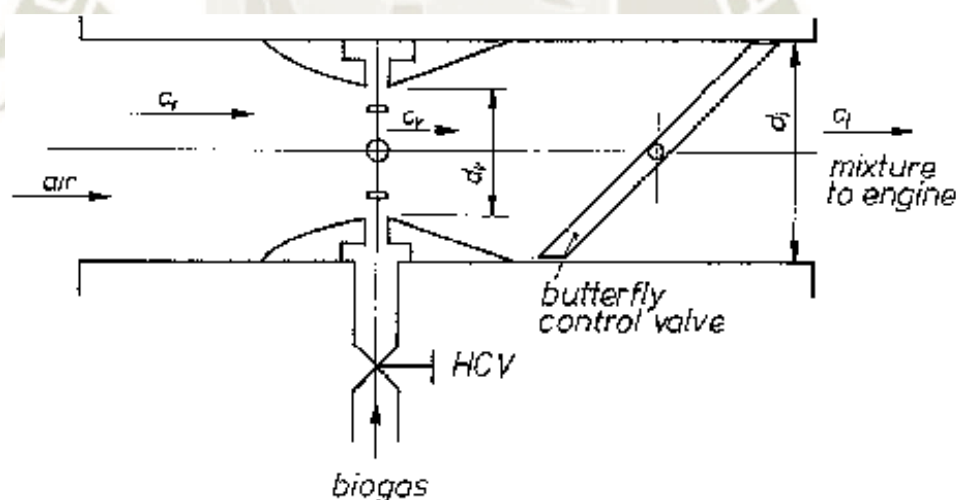
“Los biogases de diferentes materiales contienen diferentes porcentajes de sulfuro de hidrógeno  $\text{H}_2\text{S}$ , es decir entre 0,10 a 0.50% Vol (1000... 5000 ppm). Como el  $\text{H}_2\text{S}$  es corrosivo para los metales, especialmente en relación con agua o humedad, su contenido debe ser lo más bajo posible cuando se utiliza como combustible en motores. Algunos de los fabricantes de motores especifican un valor máximo permitido de 0,15% Vol; otros permiten más u otros no dan datos” (Mitzlaff, 1988, p.29).

### 2.2.3.2. Factores de conversión de Motores de Gasolina a Biogás/Biometano

Una parte importante de la conversión de motores por gasolina a Biogás/ Biometano es la admisión del combustible, en donde usualmente se realiza una serie de modificaciones para el ingreso de biogás, por lo cual tenemos las siguientes opciones importantes:

“MEZCLADOR VENTURI utiliza el mismo efecto mecánico de fluidos que un carburador estándar, es decir, el cambio de la cantidad y velocidad del flujo de aire provoca un cambio en la presión en la contracción del canal que a su vez efectúa un cambio en el flujo de otro medio (combustible) para unirse y mezclarse con el flujo de aire principal en la proporción requerida” (Mitzlaff, 1988, p.57).

Figura 17: Mezclador Venturi con suministro de gas



Fuente: Mitzlaff (1988)

El principio Venturi funciona para un caudal de aire elevado en donde el aire baja su presión en la sección contraída o estrangulada, entonces en esta sección estrangulada entra combustible a una presión alta ocasionando una diferencia de presión alta entre el aire y el combustible (biogás) y el gas empieza a fluir más rápido para así mezclarse con

el aire; en el caso de caudales bajos de aire, al entrar a la zona de estrangulamiento la presión baja pero en magnitudes pequeñas y cuando en la misma zona de estrangulamiento se encuentra con el combustible la diferencia de presión no es muy alta y fluye combustible de manera regular para mezclarse con la corriente de aire.

“CÁMARA DE MEZCLA SIMPLE o incluso un mezclador tipo tubo con junta en T pueden proporcionar una alternativa para una solución cuando el motor funciona de manera constante a una carga y una velocidad, es decir cuando la máquina accionada garantiza una demanda de potencia constante. Igualmente, importante es la calibración del suministro de aire y gas combustible. Debe tenerse en cuenta que incluso si el mezclador simple está correctamente calibrado o configurado en un punto de operación, un cambio en la demanda de energía de la máquina accionada cambiará la velocidad del motor, de ahí el volumen de admisión, y provocan una desproporción en la relación aire / combustible, a diferencia de un Venturi o válvula mezcladora de gas. Pueden ser aceptables pequeñas variaciones siempre que la máquina accionada tolere fluctuaciones de velocidad. En caso de grandes fluctuaciones en la demanda de energía, el control debe reajustarse en a su debido tiempo por parte del personal operativo, ya que el motor puede dañarse si funciona con una mezcla o en exceso de velocidad. Solo unas pocas aplicaciones pueden permitir el uso de dispositivos de mezcla simples bajo las limitaciones mencionadas como un generador eléctrico con una salida de potencia constante controlada de forma fiable y una red con una demanda correspondiente o una bomba centrífuga que suministra un caudal de agua constante contra una altura constante” (Mitzlaff, 1988, p.63).

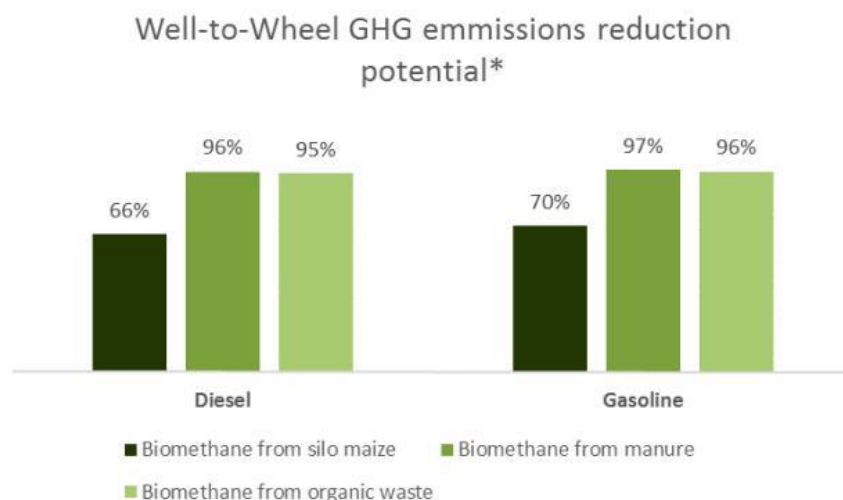
#### 2.2.4. EMISIONES DE MCI

“Hoy en día una parte importante del presupuesto de las industrias se destina a limitar el impacto medioambiental, bajo la presión bien de normativas aplicables al producto terminado o bien inspecciones sobre las propias instalaciones industriales. Por todo esto, la reducción del impacto medioambiental se ha convertido en uno de los principales objetivos de la investigación” (Payri, 2011, p.416).

“En la reacción de combustión completa de combustible, también conocida como teórica, los gases resultantes de la combustión son dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (generalmente en estado de vapor) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). En esta reacción, el único producto que preocupa desde el punto de vista ambiental es el  $\text{CO}_2$ , debido a los impactos sobre el efecto invernadero y el calentamiento global. Sin embargo, en las reacciones que ocurren en motores reales, también se forman otros gases, como monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarburos ( $\text{HC}$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), compuestos orgánicos volátiles ( $\text{COVs}$ ) y otros” (SAMPAIO, 2011, p.24).

“El biometano es un arma poderosa contra el cambio climático. La digestión anaeróbica de estiércol y materiales similares captura las emisiones de metano que son hasta 23 veces más dañinas que el  $\text{CO}_2$ . En ausencia de la tecnología del biogás, el metano se emite a la atmósfera debido a la descomposición del estiércol y los desechos, como lodos de depuradora, desechos municipales, efluentes agroindustriales y residuos agrícolas. Por lo tanto, las emisiones de  $\text{CO}_2$  de la quema de biometano son una pequeña fracción de las emisiones de metano evitadas de la descomposición del estiércol y los desechos. Como resultado, la huella de carbono total es muy baja, en comparación con sus equivalentes fósiles, como se muestra a continuación” (EBA, 2016, p.7).

Figura 18: Reducción de emisiones de biometano comparando diésel / gasolina



Fuente: EBA (2016)

“El biometano de cultivos energéticos puede ahorrar entre un 66% y un 70% en emisiones en comparación con los productos petrolíferos (como se muestra en la anterior figura) y más del 50% en comparación con la mezcla de combustibles fósiles de la UE, incluidos el carbón y el gas natural. Además, si los cultivos se co-digieren con estiércol, como suele ser el caso, los ahorros de GEI son significativamente mayores. Además de usar biometano puro en vehículos, una forma inteligente y rentable de reducir las emisiones de GEI para cumplir los objetivos nacionales es mezclándolo con gas natural. La combinación de los dos, incluso mediante el uso de una proporción baja de biometano a gas natural, puede dar como resultado un combustible que tiene emisiones sustancialmente más bajas que el gas natural. Por ejemplo, el uso de una mezcla con un 20% de biometano puede producir un ahorro de emisiones de GEI del 39% en comparación con la gasolina. Este es particularmente el caso cuando se usa biometano de desechos con emisiones de GEI muy bajas” (EBA, 2016, p.7).

#### **2.2.4.1. Tecnología de control de emisiones en MCI**

En el motor de combustión interna, la reducción de emisiones es tratada por medio de las tecnologías de control de emisiones por dispositivos de tratamiento posterior a la salida del motor, el desarrollo de estas tecnologías se ha convertido en el elemento fundamental para poder obtener el cumplimiento de la Euro 5 y 6, ya que es muy complejo por si solo poder disminuir las emisiones. Dentro de los diferentes sistemas, describiremos algunos ejemplos:

- **CATALIZADOR DE OXIDACIÓN:** “los catalizadores de oxidación tienen por objeto finalizar la oxidación del CO y de los HC sin quemar (especies contaminantes) para producir CO<sub>2</sub> (que es la especie deseada). Como efecto colateral, también terminan de oxidar el NO para dar NO<sub>2</sub>, pero hay que destacar que no reduce la emisión de NO<sub>x</sub>, sino que cambia el tipo de óxido de nitrógeno. Solamente funcionan en atmósferas con contenido en oxígeno. Los agentes catalizadores son el platino y el paladio. Hoy en día se utilizan en MEC de automoción y en MEP de carga estratificada para disminuir las emisiones de CO y HC, en ambos casos junto con el EGR, que es el sistema al que se le encomienda la reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub>. Asimismo, se instalan en algunos pequeños MEP de dos tiempos, para oxidar la gran emisión de hidrocarburos no quemados originados por el cortocircuito (ver renovación de la carga en motores de dos tiempos), así como para oxidar el CO. En estos MEP, los óxidos de nitrógeno no alcanzan mucha concentración, de nuevo, por la alta proporción de masa de cortocircuito” (Rovira, 2015, p.128).
- **FILTRO DE PARTÍCULAS:** “Este elemento, conocido como FAP, Filtro Anti Partículas, es una trampa que está ubicada en el escape del motor y que permite

- capturar las partículas sólidas que quedan tras la combustión en el motor. Estas partículas van acumulándose hasta que la centralita del coche determina que es el momento de destruirlas. La regeneración, que es como se llama a este proceso, se lleva a cabo cuando el filtro de partículas alcanza una temperatura de entre 500 y 750 grados centígrados, lo que produce la combustión de todas las partículas, destruyéndolas.” (Alós, 2018, p.1).
- REACTORES DE REDUCCIÓN CATALÍTICA (SCR): “se trata de un reactor químico, generalmente voluminoso, que tiene por objeto la reducción de óxidos de nitrógeno a nitrógeno molecular en atmósferas ricas en oxígeno. Como agentes catalizadores utilizan titanio (Ti) y vanadio (V). Para su funcionamiento requieren del consumo de amoníaco. Por su alta toxicidad y peligrosidad, se añade una fase previa de generación de amoníaco a partir de urea, que es el componente que se debe suministrar. Como ventaja tiene la reducción de óxidos de nitrógeno en atmósfera oxidante, por lo que sería viable para el uso con mezclas pobres. Sin embargo, su gran volumen y el consumo de urea (con su correspondiente depósito y recarga) lo desaconsejan para el uso en automoción. Se han empleado en motores diesel estacionarios y marinos, incluso de maquinaria agrícola, donde la legislación anticontaminante es exigente con los NOx pero no tanto con el CO y las partículas.” (Rovira, 2015, p.130).

#### 2.2.5. COMBUSTIBLES USADO EN MCI

“Los combustibles tradicionalmente utilizados por los motores alternativos son líquidos y proceden del petróleo, siendo por tanto de origen fósil. La gasolina, en el caso de los MEP, y el gasóleo, en el caso de MEC, constituyen los principales productos de

las refinerías propiedad de compañías petroleras. Su facilidad para el almacenamiento en condiciones ambientales y su gran densidad energética confieren al motor una gran autonomía y a su sistema de alimentación una relativa sencillez. Estas ventajas, junto con otras más específicas de cada tipo de motor, hacen que estos combustibles sean ventajosos para su consumo en motores de combustión interna alternativos en general, y en particular para su consumo en el sector de la automoción.” (Payri, 2011, p.390).

“Se puede evidenciar que el desarrollo de combustibles renovables como el biogás o el biometano no está muy desarrollado en nuestro país, por lo cual se necesita un impulso tecnológico para poder introducir este combustible en motores de combustión en el transporte, a continuación, se muestra la experiencia obtenida en la Unión Europea.

En el caso del uso de biometano como combustible, este se puede adaptar a las particularidades de vehículos muy diferentes. El biometano comprimido es un combustible renovable seguro, flexible y ampliamente disponible para automóviles privados y vehículos ligeros similares. El biometano licuado es más denso en energía y, por lo tanto, es óptimo para impulsar motores grandes (tanto en la carretera como en el mar) para largas distancias con un espacio de almacenamiento y un peso mínimos. El biometano tiene las mismas propiedades que el gas natural y, por tanto, puede mezclarse, almacenarse y transportarse a grandes distancias dentro de la UE a un coste muy bajo y con pérdidas mínimas. La UE está comprometida a integrar aún más las redes de gas natural de los estados miembros individuales. Esto aumentará la posibilidad de almacenar y distribuir biometano, impulsando el potencial comercial de este combustible sostenible” (EBA, 2016, p.9). Esta experiencia del biometano o biogás usado en la Unión Europea para vehículos de transporte está muy bien desarrollada debido a la tecnología usada en estos países.

### 2.2.5.1. Propiedades de los combustibles

DENSIDAD: (P) “es la masa por unidad de volumen del fluido. Incluso si el combustible es líquido, su densidad depende ligeramente de la presión y en mayor medida de la temperatura. La densidad de algunos combustibles se muestra en la Tabla 14.2. La mencionada dependencia, y las habituales dispersiones de densidad entre combustibles líquidos suministrados por diferentes compañías, justifican la necesidad de utilizar sistemas gravimétricos en vez de volumétricos cuando pretende medirse con precisión el consumo de combustible de una máquina térmica” (Payri, 2011, p.401).

Tabla 4: Densidades de combustibles líquidos a 15°C y viscosidad 40°C

Combustible	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) a 15°C	$\nu$ (cSt) a 40°C
Metanol	791,3	0,58
Etanol	789,4	1,13
Butanol	809,7	2,22
MTBE	745	0,48
ETBE	747	0,54
DME	667	<0,1
Gasolina	720-775	0,65
Queroseno	775-840	1,8*
Gasoil	820-845	2-4,5
Fuel-oil	920-950	100-1000
BioDiesel (FAME)	860-900	3,5-5
Fischer-Tropsch Diesel	770-800	2-4,5
n-Dodecano	750	0,36

\* Valor típico (la norma ASTM D1655 exige <8 cSt a -20°C)

Fuente: (Payri, 2011)

PODER CALORÍFICO: “Las eficiencias de los motores de los automóviles se basan en poderes caloríficos más bajos, ya que normalmente el agua sale en forma de vapor en los gases de escape y no es práctico intentar recuperar el calor de vaporización. Dado que la mayoría de los combustibles son mezclas de hidrocarburos, el hidrógeno del

combustible forma agua cuando se quema. Dependiendo si el agua presente en los productos de combustión está en estado líquido o vapor, el poder calorífico tendrá valores diferentes. Se denomina poder calorífico inferior, PCI, cuando el agua se libera en forma de vapor y poder calorífico superior, o PCS, cuando el agua de los gases de combustión está completamente condensada; en este caso, también se recupera el calor de vaporización. La diferencia entre los dos valores caloríficos es igual al producto entre la cantidad de agua y la entalpía de vaporización del agua a temperatura ambiente. Una forma más práctica de obtener información realista sobre el menor poder calorífico del combustible es mediante pruebas de combustible en calorímetros” (Sampaio, 2011, p.37).

Tabla 5: Propiedades de algunos combustibles

Combustible (fase)	Fórmula	Masa molar, kg/kmol	Densidad, <sup>1</sup> kg/L	Entalpía de vaporización, <sup>2</sup> kJ/kg	Calor específico, <sup>1</sup> c <sub>p</sub> , kJ/kg · K	Poder calorífico superior, <sup>3</sup> kJ/kg	Poder calorífico inferior, <sup>3</sup> kJ/kg
Acetileno (g)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Benceno (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Butano (ℓ)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
Carbono (s)	C	12.011	—	2	0.708	32,800	32,800
Decano (ℓ)	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Diesel ligero (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.8n</sub>	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Diesel pesado (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.7n</sub>	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Etano (g)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Etanol (ℓ)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Gas natural (g)	C <sub>n</sub> H <sub>3.8n</sub> N <sub>0.1n</sub>	18	—	—	2	50,000	45,000
Gasolina (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub>	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Heptano (ℓ)	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Hexano (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexeno (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Hidrógeno (g)	H <sub>2</sub>	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Isopentano (ℓ)	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Metano (g)	CH <sub>4</sub>	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Metanol (ℓ)	CH <sub>4</sub> O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Monóx. de carbono (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Octano (ℓ)	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
1-Penteno (ℓ)	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Propano (ℓ)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Tolueno (ℓ)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500

<sup>1</sup>A 1 atm y 20°C.

<sup>2</sup>A 25°C para combustibles líquidos, y 1 atm y temperatura normal de ebullición para combustibles gaseosos.

<sup>3</sup>A 25°C. Multiplique por la masa molar para obtener los valores caloríficos en kJ/kmol.

Fuente: Cengel (2011)

Existe una serie de características que describen el comportamiento de un combustible frente a la combustión o durante ésta. Pueden destacarse las siguientes:

- “Límites de inflamabilidad. Existen dos para cada combustible: el superior y el inferior, si bien son dependientes de la presión y de la temperatura. Una llama

puede progresar siempre y cuando su relación de mezcla combustible vaporizado/aire esté comprendida entre el límite inferior ( $L_i$ ) Y el superior ( $L_s$ ) de inflamabilidad. Fuera de los límites la llama se acaba extinguiendo. En la siguiente tabla se muestra algunos límites de inflamabilidad en aire de varios combustibles a 20°C y 1 atm. Puede observarse que el rango de inflamabilidad del hidrógeno es muy amplio debido a su gran difusividad, que la inflamabilidad de los combustibles oxigenados se extiende notablemente para mezclas ricas y que los grados de ramificación o de insaturación de los combustibles hacen que éstos sean más inflamables.

Tabla 6: Propiedades de algunos combustibles

Combustible	Relaciones másicas aire/combustible		
	$L_i$	Esteq.	$L_s$
Metano	34,4	17,3	10,3
Metanol	12,6	6,5	1,6
Etanol	18,5	9,0	2,7
Propano	30,7	15,7	5,9
n-Octano	26,5	15,1	7,7
isooctano	31,9	15,1	4,0
Gasolina	18,2	14,6	3,1
Hidrógeno	348	34,5	4,8
CO	7,6	2,5	0,35
Acetileno	43,5	13,3	0,26

Fuente: Payri (2011)

- Temperatura de inflamabilidad (Flash point). Es la mínima temperatura a la que existe peligro de inflamación de un combustible ante la proximidad de un agente exterior, a presión ambiental. Es importante por razones de seguridad para el transporte y almacenamiento de combustibles.

- Temperatura de autoinflamación. Es la mínima temperatura a la que un combustible se auto inflama al entrar en contacto con el aire. Depende de la presión y de la relación de mezcla, por lo que no es una característica fisicoquímica del combustible” (Payri, 2011, p.403).

#### **2.2.5.2. Biogás/Biometano**

“El biogás se origina a partir de bacterias en el proceso de biodegradación de material orgánico bajo condiciones anaeróbicas. Consiste en una proporción variable de CH<sub>4</sub> (metano) y CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y trazas de H<sub>2</sub>S, N, CO, O, etc. La parte útil de la energía del biogás es el poder calorífico en su contenido de CH<sub>4</sub>. Los otros componentes tienen estrictamente un contenido de energía también, pero no participan en un proceso de combustión. En lugar de contribuir, absorben energía de la combustión del CH<sub>4</sub> ya que suelen dejar un proceso a una temperatura (escape) superior a la que tenían antes del proceso (principalmente temperatura ambiente)” (Mitzlaff, 1988, p.23).

Los siguientes son los parámetros termodinámicos del CH<sub>4</sub> en condiciones estándar ( 273 K, 1013 mbar = 0,1013 MPa) son:

- Calor específico  $c_p = 2.165 \text{ kJ / kg K}$ ,
- Masa molar  $M = 16.04 \text{ kg / kmol}$ ,
- Densidad  $\rho = 0,72 \text{ kg / m}^3$ ,
- constante de gas individual  $R = 0.518 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}$ ,
- Poder calorífico Inferior  $H_u = 50000 \text{ kJ / kg}$ .

Tabla 7: Composición de biogás derivado de diferentes fuentes

Biogás	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>
Desechos agrícolas	50 - 80	30 - 50	saturación	0 - 2	100 - 7000ppm	trazas
Lodos cloacales	50 - 80	20 - 50	saturación	0 - 5	0 - 1%	trazas
Aguas cloacales	61 - 65	36 - 38			b.d.	
Aguas cloacales	57,8	38,6			62,9ppm	
Aguas cloacales	62,6	37,4			n.a.	
Aguas cloacales	58	33,9			24,1ppm	
Desechos industriales	50 - 70	30 - 50	saturación	0 - 2	0 - 8%	trazas
Rellenos sanitarios	45 - 65	34 - 55	saturación	0 - 1	5 - 100ppm	trazas
Rellenos sanitarios	41,2 - 60 (53,4)	30,9 - 46,1 (40,7)			4,0 - 99ppmv (30ppmv)	
Rellenos sanitarios	47 - 57	37 - 41			36 - 115ppm	
Rellenos sanitarios	59,4 - 67,9	29,9 - 38,6			15,1 - 427,5ppm	
Rellenos sanitarios	37 - 62	24 - 29			n.a.	
Rellenos sanitarios	55,6	37,14			n.a.	
Rellenos sanitarios	44	40,1			250ppm	
Tambos	55 - 58	37 - 38			32 - 169ppm	
Propiedades del compuesto	combustible	ácido, asfixiante	corrosivo	combustible	corrosivo, olor, tóxico	corrosivo

Fuente: Morero (2014)

### 2.2.5.3. Gasolina

“La gasolina o gasohol es la mezcla que contiene gasolina (de 97, 95, 90, 84 octanos y otras según sea el caso) y Alcohol Carburante” (Osinermin, 2011, p.9).

“El gasohol es la combinación de gasolina y alcohol, que hace varios años se empezó a utilizar en el país como reemplazo a la gasolina convencional, con el fin de reducir las emisiones contaminantes y el uso del petróleo. La gasolina que se vende en el país está constituida en un 7.8% de alcohol etílico o etanol y el resto de gasolina. Según José San Martín, docente de mecánica automotriz de Idat, el objetivo es contaminar menos el medio ambiente, pues el alcohol con el que está constituido este combustible, no contamina. En un lenguaje más técnico, el beneficio de utilizar gasohol, es que los gases de combustión del etanol producen menos anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), un gas

tóxico que genera el calentamiento global. El etanol tiene 31% menos de energía que la gasolina, por lo que hay una pérdida de potencia, pero debido a que solo es aplicable a 7.8% del combustible, la pérdida se reduce a 2.4%. El octanaje del alcohol es de 130, lo que permite subir la compresión de los motores y aumenta la potencia para compensar su menor contenido de energía” (Alvarado, 2016, p.1).

Tabla 8: Especificaciones técnicas Gasolina 90 octanos

ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO	
	MIN.	MAX.	ASTM	OTROS
<b>APARIENCIA</b>	Transparente			Visual
Color comercial	Violeta (b)			Visual
<b>VOLATILIDAD</b>				
Gravedad API a 60°F	Reportar		D-1298, D-4052	IP-160, IP-365
Destilación, a 760 mm Hg, °C			D-86, D-7096, D-7345	IP-123
Punto inicial de ebullición	Reportar			
5 %V recuperado	Reportar			
10 %V recuperado	70			
20 %V recuperado	Reportar			
50 %V recuperado	140			
90 %V recuperado	200			
95 %V recuperado	Reportar			
Punto final de ebullición	221			
Recuperado, %V	96.0			
Residuo, %V	2.0			
Pérdida, %V	Reportar			
Relación vapor/líquido = 20, °C	56 (c)		D-5188, D-4814	
Presión de vapor, KPa (psi)	69 (10)		D-323, D-4953, D-5191, D-5482, D-6378	IP-69, IP-394
<b>CORROSIVIDAD</b>				
Corrosión lámina de cobre, 3h, 50°C, N°	1		D-130	IP-154
Azufre total, % masa	0.1		D-2622, D-4294, D-5453	IP-107, IP-336
<b>ANTIDETONANCIA</b>				
Número de octano Research	90.0		D-2699	
<b>ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN</b>				
Periodo de inducción, minutos	240		D-525	IP-40
<b>CONTAMINANTES</b>				
Gomas lavadas, mg/100mL	5.0		D-381	IP-131
Plomo, g/L	0.013		D-3237, D-5059	IP-428
<b>OBSERVACIONES:</b>				
(a) En concordancia con la Norma Técnica Peruana vigente y con los ensayos del estándar ASTM D-4814				
(b) Uso de colorante con fines de identificación. La Gasolina 90 Octanos de la Refinería Selva es Verde				
(c) Si no se dispone del equipo, calcular mediante el Apéndice X2 del ASTM D-4814.				
<b>NOTA:</b> A la Gasolina 90 Octanos se le añadirá 7.8% en volumen de Alcohol Carburante, en las Plantas de Ventas de destino, de conformidad al cronograma establecido en el D.S. 021-2007-EM y modificatorias, dando como resultado el Gasohol 90 Plus				

Fuente: Petroperú (2014)

## CAPÍTULO 3

### 3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OTTO

#### 3.1. APARATO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1. GRUPO MOTOR GENERADOR

El generador que ha sido utilizado en estas pruebas fue un Grupo motor generador a gasolina, del cual el motor es un OTTO marca GENERAC modelo GP 7500E.

Para realizar estas pruebas con los diferentes combustibles propuestos, se adaptó un motor con un KIT de conversión a Gas Natural, asimilando las propiedades del Gas Natural al del Biogás o Biometano que podrán ser usados en estas pruebas, también se adaptó un KIT de GLP; entender también que el generador puede ser transportable de un lugar a otro y que tiene adaptabilidad para distribuir energía a 120V y 240V; así como el tiempo de funcionamiento de este generador al 50% de carga es de 9.5 horas a 11 horas.

Figura 19: Generador GENERAC GP 7500E



Fuente: Propia

A continuación, presentaremos las especificaciones del motor proporcionado por el fabricante del motor y que será utilizado como referencias en aquellos datos que sean necesarios en el proyecto.

Tabla 9: Características del Grupo Motor-Generador

**GENERAC GP 7500E**

<b>N° de Cilindros</b>	2 cilindros en V
<b>Desplazamiento (cc)</b>	420
<b>Max. Potencia de Salida</b>	7500 W
<b>Max. Torque</b>	60 Hz a 3600 RPM
<b>Número de octano de combustible</b>	90
<b>Grado de aceite</b>	SAE 30

Fuente: Generac (2015)

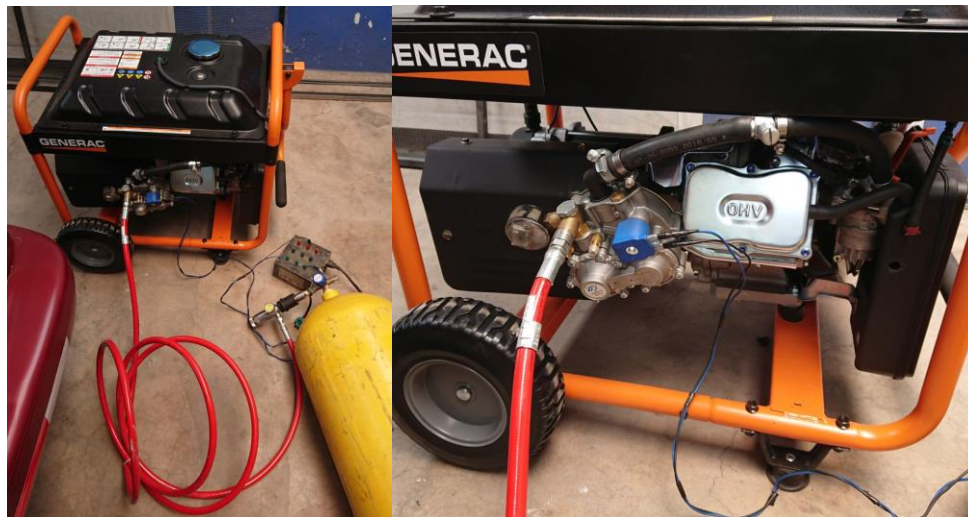
Un parámetro importante a medir es la curva de rendimiento, que será elaborado de manera experimental, ya que esta curva de rendimiento no es proveída por el fabricante en su manual, por lo cual se elaboró esta curva para ser comparadas con los rendimientos de otros combustibles a experimentar.

Este equipo es un equipo nuevo, por lo cual los mantenimientos en este caso no van a ser necesarios para el generador, más cabe recalcar que este equipo posee un plan de mantenimiento realizado por la empresa proveedora para sus próximos mantenimientos a realizar.

La conversión por el Kit de Gas Natural fueron realizados por la empresa OCM Autogas, la cual se encargó de dicha instalación e implementación del módulo de pruebas del Grupo generador con sus respectivos accesorios externos a implementar; este KIT modular por su parte, posee un tanque de almacenamiento a 200 bar, mangueras flexibles, acoples, un reductor de presión para reducir aproximadamente a los 0.5 bar de

presión, kit carburador, mezclador, accesorios de fijación; todo ello será instalado e implementado por la empresa ya mencionada.

Figura 20: Implementación del Kit de Gas Natural



Fuente: Propia

La conversión por el Kit de GLP fue realizada por la empresa Autogás en Arequipa; la empresa realizó la instalación de todos los componentes, accesorios y regulaciones para poder usar GLP en el motor del generador.

Figura 21: Implementación del Kit de GLP



Fuente: Propia

### 3.1.2. COMBUSTIBLES A USAR

Los combustibles a usar para las pruebas se dividen en combustibles líquidos como el Gasohol 90 Octanos a usar y combustibles gaseosos como son en GLP así como el biometano (biogás purificado) con un porcentaje de metano del 80 al 90 %; todo ello será descrito de manera particular por cada combustible a continuación.

#### 3.1.2.1. Gasohol 90 Octanos

“El Gasohol de 90 octanos usada en este proyecto puede ser conseguido en cualquier grifo local autorizado, la característica de este producto es que contiene 92.2% de gasolina base y 7.8% de alcohol carburante (Etanol anhidro desnaturalizado)” (Osinergmin, 2011); en porcentaje volumétrico a continuación mostramos las propiedades físico-químicas de la gasolina y el etanol:

Tabla 10: Propiedades Físico-químicas Gasolina y Etanol

PROPIEDADES	GASOLINA	ETANOL
Formula Molecular	C4-C12	C2H5 OH
Composición (C;H;O) en % masa	86; 14; 0	52; 13; 35
Solubilidad en agua a 20°C (ml/100 ml de agua)	<0,1	Miscible
Poder Calorifico Inferior (MJ/Kg)	42,9	26,8
Densidad a 20°C (Kg/m3)	736	790
Punto de ebullición °C	25 a 215	78
Relación estequiométrica aire/combustible	14,7	9
Calor Latente de vaporización (KJ/Kg)	380-500	904
Indice RON	95/98	120/135
Indice MON	85/90	100/106

Fuente: Quispe (2016)

#### 3.1.2.2. Gas Licuado de Petróleo (GLP)

“El gas licuado de petróleo (GLP) es una mezcla de gases, cuyos componentes principales son el propano y el butano. Estos gases a condiciones ambientales normales

se encuentran en fase gaseosa, pero son fácilmente condensables bajo presiones moderadas. En el Perú se comercializa GLP en las siguientes proporciones: 40/60, 50/50, 60/40, 70/30 y 80/20 (cada una representa la proporción entre propanos y butanos respectivamente). De estas las más usadas comercialmente para el uso doméstico y vehicular son las mezclas de GLP 70/30 y de GLP 60/40” (Bisso, 2015, p. 7).

En nuestra investigación usaremos la mezcla gaseosa del 70% de propano y 30% de butano, que es una mezcla muy comercialmente usada en el país.

Tabla 11: Propiedades del GLP

Nombre Alternativo		Propano Puro	Mezcla Comercial				Butano Puro
Número de Fórmula		1	2	3	4	5	
<b>INSPECCIONES</b>	Unid.	<b>CARACTERÍSTICAS DE MEZCLAS</b>					
<b>COMPOSICION (%Vol.)</b>							
Propanos	%	100.00	75.00	<b>70.00</b>	65.00	0.00	
Butanos	%	0.00	25.00	<b>30.00</b>	35.00	100.00	
<b>COMPOSICION (%Mol.)</b>							
Propanos	%	100.00	77.46	<b>72.77</b>	68.02	0.00	
Butanos	%	0.00	22.54	<b>27.23</b>	31.98	100.00	
<b>COMPOSICION (%Peso)</b>							
Propanos	%	100.00	72.27	<b>66.97</b>	61.74	0.00	
Butanos	%	0.00	27.73	<b>33.03</b>	38.26	100.00	
<b>PROPIEDADES FÍSICO/QUÍMICAS</b>							
Presión de Vapor a 37.8 °C debe ser absoluta	Psig	208	183	<b>176</b>	168	70.00	
Presión de Vapor a 37.8 °C	kg/cm2	14.62	12.87	<b>12.37</b>	11.81	4.92	
Presión de Vapor a 15.0 °C	Psig	107.00	87	<b>83</b>	79	25	
Presión de Vapor a 15.0 °C	Barg	7.38	6.00	<b>5.72</b>	5.45	1.72	
Presión de Vapor a 0.0 °C	Psig	70.00	56	<b>53</b>	50	15	
Peso Molecular	g/mol	44.097	47.604	<b>48.305</b>	49.006	58.123	
Punto de Ebullición @ 1 Atm	°C	-42.1	-31.7	<b>-29.6</b>	-27.5	-0.5	
Punto de Ebullición @ 1 Atm	°C	-42.1	-31.6	<b>-29.5</b>	-27.4	-0.5	
<b>Líquido:</b>							
Gravedad Específica @ 60/60°F (Agua=1)	---	0.5083	0.5274	<b>0.5312</b>	0.5350	0.5847	
Factor de Conversion @ 60°F	kg/gal	1.9239	1.9962	<b>2.0107</b>	2.0251	2.2131	
Densidad @ 60°F	lbs/gal	4.2265	4.3871	<b>4.4192</b>	4.4513	4.8689	
Volumen Específico @ 60°F	bbl / TM	12.42	11.96	<b>11.88</b>	11.79	10.78	
Densidad @ 15 °C	kg/gal	1.922	1.995	<b>2.009</b>	2.023	2.211	
Densidad Absoluta @ 15 °C (en Vacío)	kg/m3	507.80	526.90	<b>530.72</b>	534.54	584.20	
Densidad Aparente @ 15 °C (en Aire)	kg/m3	506.70	525.80	<b>529.62</b>	533.44	583.10	

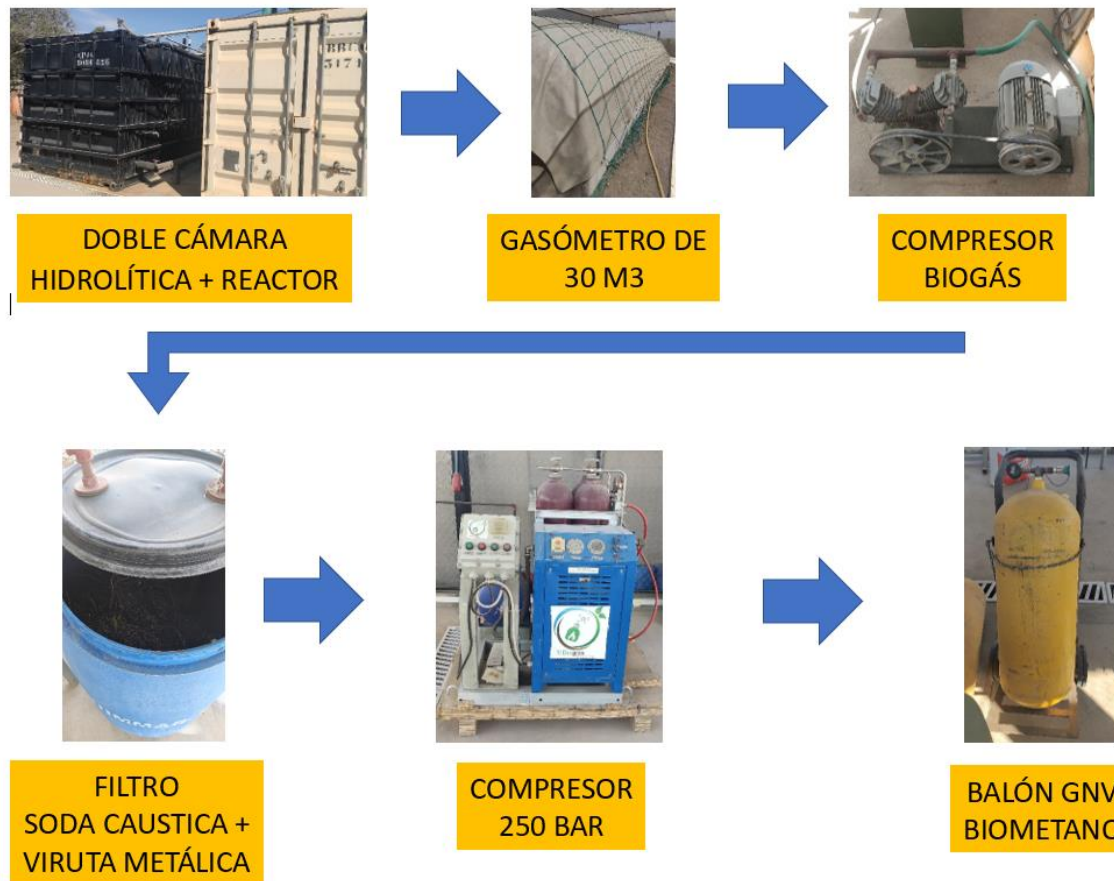
Nombre Alternativo		Propano Puro	Mezcla Comercial		Butano Puro	
		1	2	3	4	5
<b>Número de Fórmula</b>		1	2	3	4	5
<b>Vapor:</b>						
Densidad Relativa (Aire = 1,225 kg/m <sup>3</sup> )	---	1.5224	1.6435	<b>1.6677</b>	1.6919	2.0067
Densidad @ 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	1.8650	2.0133	<b>2.0429</b>	2.0726	2.4582
Densidad Ficticia (ds)	---	1.1600	1.2300	<b>1.2440</b>	1.2580	1.4400
<b>INFLAMABILIDAD</b>						
Límite Inferior (LEL), %	-					
Vol. Aire	%	2.00	1.88	<b>1.85</b>	1.83	1.50
Límite Superior (UEL), %						
Vol. Aire	%	9.50	9.38	<b>9.35</b>	9.33	9.00
<b>COMBUSTION</b>						
Volumen Aire/Gas para combustión (Ideal)	-	23.86	25.65	<b>26.01</b>	26.37	31.02
Poder Calorífico (PCS)	BTU / kg	47,375	47,180	<b>47,141</b>	47,102	46,596
Poder Calorífico (Vapor @ 15°C) (PCS)	BTU / m <sup>3</sup>	88,353	94,987	<b>96,307</b>	97,625	114,544
Poder Calorífico (Líquido @ 60°F)	BTU / gal	90,823	93,845	<b>94,449</b>	95,053	102,909
Poder Calorífico (PCI)	Kcal / kg	11,944	11,894	<b>11,884</b>	11,873	11,741
Poder Calorífico (PCS)	Kcal / gal	22,960	23,711	<b>23,862</b>	24,012	25,965
<b>OCTANAJE</b>						
M.O.N. Número de Octano Motor		97.1	95.2	<b>95</b>	94	89.6
R.O.N. Número de Octano de Investigación		112.0	107.8	<b>106.9</b>	106.1	95.0
<b>USOS</b> (Norma ASTM D-1835-91)		Industrial - Domestico - Comercial				
<b>Clima</b> (Norma ASTM D-1835 - 91)		Frío	Frío	<b>Frío</b>	Frío	Cálidos
<b>Requisito de Combustible</b> (Norma ASTM D - 1835 - 91)		Alta	Alta	<b>Alta</b>	Moderado	Baja
		Volatilidad	Volatilidad	<b>Volatilidad</b>	Volatilidad	Volatilidad

Fuente: Bisso (2015)

### 3.1.2.3. Biometano

El biometano es en realidad el biogás, pero purificado, por medio de la reducción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y H<sub>2</sub>O para completar su purificación y dejar al biogás entre 75% a 95% de metano; al final el biogás toma el nombre de Biometano; se usa en diferentes procesos de purificación del biogás los cuales se detallan en la siguiente imagen:

Figura 22: Proceso de obtención de biometano Majes



Fuente: Propio

Actualmente se obtiene Biometano en la planta de Majes a alta presión con la siguiente composición en volumen tomada con el instrumento Hermann Analizador de gases HGA 400 que mide CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en porcentaje de volumen de los cuales nos da:

Tabla 12: Composición de Biometano - Fundo de Majes UCSM

COMPONENTE	CANTIDAD	UNIDAD
Metano (CH <sub>4</sub> )	75.50%	Volumen
Dioxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	17.80%	Volumen
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	6.70%	Volumen

Fuente: Propio

Al tener estos valores, se pueden apreciar a continuación algunas características físicas importantes de los componentes del biometano los cuales son mostrados a continuación:

Tabla 13: Características generales de los componentes del Biometano

	Unidad	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Valor calórico superior	kWh/m <sup>3</sup>	11,1	–	–
Valor calórico inferior	kWh/m <sup>3</sup>	10	–	6,3
Límite de explosión	Vol.-%	4,4-16,5	–	4-45
Temperatura de ignición	°C	595	–	270
Presión crítica	bar	47	75	89
Temperatura crítica	°C	–82,5	31	100,4
Densidad normativa ρ	kg/m <sup>3</sup>	0,72	1,98	1,54
Densidad relativa de aire ρ	–	0,55	1,5	1,2
Índice de Wobbe W S/N	kWh/m <sup>3</sup>	14,9	–	–
Número de metano	–	100	–	–
Velocidad de llana	cm/s	43	–	73

Fuente: Análisis de tecnologías de purificación de Biometano (2016)

Añadir que el metano CH<sub>4</sub> posee un PCI de 50032 KJ/Kg Payri (2011), esta especificación es realizada para futuros cálculos para los PCI.

### 3.2. METODOS Y MATERIALES DE ENSAYO

#### 3.2.1. RENDIMIENTO DE MOTORES

En primera instancia, para medir el rendimiento de potencia del motor de combustión interna del automóvil, es necesario de un dinamómetro, el cual debido a su altísimo costo y su la dificultad que se obtuvo al buscar este equipo en la ciudad de Arequipa, no se pudieron sacar datos estadísticos del rendimiento de dicho motor, por lo cual en este proyecto se realizó la medida de potencia del Grupo Motor Generador por

medio de un módulo de focos eléctricos que consumen por cada uno de ellos de 100 a 200 W; por medio de ello y con la ayuda de un multímetro se podrá medir la potencia eléctrica consumida a diferentes cargas como son 1 KW, 2 KW, 3 KW, 4 KW, 5 KW, las cuales me podrán mostrar el rendimiento del motor Otto utilizado.

Figura 23: Modulo de Focos



Fuente: Propia

### 3.2.2. MEDICIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Para verificar el consumo de combustible que se tuvo en cada uno de las pruebas y también en el rendimiento diario del motor se recolectaron datos de diferentes instrumentos de medición usados.

Para el combustible gaseoso (Biometano, Gas Licuado de Petróleo), se usó un flujómetro, que nos permitió obtener datos del flujo durante las pruebas realizadas al motor; las conexiones de mangueras se modificaron y adaptaron para acoplar el flujómetro que nos medirá el consumo del biometano; todo ello ayudará a poner obtener datos del consumo específico de cada combustible a usar a la par con su eficiencia.

Figura 24: Flujómetro



Fuente: Propia

Para el combustible líquido (Gasolina), se usó una balanza, que nos permitió obtener los datos de flujo de gasolina, que son requeridos para la comparativa de combustibles en los ensayos de rendimiento del motor; para usar la balanza, se adecuó el recipiente de la gasolina y se adaptó para que pueda ser usado junto a la balanza y así poder hacer las mediciones correspondientes.

Figura 25: Balanza para medir el peso que se consume por minuto



Fuente: Propia

### 3.2.3. ANALIZADOR DE EMISIONES

Los gases de descarga del motor están conectados a un analizador de gases HERMANN ANALIZADOR MODELO HGA 400, capaz de monitorear las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, HC y O<sub>2</sub>; ello nos permitirá ver si es que el motor del Grupo Generador quemando todo el combustible y en qué proporción.

Figura 26: Analizador de gases



Fuente: Propia

### 3.2.4. TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE

La temperatura de los gases de escape son también información utilizada para los cálculos termodinámicos del sistema, a través de esta información se puede elevar la cuota de energía que está pasando en el sistema de escape, así como el potencial exergético en este proceso. Para la medición de la temperatura de los gases de escape se realizó con un instrumento, pirómetro, que se presenta a continuación:

Figura 27: Pirómetro

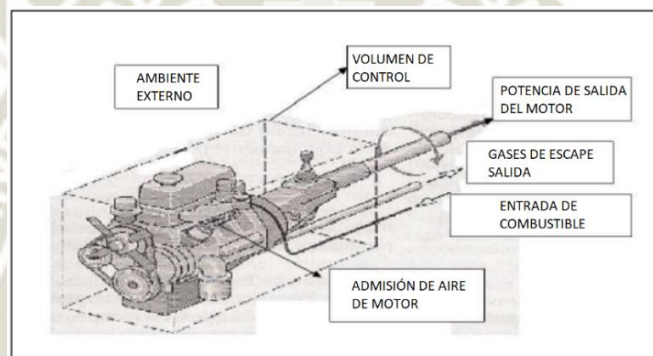


Fuente: Propia

### 3.3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

En la Figura se muestra el volumen de control correspondiente del motor de combustión interna. Puede considerarse como las variables de entrada del sistema de la combustible y el aire de admisión del motor. Con respecto a las variables de salida, considerar principalmente el calor intercambiado entre el medio ambiente y el control de volumen, la potencia de salida y los gases de escape.

Figura 28: Volumen de Control del Motor



Fuente: Propio

#### 3.3.1. CONSUMO ESPECÍFICO DEL COMBUSTIBLE Y SU EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA

El consumo específico de combustible, de ahora en adelante CEC, es la medida de cuán eficiente es la operación de un motor con determinado combustible. Puede ser definido como el consumo de combustible por unidad de potencia, conforme a la siguiente ecuación:

$$CE = \frac{\dot{m}_f}{W}$$

CE: Consumo específico de combustible (g/kWh)

$\dot{m}_f$ : Flujo másico de combustible (g/h)

W: Potencia en términos de energía (kW)

Su eficiencia energética se vio anteriormente y está dada por la siguiente fórmula:

$$n_{global} = n_{combustión} * n_{térmica} * n_{generador} = \frac{W_{neto\ eléctrico}}{\dot{m} * PC}$$

$n_{global}$ : Eficiencia Global

$\dot{m}$ : Flujo másico de combustible

PC: Poder Calorífico de combustible

W: Potencia eléctrica Neta

### 3.3.2. CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES

#### 3.3.2.1. Densidad de los combustibles

Las densidades que se muestran serán bajo los parámetros de presión 77 kPa (altura de Arequipa) y la temperatura de 20°C en cada uno de los combustibles detallados anteriormente. Para el caso del **Gasohol de 90 octanos**, este resulta de la combinación de 92.2% de gasolina base y 7.8% de alcohol carburante (Etanol anhidro desnaturalizado) los cuales tienen al hallar su densidad de la mezcla se obtiene.

Tabla 14: Densidad de la mezcla Gasolina y Etanol

	GASOLINA	ETANOL
Porcentaje en Volumen %	0.922	0.078
Densidad 20°C y 1.013 bar (Kg/m <sup>3</sup> )	736	790
	678.59	61.62
Densidad de la mezcla (Kg/m <sup>3</sup> )	740.21	

Fuente: Propio

Para el caso del **Gas Licuado de Petróleo (GLP)**, se sabe sus datos por la tabla mostrada del cual obtenemos los siguientes valores, el propano tiene una proporción del 70% en volumen mientras que el butano una proporción del 30% en volumen:

Tabla 15: Densidad GLP

	C3H8	C4H10
Porcentaje en Volumen %	0.70	0.30
Densidad 15°C (Kg/m3)	1.87	2.46
	1.31	0.74
Densidad mezcla 15°C y 1.013 Bar (Kg/m3)	2.04	
Densidad mezcla 20°C y 1.262 Bar (Kg/m3)	2.49	

Fuente: Propio

Para el caso del **biometano**, este se encuentra compuesto principalmente por metano CH<sub>4</sub>, Dioxido de Carbono CO<sub>2</sub> y otros componentes en menor proporción, pero a su vez se purifica por medio de un proceso de filtrado el cual reduce los porcentajes de CO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O; por lo cual se hallará la densidad de la mezcla del biometano producido en majes a con los parámetros de 20°C a 77 KPa (Arequipa) de los cuales se obtiene:

Tabla 16: Densidad Biometano

	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Porcentaje en Volumen %	0.755	0.178	0.067
Densidad 0°C y 1.013 Bar (Kg/m3)	0.72	1.98	1.43
Densidad 25°C y 1.262 Bar (Kg/m3)	0.822	2.256	1.63
	0.62	0.40	0.11
Densidad de la mezcla (Kg/m3)	1.13		

Fuente: Propio

### 3.3.2.2. Poder calorífico de los combustibles

Los valores propuestos para cada combustible, son los obtenidos en la bibliografía que se mostró anteriormente de los cuales mostramos un resumen de estos valores para cada combustible; en el caso del **Gasohol de 90 Octanos** obtenemos una PCI en MJ/Kg de la mezcla según los siguientes cálculos mostrados.

Tabla 17: Poder calorífico de la mezcla Gasolina y Etanol

	GASOLINA	ETANOL
Procentaje en Volumen %	0.922	0.078
Densidad 20°C y 1.013 bar (Kg/m <sup>3</sup> )	736	790
	678.59	61.62
Densidad de la mezcla (Kg/m <sup>3</sup> )	740.21	
% en masa	0.92	0.08
PCI (MJ/Kg)	42.9	26.8
	39.468	2.144
PCI de la mezcla (MJ/Kg)	<b>41.612</b>	

Fuente: Propio

En el caso del Gas Natural, de la densidad relativa que posee, se halla el PCI según los datos proporcionados y mostrados anteriormente por Osinergmin, en el cual presentan el PCI en las condiciones volumétricas para 15°C y 1 atm, para lo cual se halla los valores de PCI en KJ/Kg mediante los siguientes cálculos:

Tabla 18: Poder calorífico del GLP

GLP	PROPANO	BUTANO
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
PCI (Kcal/Kg)	11944	11741
PCI (MJ/Kg)	49.973	49.124
PCI de la mezcla (MJ/Kg)	<b>49.718</b>	

Fuente: Propio

En el caso del biometano se presentan los siguientes parámetros hallados en PCI para los respectivos porcentajes de CH<sub>4</sub> correspondientes a los combustibles descritos:

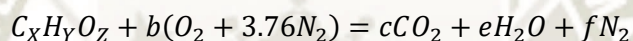
Tabla 19: Poder Calorífico del Biometano

	BIOMETANO
PCI con 100% CH <sub>4</sub> (Kcal/m <sup>3</sup> )	8530
PCI con 75.50% CH <sub>4</sub> (Kcal/m <sup>3</sup> )	6440.15
PCI con 75.50% CH <sub>4</sub> (KJ/Kg)	<b>23420.7</b>

Fuente: Propio

### 3.3.2.3. Relación estequiométrica de los combustibles

La relación estequiométrica de cada combustible es importante para la determinación del aire en exceso de la reacción de combustión, ayuda en la interpretación de resultados de emisiones y eficiencia, así como para la verificación de los resultados como un todo. Inicialmente estableceremos la relación estequiométrica de acuerdo a los porcentajes en volúmenes de los combustibles y después los compararemos con el análisis de los productos de combustión, para ello ya definido la composición de los diferentes combustibles a usar (Gasohol 90, Biogas, Biometano, Gas Natural) empezaremos utilizando la ecuación en la se establece la relación estequiométrica.



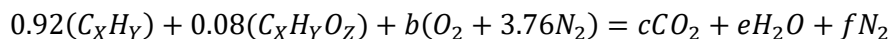
Empezamos con el **Gasohol de 90 octanos** del cual sabemos que el porcentaje volumétrico es 92.2% de gasolina base y 7.8% de alcohol carburante por lo tanto realizamos el siguiente calculo:

Tabla 20: Porcentaje en masa de la mezcla Gasolina y Etanol

	GASOLINA	ETANOL
Porcentaje en Volumen %	0.922	0.078
Densidad 20°C y 77 Kpa (Kg/m3)	559.31	600.35
	515.68	46.83
Densidad de la mezcla (Kg/m3)	562.5	
Porcentaje en masa %	<b>0.92</b>	<b>0.08</b>

Fuente: Propio

Con ello y sabiendo que la gasolina tiene 86% de C y 14% de H y en etanol tiene 52% de C, 13% de H y 35% de O todo esto en porcentaje de masa; podemos plantear la siguiente ecuación:



En 100 kg. de gasolina tenemos 86 Kg. de C y 14 Kg. de H y el número de moles en cada uno de ellos será:

$$C = 86/12 = 7.17 \text{ kmoles}$$

$$H = 14/1 = 14 \text{ kmoles}$$

En 100 kg. de etanol tenemos 52% de C, 13% de H y 35% de O y el número de moles en cada uno de ellos será:

$$C = 52/12 = 4.33 \text{ kmoles}$$

$$H = 13/1 = 13 \text{ kmoles}$$

$$O = 35/16 = 2.19 \text{ kmoles}$$

Por lo tanto:

$$0.92(7.17C + 14H) + 0.08(4.33C + 13H + 2.19O) + b(O_2 + 3.76N_2) = cCO_2 + eH_2O + fN_2$$

$$\begin{aligned} \text{Balance de carbono} \quad 0.92(7.17) + 0.08(4.33) &= c \\ c &= 6.94 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Balance de hidrógeno} \quad 0.92(14) + 0.08(13) &= 2e \\ e &= 6.96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Balance de oxígeno} \quad 0.08(2.19) + 2b &= 2 * 6.94 + 6.96 \\ b &= 10.33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Balance de nitrogeno} \quad 20.66(3.76 * 2) &= 2f \\ f &= 77.68 \end{aligned}$$

De todo ello tenemos:

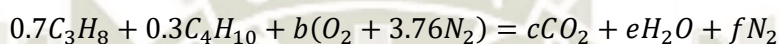
$$\begin{aligned} 0.92(7.17C + 14H) + 0.08(4.33C + 13H + 2.19O) + 10.33(O_2 + 3.76N_2) \\ = 6.94CO_2 + 6.96H_2O + 77.86N_2 \end{aligned}$$

Luego:

$$(r_{a/c})_{ideal} = \frac{10.33(32 + 3.76 * 28)}{0.92(7.17 * 12 + 14 * 1) + 0.08(4.33 * 12 + 13 * 1 + 2.19 * 16)} = 14.18$$

$$(r_{a/c})_{ideal} = \mathbf{14.18} \frac{Kg. aire}{Kg. combustible}$$

Para el Gas licuado de **Petróleo GLP**, tenemos que su porcentaje volumétrico de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> es 0.7% y de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> es de 0.3%; por lo tanto, tenemos:



Balance de carbono

$$0.7 * 3 + 0.3 * 4 = c$$

$$c = 3.3$$

Balance de hidrógeno

$$0.7 * 8 + 0.3 * 10 = 2e$$

$$e = 4.3$$

Balance de oxígeno

$$2b = 3.3 * 2 + 4.3$$

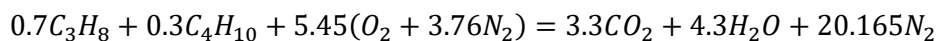
$$b = 5.45$$

Balance de nitrógeno

$$5.45 * (3.76 * 2) = 2f$$

$$f = 20.165$$

De todo ello tenemos:

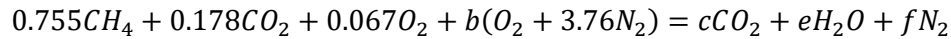


Luego:

$$(r_{a/c})_{ideal} = \frac{5.45(32 + 3.76 * 28)}{0.7(3 * 12 + 8 * 1) + 0.3(4 * 12 + 10 * 1)} = \frac{748.176}{48.2}$$

$$(r_{a/c})_{ideal} = \mathbf{15.5} \frac{Kg. aire}{Kg. combustible}$$

Para el **Biometano**, tenemos que su porcentaje volumétrico de CH<sub>4</sub> es 75.5% y de CO<sub>2</sub> es de 17.8% y O<sub>2</sub> es de 6.7%; por lo tanto, tenemos:



Balance de carbono

$$0.755 + 0.178 = c$$

$$c = 0.933$$

Balance de hidrógeno

$$0.755 * 4 = 2e$$

$$e = 1.51$$

Balance de oxígeno

$$0.178 * 2 + 0.067 * 2 + 2b = 0.933 * 2 + 1.51$$

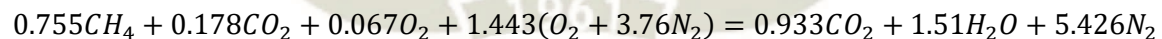
$$b = 1.443$$

Balance de nitrógeno

$$1.443 * (3.76 * 2) = 2f$$

$$f = 5.426$$

De todo ello tenemos:



Luego:

$$(r_{a/c})_{ideal} = \frac{1.443(32 + 3.76 * 28)}{0.755(12 + 4 * 1) + 0.178(12 + 2 * 16) + 0.067 * 2 * 16} = \frac{198.09}{22.056}$$

$$(r_{a/c})_{ideal} = \mathbf{8.98} \frac{Kg. \text{ aire}}{Kg. \text{ combustible}}$$

### 3.3.3. ANÁLISIS ENERGÉTICO

Durante un proceso de flujo estacionario, “la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control no cambia con el tiempo (masa vc = constante). Entonces el principio de conservación de la masa requiere que la cantidad total de masa que entra a un volumen de control sea igual a la cantidad total de masa que sale del mismo”. (Cengel, 2012, p.223).

$$\textit{Flujo estacionario:} \quad \sum_{\text{entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{salida}} \dot{m} \quad (\text{kg/s})$$

Por otro lado, para un proceso con flujo y estado estable se tiene el cumplimiento de la siguiente ecuación del cual quiere decir que la suma de los calores que atraviesan el sistema es igual a la diferencia entre la suma de entalpías que ingresan al sistema y la suma de entalpías que salen del sistema. (Campos, 2015, p.2).

$$\sum Q = \sum H_{\text{entrada}} - \sum H_{\text{salida}}$$

Donde:

$\sum Q$ : sumatoria de calor evacuado al ambiente

$\sum H_{\text{salida}}$ : sumatoria de entalpías que salen del sistema

$\sum H_{\text{entrada}}$ : sumatoria de entalpías que entran al sistema

La variación de entalpía, por su parte, es una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida en un sistema termodinámico, es decir, es la variación que se produce por una transformación en la que se puede recibir o aportar energía (como en el presente caso de estudio, energía mecánica), por lo que se puede considerar a la entalpía como numéricamente igual al calor intercambiado con el ambiente (Bernal, 2014).

Para determinar el balance energético, se consideran los siguientes cálculos:

- Flujo de masa de combustible

$$\dot{m}_c = \rho \frac{V}{\Delta t}$$

Donde:

$\dot{m}_c$ : Flujo másico de combustible [kg/s]

$\rho$ : Densidad específica de combustible [kg/m<sup>3</sup>]

V: Volumen de combustible [m<sup>3</sup>]

$\Delta t$ : Tiempo de flujo [s]

- Calor liberado por el combustible

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c * PCI$$

Donde:

$\dot{Q}_c$ : Calor liberado por el combustible [kW]

PCI: poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

- Pérdida de calor por los gases de escape

$$\dot{Q}_g = \bar{c}_p * \dot{m}_g * (T_{esc} - T_{amb})$$

Donde:

$\dot{Q}_g$ : Calor liberado por los gases de escape [kJ/s]

$\dot{m}_g$ : flujo másico de los gases [kg/s]

$\bar{c}_p$ : calor específico a presión constante promedio de los gases

$T_{esc}$  = Temperatura de salida [°C]

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente [°C]

- Flujo de los gases

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{comb}$$

Donde:

$\dot{m}_{ar}$ : flujo de aire [kg/s]

$\dot{m}_{comb}$ : flujo másico de combustible [kg/s]

- Calor perdido en sistema de refrigeración

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a * \bar{c}_a * (T_s - T_e)$$

Donde:

$\dot{Q}_a$ : Calor en radiador [kW]

$\dot{m}_a$ : Flujo de agua en radiador [kg/s]

$\bar{c}_a$ : Calor específico de agua [kJ/kg.°C]

$T_{esc}$ : Temperatura de salida del agua [°C]

$T_e$ : Temperatura de entrada del agua [°C]

- Balance energético

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_c - \dot{Q}_g - \dot{Q}_A - \dot{Q}_{k-c}$$

Donde:

$\dot{Q}_p$ : Energía útil en el motor

$\dot{Q}_c$ : Calor liberado por el combustible

$\dot{Q}_g$ : Calor de los gases de escape

$\dot{Q}_A$ : Calor del agua de enfriamiento

$\dot{Q}_{k-c}$ : Calor perdido por convección y conducción.

- El rendimiento del sistema se determina:

$$n_{energético} = \frac{Q_p}{Q_c}$$

- Calor específico a presión constante

El calor específico del aire a una temperatura T, (K), está dado por:

$$C_{par,T} = C_0 + C_1 * T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 \quad \left( \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K} \right)$$

Para temperatura entre 200 a 800 K.

Donde:

$$C_0 = +1.0189 \text{ E}+03$$

$$C_1 = -1.3784 \text{ E}-01$$

$$C_2 = +1.9843 \text{ E}-04$$

$$C_3 = +4.2399 \text{ E}-07$$

$$C_4 = -3.7632 \text{ E}-10$$

El calor específico a presión constante del combustible está dado por:

$$C_{pg,T} = c_{par,T} + \frac{f}{1+f} \theta_{cp,T}$$

Donde

$$f = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}}$$

$$\theta_{cp,T} = Cp_0 + Cp_1 * T + Cp_2 * T^2 + Cp_3 * T^3 + Cp_4 * T^4 + Cp_5 * T^5 \quad \left( \frac{J}{kg \text{ } ^\circ K} \right)$$

Para temperatura entre 200 a 800 K

$$CP_0 = -3.5949 \text{ E}+02$$

$$CP_1 = +4.5164 \text{ E}+00$$

$$CP_2 = +2.8116 \text{ E}-03$$

$$CP_3 = -2.1709 \text{ E}-05$$

$$CP_4 = +2.8689 \text{ E}-08$$

$$CP_5 = -1.2226 \text{ E}-11$$

### 3.3.4. ANÁLISIS EXERGÉTICO

Se realizó el análisis de exergía teniendo en cuenta la exergía del combustible de entrada. La exergía química específica para los combustibles líquidos se puede evaluar por la siguiente ecuación:

$$E_f = \beta * PCI = \left( 1.0401 + 0.01728 \frac{H}{C} + 0.0432 \frac{O}{C} + 0.2169 \frac{S}{C} \left( 1 - 2.0628 \frac{H}{C} \right) \right) * PCI$$

Donde

H, C, O y S son los valores de fracción de masa de cada elemento contenidas en el combustible. Para la determinación del valor  $\beta$  de las mezclas de combustibles, se adoptó un porcentaje másico de los elementos en la mezcla respectiva.

En el caso de los combustibles gaseosos, el factor está dado por la siguiente ecuación (kotas, 1985):

$$E_f = \beta * PCI = \left( 1.0334 + 0.0183 \frac{H}{C} + 0.0694 \frac{1}{NC} \right) * PCI$$

Los valores en porcentaje de composición de cada combustible son mostrados a continuación para poder hallar el valor  $\beta$ :

Tabla 21: Porcentaje en masa de la mezcla Gasolina y Etanol

COMBUSTIBLE	% MÁSCICO DE LOS ELEMENTOS			PCI
	C	H	O	KJ/Kg
GASOLINA	83.3	13.9	2.8	41612
GLP	82.2	17.8	-	49718
BIOMETANO	50.8	13.7	35.5	23832

Fuente: Propio

Los valores determinados para el factor  $\beta$  son presentados a continuación:

Tabla 22: Porcentaje en masa de la mezcla Gasolina y Etanol

COMBUSTIBLES	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
$\beta$	1.0444	1.03815	1.0396

Fuente: Propio

La determinación de exergías los gases de escape en el sistema de refrigeración y aceite lubricante se determinaron en la consideración de interacción asociado con la exergía de calor.

$$Ex_{gases} = Q_{gases} \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)$$

Donde

$Q_{gas}$  es el calor contenido en el gas de escape,

$T_0$  es la temperatura medio ambiente (°K)

$T_f$  es la temperatura medida en los gases de escape del motor. (°K)

En el sistema de refrigeración, la exergía se determinó según la ecuación:

$$Ex_{fluido\ refri} = Q_{f\ refri} \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)$$

donde,

$Q_{f\ refri}$ : representa el calor contenido en los gases de escape,

$T_0$ : es la temperatura del medio ambiente

$T_f$ : es la temperatura medida del refrigerante del motor.

En el aceite de lubricación del motor, la exergía se calculó según la ecuación a continuación:

$$Ex_{aceite} = Q_{aceite} \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)$$

donde

$Q_{\text{aceite}}$ : Representa el calor contenido en el depósito de aceite lubricante,

$T_0$ : esa temperatura ambiente

$T_f$ : es la temperatura considerada en el depósito de aceite lubricante del motor.

La exergía destruida en el sistema se determina por la ecuación:

$$Ex_{\text{comb}} = Ex_{\text{dest}} + W_{\text{motor}} + Ex_{\text{Gases}} + Ex_{\text{Fluido Refri}} + Ex_{\text{óleo}}$$

donde

$Ex_{\text{dest}}$ : representa a la exergía que se destruye en el sistema

$Ex_{\text{comb}}$ : es la exergía del combustible

$W_{\text{motor}}$ : es la exergía en forma de potencia de trabajo del motor;

$Ex_{\text{Gases}}$ : equivale a la exergía de los gases de escape;

$Ex_{\text{Fluido Refri}}$ : es la exergía del refrigerante;

$Ex_{\text{óleo}}$ : corresponde a exergía en el aceite del motor.

La eficiencia exergético está dada por la relación entre la potencia de salida motor y la exergía del combustible:

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}}{\beta * PCI * \dot{m}_c}$$

donde,

$\varepsilon$ : Representa la eficiencia exergético del motor

PCI: Es el valor calorífico inferior del combustible

$\dot{m}_c$ : Flujo de masa de combustible.

### 3.3.5. ANALISIS DE COSTOS

El análisis de costo se hará en comparación del consumo de combustible, la cantidad de potencia y el precio actual que se puede obtener; estos valores serán el resultado de las pruebas que se realizarán en los ensayos con gasolina, glp y biometano.

## CAPÍTULO 4

### 4. CAPÍTULO RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. POTENCIA ELÉCTRICA GENERADA DEL MOTOR GENERADOR

La potencia en un motor está determinada por factores importantes para su mayor entrega de potencia como son la energía de los combustibles, ángulo de avance, características de combustible, así como la eficiencia volumétrica; todo esto ayudará a obtener valores de potencia cercanos a un buen rendimiento en la realidad y saber el comportamiento del motor con el biometano para su uso industrial.

Tenemos un módulo de focos que tiene 80 focos (10 por fila) cada uno de estos focos de 100 Watts, del cual lo usamos para obtener la potencia que se genera en el uso de cada combustible que se quiere comparar respecto al biometano y que nos dan un alcance de como poder aprovechar mucho mejor estos combustibles.

Tabla 23: Datos de la potencia generada

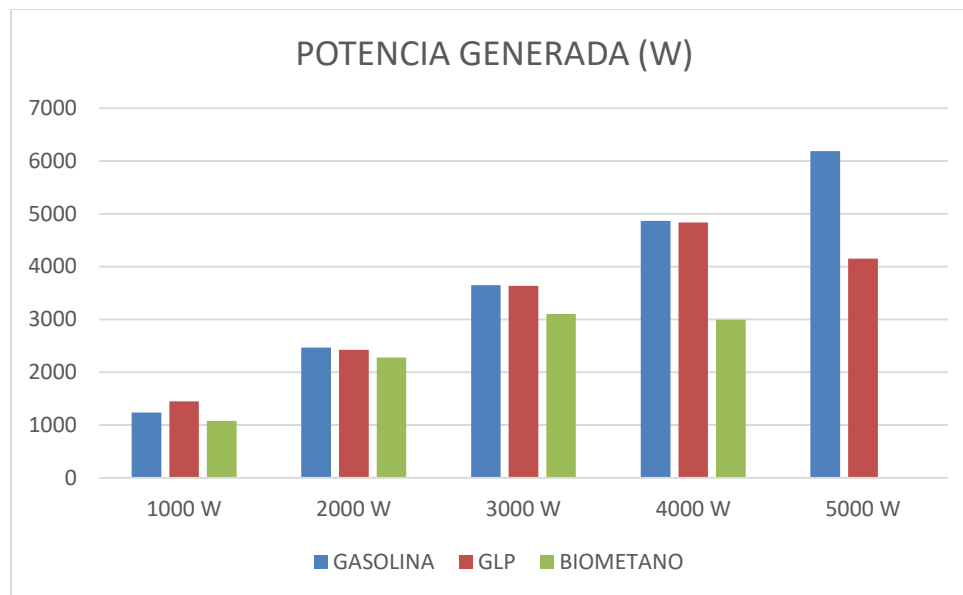
POTENCIA GENERADA (W)			
DEMANDA	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	1237.642	1448.382	1076.256
2000 W	2462.157	2425.254	2280.043
3000 W	3646.344	3636.391	3102.75
4000 W	4862.195	4834.863	2989.42
5000 W	6183.903	4150.452	.

Fuente: Propia

Si bien es cierto, podemos ver que tenemos valores muy altos en bajas revoluciones con el GLP, se puede notar también que la gasolina encuentra su mejor alcance de potencia en valores de demanda de energía más altos, o en valores altos de revoluciones; mientras el biometano no llega a alcanzar estas potencias; se deduce que la gasolina muestra mejores potencias pero es porque en pruebas no se sometió a un

cambio de ángulo de avance, perjudicando mucho más a los valores reflejados en el biometano.

Figura 29: Gráfico de la potencia generada



Fuente: Propia

En el gráfico también podemos ver como el GLP por sus características como combustible se adecua mucho más a un motor gasolinero sin tener que recurrir a modificaciones importantes en el motor ósea podrá trabajar más en forma dual. Para el caso del biometano esta sería una desventaja porque se nota claramente que para encontrar su rendimiento y performance se necesita realizar cambios importantes al motor (avance de encendido) y esta dualidad con la gasolina se complica por temas técnicos.

#### 4.2. COMPARACIÓN ENTRE CONSUMOS ESPECÍFICO Y EFICIENCIA

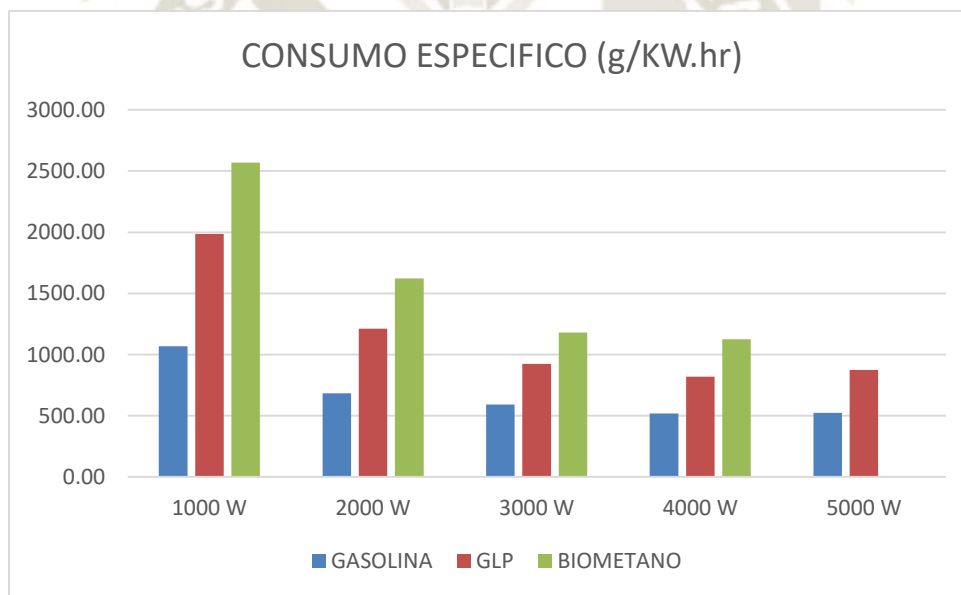
Se sabe que el CEC y la eficiencia global son parámetros inversamente proporcionales. Las tablas y figuras siguientes muestran la comparación del rendimiento del motor operando con los tres combustibles distintos:

Tabla 24: Datos del consumo específico

CONSUMO ESPECIFICO (g/KW.hr)			
DEMANDA	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	1066.54	1986.83	2570.24
2000 W	682.33	1211.27	1623.60
3000 W	592.37	923.25	1179.99
4000 W	518.28	818.40	1124.93
5000 W	523.94	873.90	

Fuente: Propia

Figura 30: Grafico del consumo específico



Fuente: Propia

En el gráfico mostrado se evidencia como el Biometano ha tenido un alto consumo específico, más que la gasolina o el GLP; esto es debido primero al rango estequiométrico en el cual se encuentran, al tener el biometano un lambda de 1.1 comparándolo con la gasolina y GLP entre 0.7-0.8 en promedio, ósea el biometano está teniendo una mezcla pobre (exceso de aire) lo cual hace que la potencia disminuya y los valores de consumo sean mayores para un valor determinado de potencia bajo; otra observación es que la

velocidad de combustión del biometano es mucho más lenta comparándola con la gasolina y el glp (gasolina de 20 a 25 m/s, glp de 30 a 33 m/s, biometano entre 8-10 m/s), esto afecta no solo al consumo de combustible de biometano que tendrá que ser mayor para sostener la combustión, sino a la potencia del motor; por ello se debe realizar un avance de encendido.

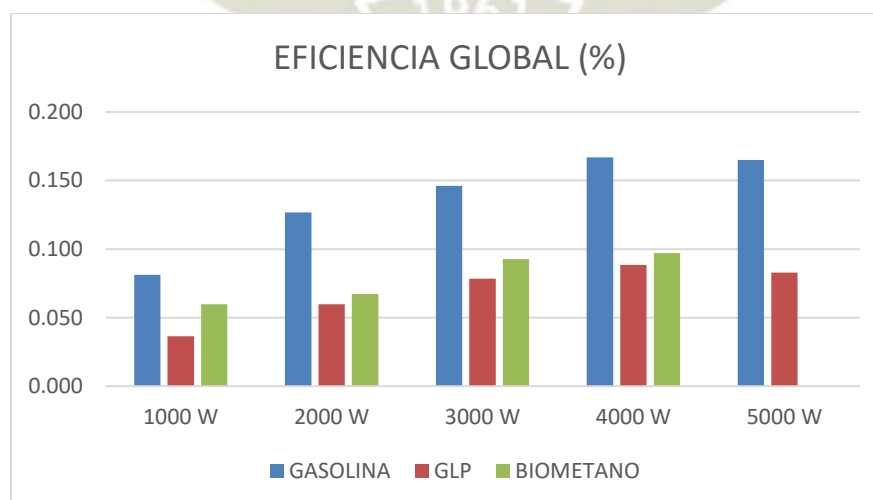
Para los valores de eficiencia global de cada combustible, se puede mostrar en la siguiente tabla descriptiva.

Tabla 25: Datos de la eficiencia global

EFICIENCIA GLOBAL (%)			
DEMANDA	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	0.081	0.036	0.060
2000 W	0.127	0.060	0.067
3000 W	0.146	0.078	0.093
4000 W	0.167	0.088	0.097
5000 W	0.165	0.083	

Fuente: Propia

Figura 31: Gráfico de la eficiencia global



Fuente: Propia

Al observar el aumento del CEC para el biometano, en consecuencia, también se visualiza inversamente la baja eficiencia global en comparación con los demás combustibles, esto explicado anteriormente es a consecuencia del factor lambda que está por encima de 1, así como la velocidad de propagación del cual requiere de un avance de encendido para mejorar su rendimiento y a la par su eficiencia. Lo notable es que la eficiencia global llega a ser mayor al del Glp, debido a que el poder calorífico del biometano se ve reducido por un 75.5% de metano en su composición, lo cual genera menos energía respecto a los valores del glp que son casi el doble del biometano.

### 4.3. RESULTADO DE EMISIONES

En la prueba de gases de escape se obtuvieron los resultados con los gases CO, HC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>; estos resultados fueron usados para las relaciones estequiométricos con lo cual controlamos el exceso de aire con cada combustible y verificamos los resultados de la prueba en conjunto. Como se sabe para todas las pruebas realizadas se uso el analizador de gases Hermann modelo HGA 400.

#### 4.3.1. EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

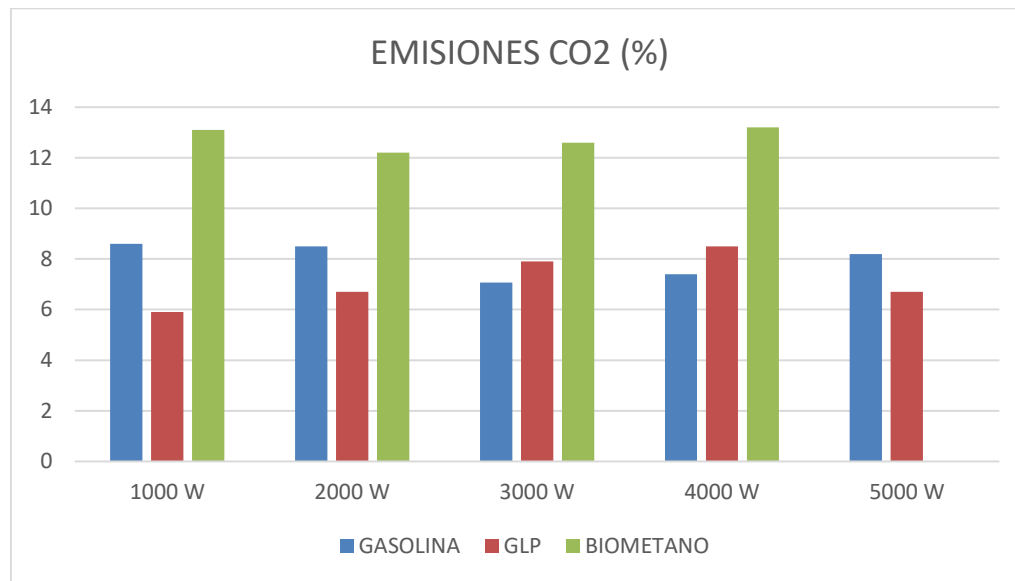
Los análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> por el analizador de gases Hermann modelo HGA 400 se muestra a continuación:

Tabla 26: Datos de las emisiones de CO<sub>2</sub>

DEMANDA	EMISIONES CO <sub>2</sub> (%)		
	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	8.6	5.9	13.1
2000 W	8.5	6.7	12.2
3000 W	7.07	7.9	12.6
4000 W	7.4	8.5	13.2
5000 W	8.2	6.7	

Fuente: Propia

Figura 32: Gráfico de las emisiones de CO2



Fuente: Propia

La tabla y figura mostradas arriba indican emisiones superiores de CO<sub>2</sub> para el motor operando con biogás, debido principalmente al hecho de que el combustible ya posee una concentración en torno al 25% de CO<sub>2</sub> en su composición, y también porque el motor presenta un menor consumo cuando está operando con este combustible lo cual se refleja en las emisiones de gases de escape.

#### 4.3.2. EMISIONES DE CO

“Los motores que funcionan con gas natural generalmente tienen una reducción del 50 al 90% en las emisiones de CO en comparación con los motores que se utilizaban originalmente para funcionar con gasolina.” (Korakianitis et al, 2011, pp. 92-112). Esto nos ayuda a entender que encontraremos valores muy bajos de CO para el biometano en comparación con otros combustibles.

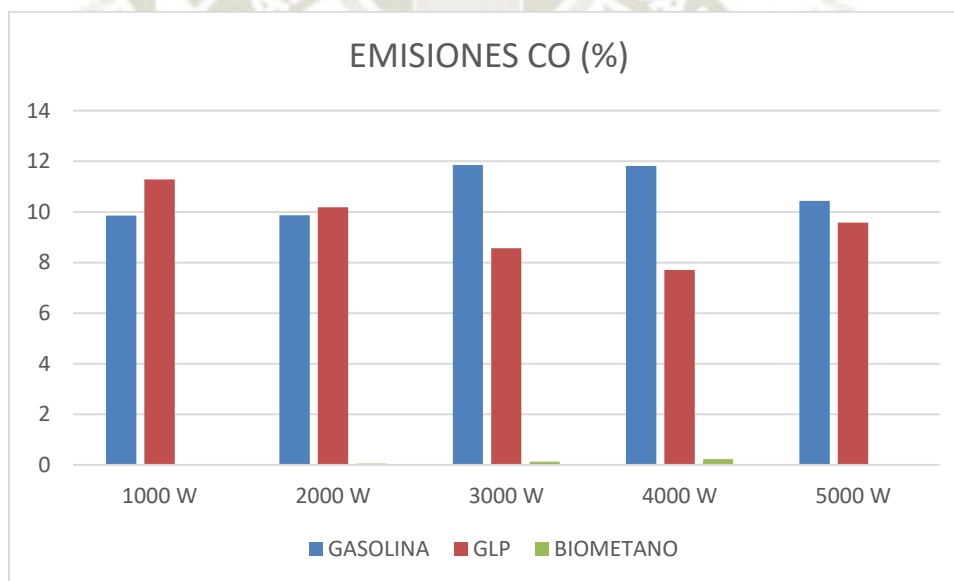
En la siguiente tabla mostramos el análisis de emisiones CO.

Tabla 27: Datos de las emisiones de CO

DEMANDA	EMISIONES CO (%)		
	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	9.85	11.28	0.016
2000 W	9.87	10.18	0.06
3000 W	11.86	8.57	0.13
4000 W	11.82	7.7	0.23
5000 W	10.44	9.58	

Fuente: Propia

Figura 33: Gráfico de las emisiones de CO



Fuente: Propia

Se puede visualizar notoriamente en el anterior gráfico la gran cantidad de reducción de CO usando biometano en comparación de otros combustibles, paralelamente también esto nos indica la combustión más completa que existe con el uso de biometano.

#### 4.3.3. EMISIONES DE HC

La emisión de hidrocarburos no quemados HC está ligada a la calidad de la combustión, es decir, a una combustión más completa; conduce a menores niveles de

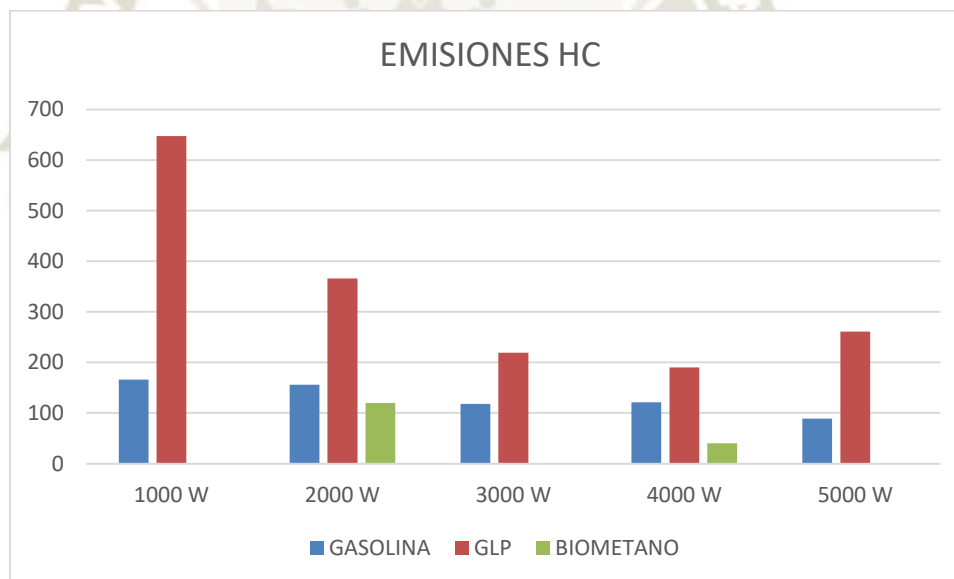
emisión de HC. A continuación, mostramos la siguiente tabla donde se muestra los datos obtenidos:

Tabla 28: Datos de emisiones HC

EMISIONES HC (ppm)			
DEMANDA	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	166	647	0
2000 W	156	366	120
3000 W	118	219	0
4000 W	121	190	40
5000 W	89	261	

Fuente: Propia

Figura 34: Gráfico de emisiones HC



Fuente: Propia

Podemos constatar los mayores niveles de emisión en HC para la gasolina y el GLP. Esto se debe a que el motor funciona lejos de la razón A / C estequiométrica para este combustible (0.7-0.8 aproximadamente). También observamos los menores niveles de HC en las emisiones del motor operando con biometano que opera en razones estequiométricas más cercanas de 1.05-1.1 aproximadamente.

#### 4.3.4. EMISIONES DE O<sub>2</sub>

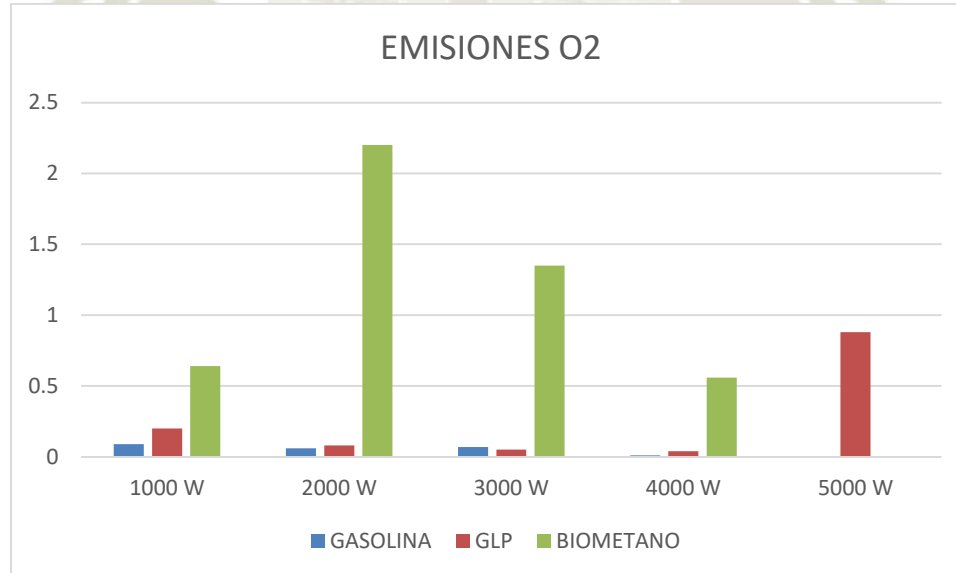
Los análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> por el analizador de gases Hermann modelo HGA 400 se muestra a continuación:

Tabla 29: Datos de las emisiones O<sub>2</sub>

DEMANDA	EMISIONES O <sub>2</sub>		
	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	0.09	0.2	0.64
2000 W	0.06	0.08	2.2
3000 W	0.07	0.05	1.35
4000 W	0.01	0.04	0.56
5000 W	0	0.88	

Fuente: Propia

Figura 35: Gráfico de las emisiones O<sub>2</sub>



Fuente: Propia

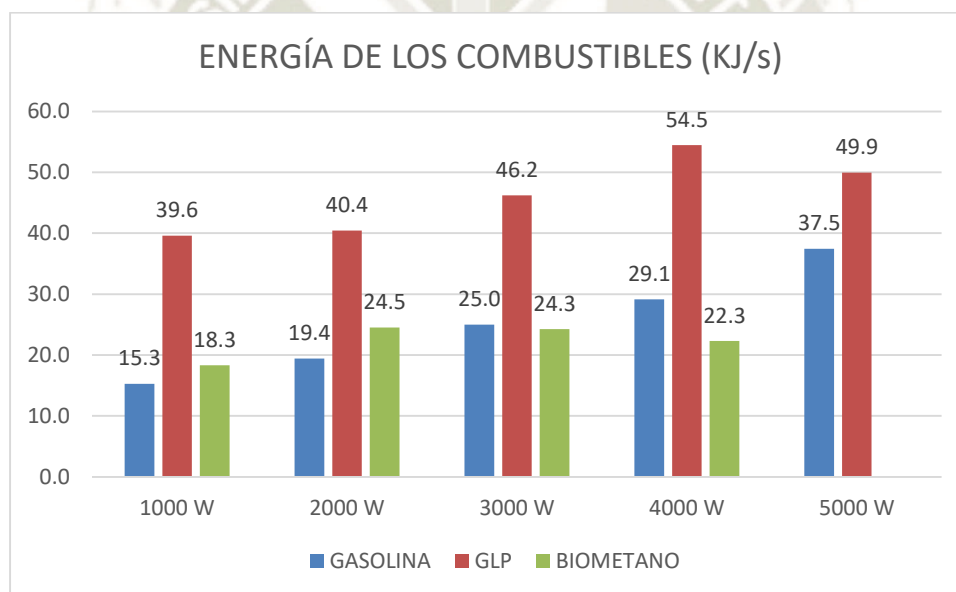
El gráfico representa el porcentaje que existe de emisiones O<sub>2</sub> y requiere ser mostrado por dos motivos, el primero de ellos para poder usar como coeficiente en las ecuaciones de la razón de aire/combustible estequiométricas, así como para entender y

poder tener de referencia al exceso de aire que posee la mezcla del motor, podemos ver claramente como el biometano trabaja con valores altos debido al exceso de aire que posee respecto a los otros combustibles que poseen exceso de combustible.

#### 4.4. ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES

Cada combustible tiene una energía que le corresponde. Esta energía es el resultado del producto del valor calorífico neto y el flujo de masa. Se presenta a continuación los resultados obtenidos de las energías de los combustibles.

Figura 36: La energía del combustible utilizado en los ensayos.



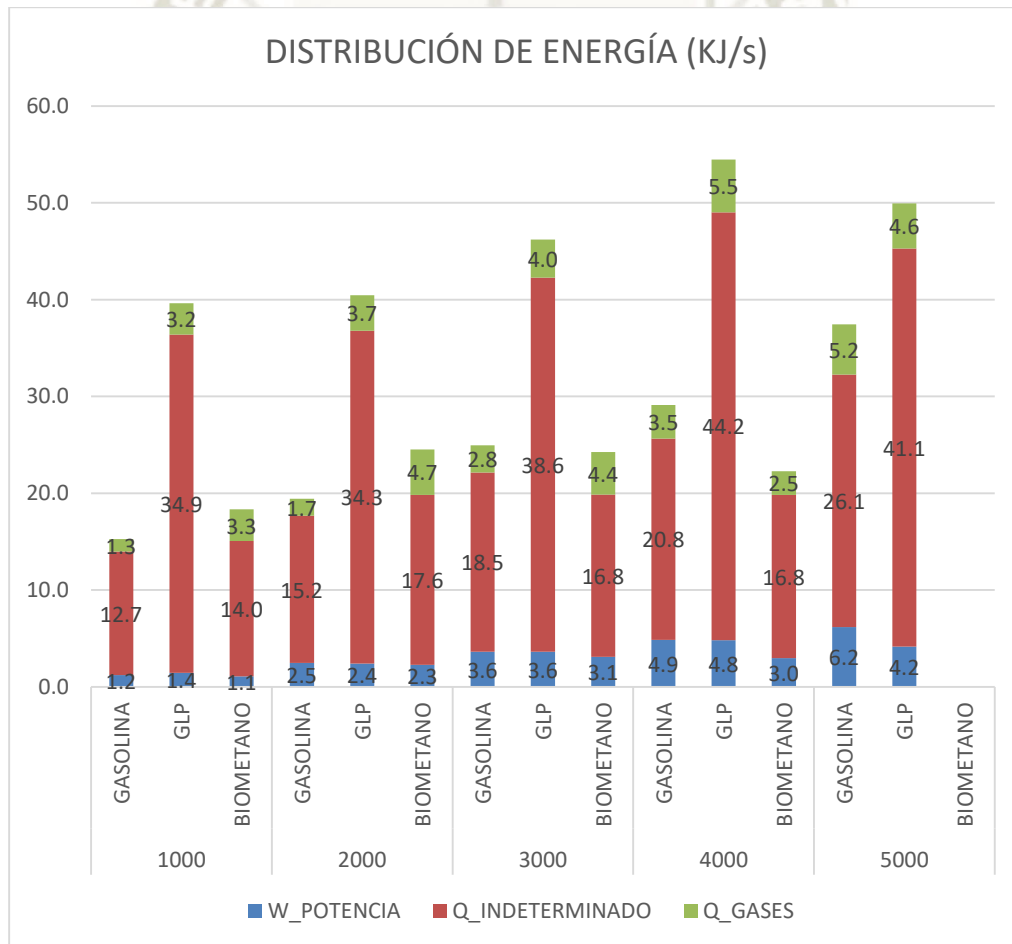
Fuente: Propia

Nos encontramos en función de la energía que tenía disponible el equipo, de acuerdo al tipo de combustible a usar y su flujo masico de gasolina inyectado, por lo cual vemos como el biometano encuentra un lugar bajo casi similar a la gasolina y muy por encima está el glp con su alto grado de energía, pero como se vio antes, su baja eficiencia para aprovecharla por la disposición del motor.

#### 4.4.1. DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA EN LOS COMBUSTIBLES

La energía que entra en el motor es la energía del combustible. Se utiliza esta energía en el sistema para generar trabajo, sin embargo, sólo una parte es aprovechada para el trabajo y el resto se distribuye en otras formas de energía, tal como calor, la fricción y el ruido. Las figuras muestran cómo la energía se distribuye al combustible sistema en las formas de calor y trabajo en el sistema. MCI en el objetivo principal es el trabajo de producción. A continuación, mostramos la distribución de energía en diferentes demandas de energía.

Figura 37: Distribución de Energía



Fuente: Propia

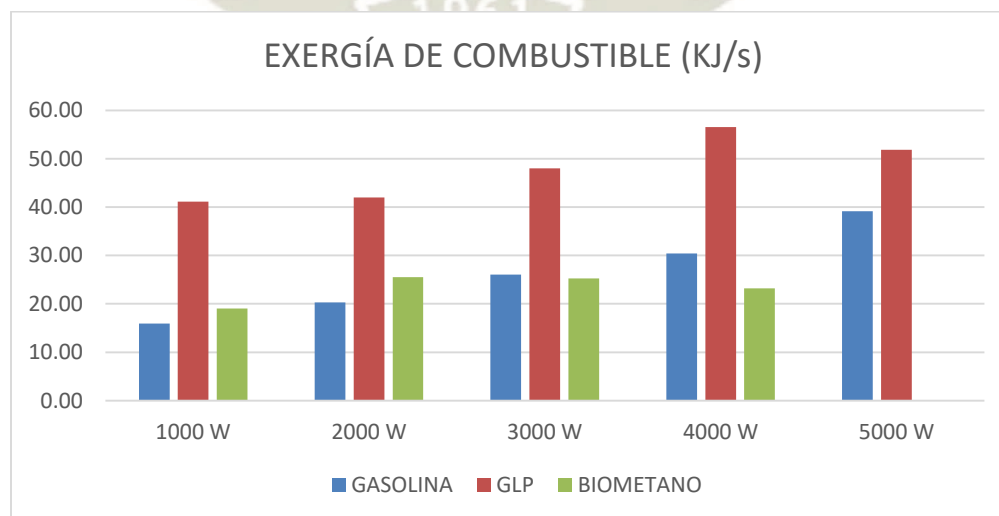
Podemos señalar que la gasolina fue el combustible con un mejor uso de su energía en forma de trabajo, llegando a encontrar su mayor valor a 5000 Watts con 6.2 KJ/s, esto indica que, aunque el glp uso una energía parecida, su eficiencia baja debido al menor aprovechamiento de energía que se tuvo con este combustible; el biometano tiene el menor uso de potencia de los tres, pero con valores muy cercanos a los de la gasolina. A medida que aumenta la demanda de energía, también aumenta la eficiencia del motor, pero existe más perdidas debido a la fricción con las paredes de motor y pistón.

El calor transferido por los gases de escape y el volumen de control asignado como indeterminado se libera al medio ambiente sin uso. Hay, sin embargo, un uso potencial de todas estas formas de energía térmica, como otros procesos de calentamiento de tanto los gases de escape como el fluido de enfriamiento.

#### 4.5. ANÁLISIS DE EXERGÍA

Se muestra un gráfico de exergía de combustible. Se puede observar un perfil de comportamiento similar a la gráfica en la energía de combustibles.

Figura 38: Exergía de combustible.



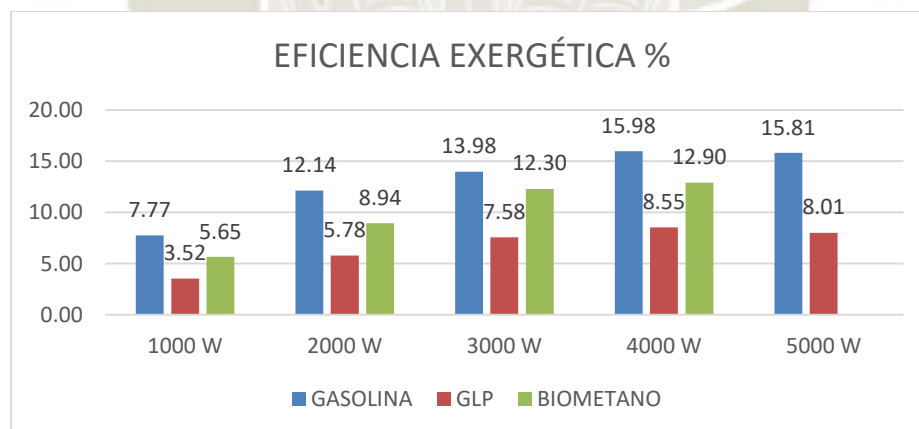
Fuente: Propia

Se puede visualizar como la exergía del Glp es más grande en comparación al de la gasolina y el biometano, por lo cual vemos que hay mayor potencial de aprovechamiento de energía, pero en paralelo mayor consumo de combustible.

#### 4.5.1. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EXERGÉTICA

La eficiencia exergética es el resultado de la relación entre el trabajo exergía reversible y la exergía del combustible. El comportamiento gráfico de la eficiencia de exergía es similar a la gráfica la eficiencia energética. Los mejores resultados en la eficiencia exergética lo encontramos en la gasolina; es importante resaltar que a pesar las altas potencias del glp, el biometano tiene una mayor eficiencia debido a su bajo poder calorífico que posee. A continuación, mostramos la gráfica de los resultados de eficiencia exergética.

Figura 39: Eficiencia Exergética del motor



Fuente: Propia

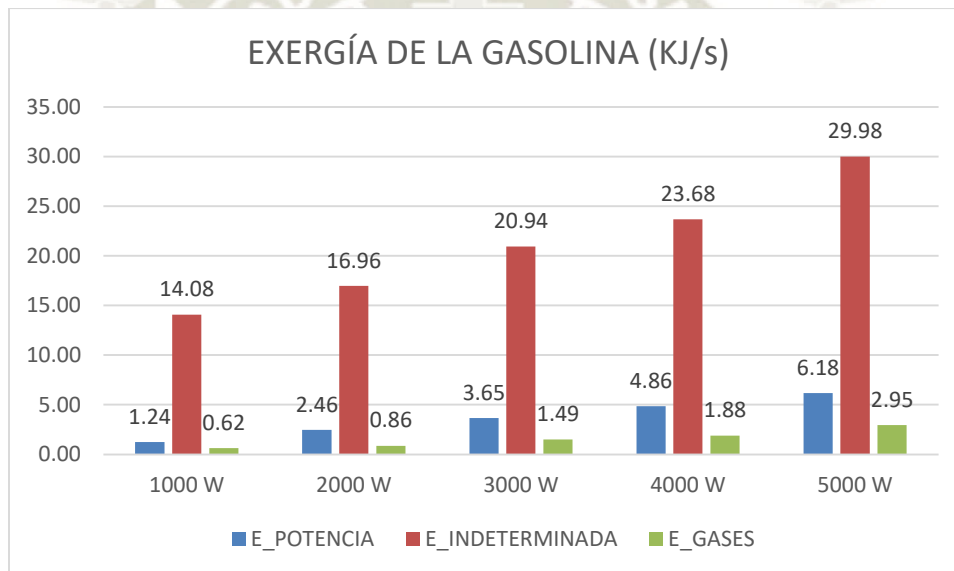
#### 4.5.2. ANÁLISIS DE LA EXERGIA EN PARTES DEL SISTEMA

La exergía, a diferencia de la energía no se conserva. En cada parte del sistema de hay un potencial exergético. Las exergías en diferentes partes del sistema para cada combustible pruebas están representadas por las figuras siguientes. De acuerdo con los

conceptos discutidos la revisión de la literatura, esta exergía se corresponde con el potencial energético en cada estos sistemas. Si se utiliza con un propósito, como el trabajo de exergía reversible, se puede poner a buen uso. De lo contrario, este potencial se dará a conocer a medio ambiente sólo en forma de calor o presión.

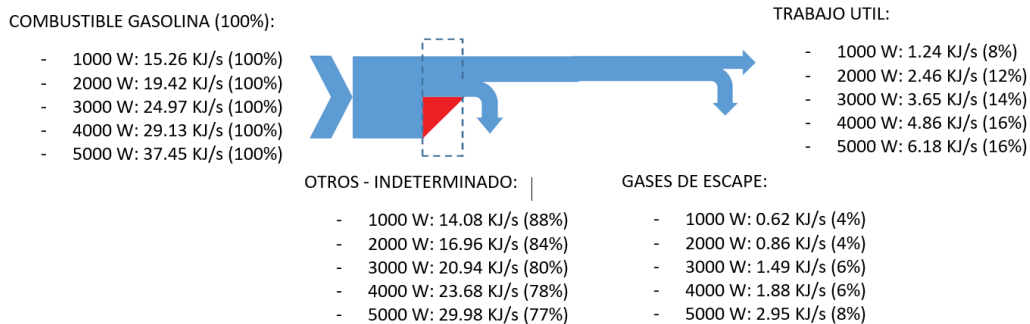
La Figura representa los resultados calculados en diferentes partes de exergía sistema utilizando gasolina:

Figura 40: Exergías el sistema con gasolina



Fuente: Propia

Figura 41: Exergías el sistema con gasolina tipo Grassmann.

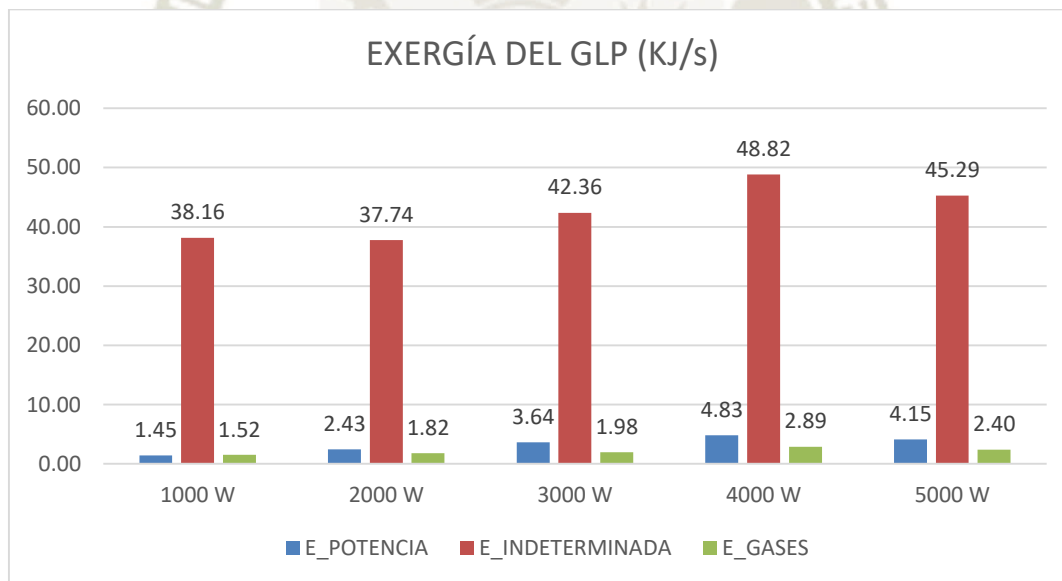


Fuente: Propia

Se puede denotar que la exergía en los gases de escape es menor que la potencia útil usada, esta energía aumenta en tanto el flujo de combustible sea mayor en las demandas de energía. Entender también que la exergía indeterminada es un conjunto de energías dentro de la disipación de calor por el aceite, el flujo de aire para enfriamiento del motor, la disipación de calor al medio ambiente, entre otras. En el diagrama de grassmann se puede apreciar esta distribución entre la exergía del combustible que es la gasolina, los gases de escape y el trabajo útil.

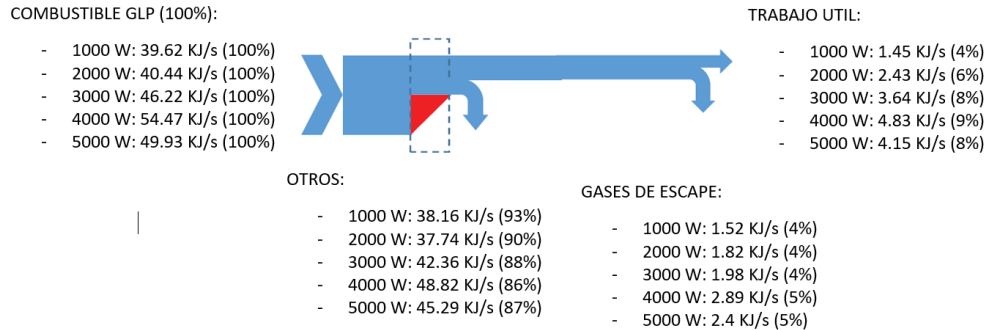
La siguiente figura representa los resultados calculados en diferentes partes de exergía sistema utilizando Gas Licuado de Petróleo (GLP).

Figura 42: Exergías el sistema con GLP.



Fuente: Propia

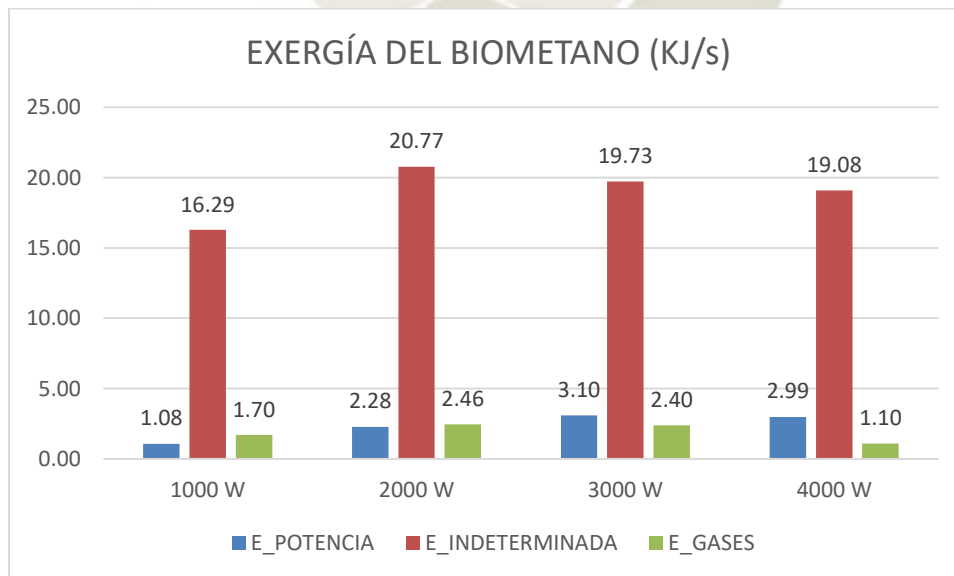
Figura 43: Exergías el sistema con GLP Grassmann.



Fuente: Propia

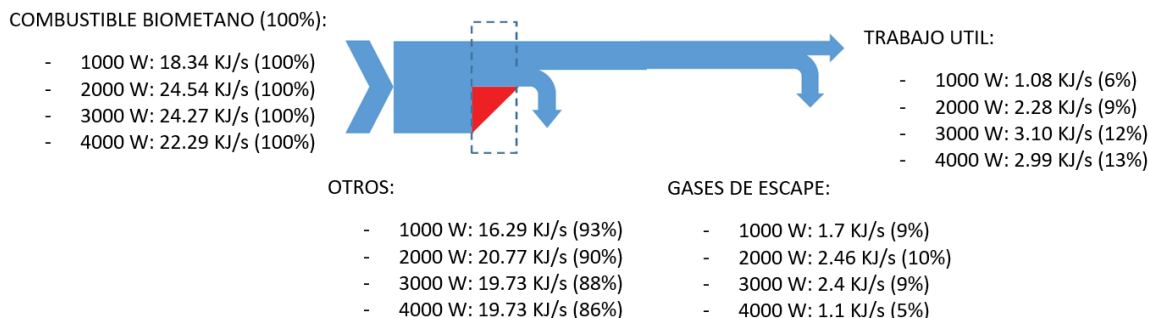
Se puede ver en la figura 39 que la exergía de potencia util del GLP inicialmente es más alta que el de la gasolina en las demandas de energía entre 1 y 3 KW, en la medida que sube la demanda, esta exergía se empieza a colocar por debajo de los valores de la gasolina. Entre la gasolina y el gpl se tiene la misma tendencia exérgica, a excepción de la demanda 5 KW en donde se aprecia una disminución en el gpl.

Figura 44: Exergías del sistema con Biometano.



Fuente: Propia

Figura 45: Exergías del sistema con biometano.



Fuente: Propia

En la figura se muestra el trabajo útil con el biometano que se muestra exergéticamente por debajo de los valores de la gasolina y el glp, esto debido al bajo Poder Calorífico por la composición que tiene actualmente, también se puede apreciar que la tendencia del trabajo útil como exergía, empieza a disminuirse de partir de la demanda de energía 4 KW; esto también pasa con los gases de escape.

#### 4.6. ANÁLISIS DE COSTE POR ENERGÍA DE CADA COMBUSTIBLE

Se realizó un breve análisis del costo del combustible por unidad de energía. La siguiente tabla se presenta el precio considerado para cada combustible, estos valores son considerando del año ENERO 2021 en la ciudad de Arequipa.

Tabla 30: Tabla de precios de combustibles

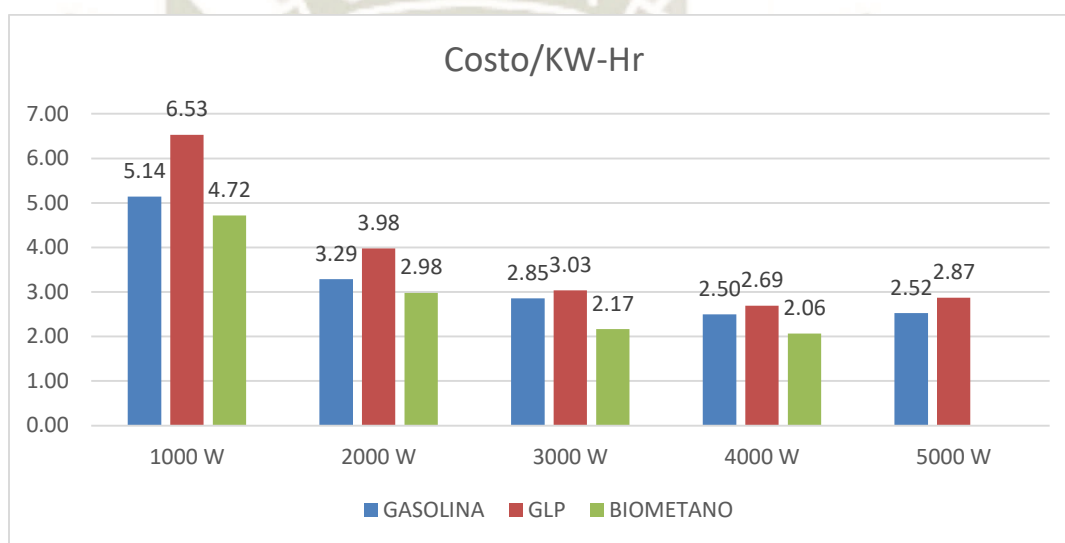
COMBUSTIBLE	PRECIO (S./L)	PRECIO (S./GALÓN)	PRECIO (S./m3)	DENSIDAD	PRECIO (S./kg.)
GASOLINA	-	13.5	3566.295	740.212	4.82
GLP	1.75	-	1750	530.7	3.30
BIOMETANO	-	-	2.074	1.1512709	1.80

Fuente: Gasolina de 90 grifo Repsol. Precio de biometano fuente Peña J.

Investigador del proyecto: “Producción y uso de biometano presurizado como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola”.

La figura siguiente, presenta el resultado obtenido del costo de cada combustible por unidad de energía.

Figura 46: Costo en R \$ / kWh de los combustibles utilizados en los ensayos



Fuente: Propia

En la tabla podemos encontrar información relevante sobre el costo del biometano, este comparándolo con los demás combustibles se muestra como el más barato, la limitación siempre será el poder producirlo de manera más industrializada, por ello mostramos en este trabajo estos datos importantes para impulsar el uso del biometano como sustituto de un combustible fósil (Gasolina), que actualmente es económicamente más viable que cualquier otro combustible y puede llegar a tener valores de rendimiento cercanos a la gasolina realizando las modificaciones importantes al motor

y mejorando el filtrado de CO<sub>2</sub>. En la medida que crece la demanda de energía, los costos disminuyen.

#### 4.7. TEMPERATURAS EN LOS GASES DE ESCAPE

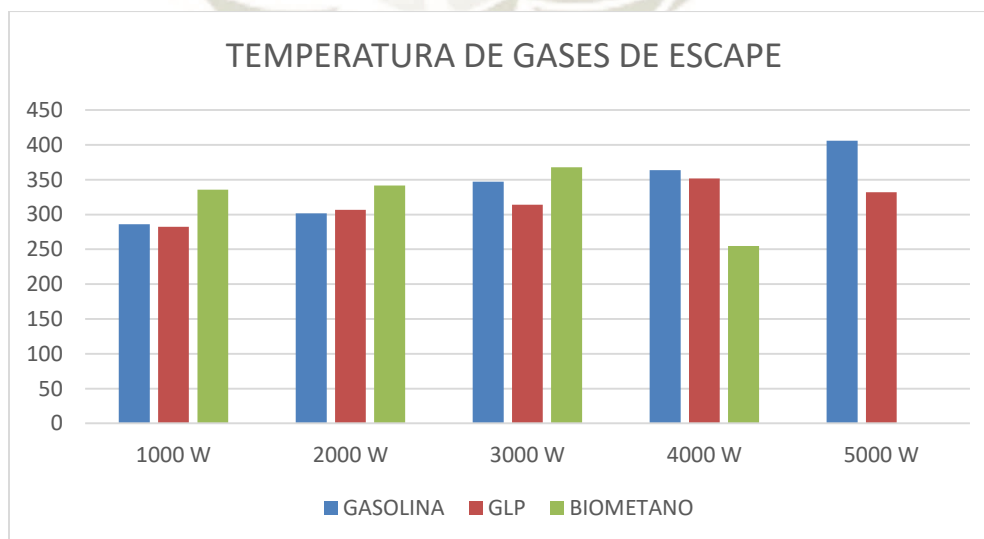
De acuerdo con cada combustible de los ensayos la temperatura de los gases del agotamiento presentó valores diferentes. La figura 69 muestra los resultados de las temperaturas obtenidas en los gases del agotamiento con cada combustible y en cada condición de los ensayos.

Tabla 31: Temperaturas en los gases de escape de los ensayos

TEMPERATURA GASES DE ESCAPE (C°)			
DEMANDA	GASOLINA	GLP	BIOMETANO
1000 W	286	282.2	335.5
2000 W	301.7	306.6	341.6
3000 W	347	314	367.8
4000 W	363.7	351.6	254.8
5000 W	406	332	

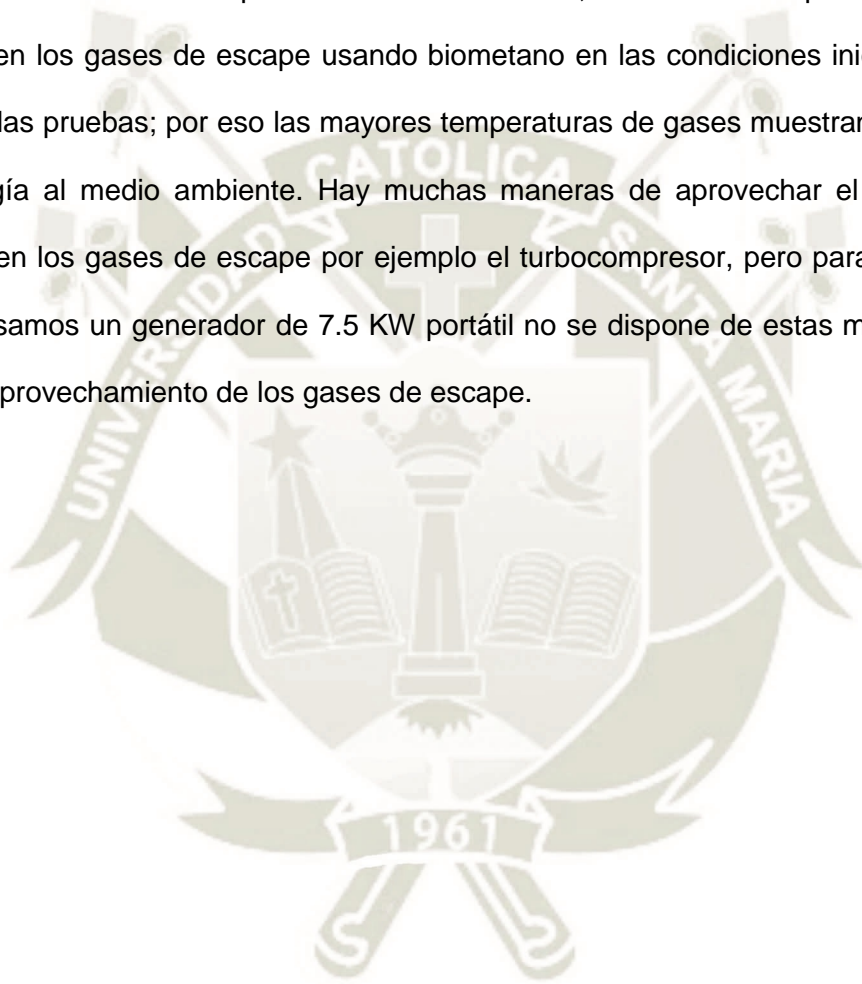
Fuente: Propia

Figura 47: Eficiencia



Fuente: Propia

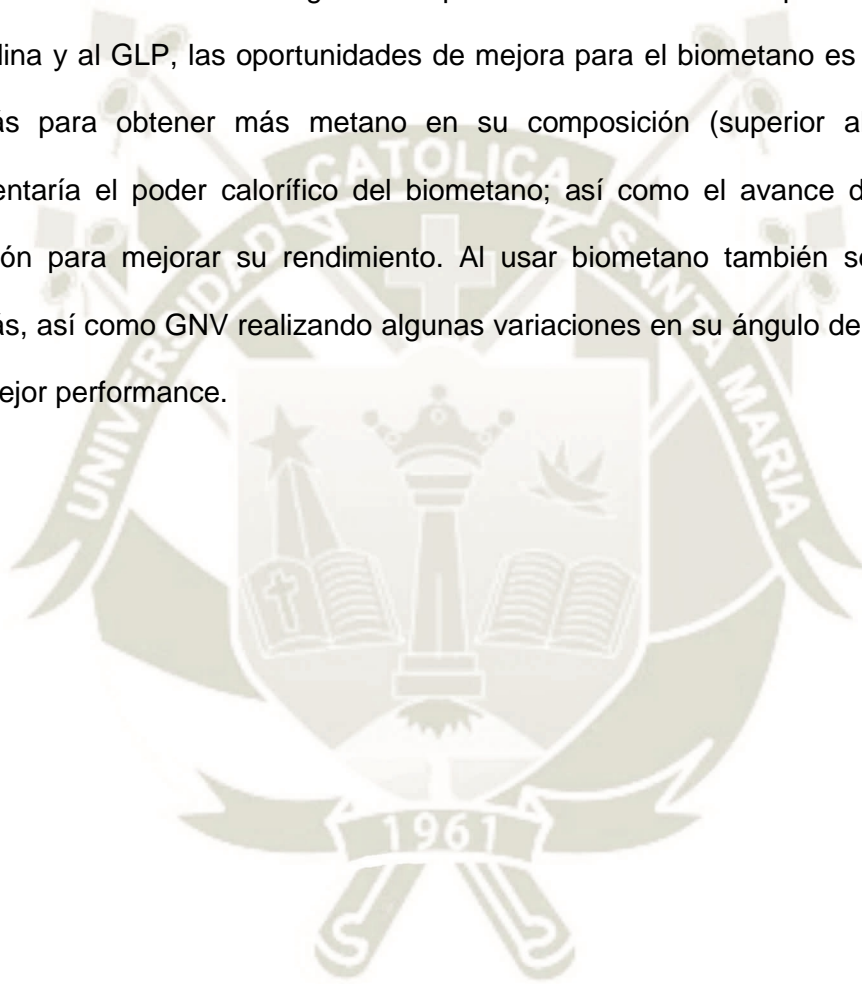
La temperatura en los gases de escape se muestra mayor debido a las demandas iniciales de 1 a 3 KW, esto también se evidencia en las exergías mostradas de los gases de escape, en donde se puede ver que las exergías de gases de escape son mucho mayores en el biometano que en otros combustibles, mostrando una pérdida mayor de exergía en los gases de escape usando biometano en las condiciones iniciales que se hicieron las pruebas; por eso las mayores temperaturas de gases muestran una pérdida de exergía al medio ambiente. Hay muchas maneras de aprovechar el potencial de energía en los gases de escape por ejemplo el turbocompresor, pero para este trabajo donde usamos un generador de 7.5 KW portátil no se dispone de estas modificaciones para el aprovechamiento de los gases de escape.



## 5. CONCLUSIONES

- Se ha logrado realizar la evaluación técnica de biometano presurizado en un grupo electrógeno de 7.5 KW las cuales, comparándolas con otros combustibles, nos ayudaron a poder establecer resultados que nos muestran las ventajas del biometano, así como sus oportunidades de mejora.
- Se realizó la evaluación técnica en biometano, glp y gasolina; encontrándose que la potencia del biometano es la menor de los tres combustibles debido al bajo Poder calorífico que se obtiene del 75.5% de metano en el biometano; también se evidencia que el biometano tiene un alto consumo de combustible respecto a los otros combustibles, debido a la carga demandada ante su bajo poder calorífico y por último la eficiencia global del biometano es mayor al Glp, ya que usa más eficientemente su poder calorífico, pero su eficiencia es menor a la gasolina faltando mejorar tanto el porcentaje de metano y la disposición del motor (ángulo de ignición).
- Se realizó el análisis en los gases de escape del biometano, glp y gasolina; donde se puede ver los bajos niveles de CO y CO<sub>2</sub> del biometano (sabiendo que el biometano en su composición tiene un 15% de CO<sub>2</sub>), esto nos evidencia que el biometano alcanza una mejor combustión completa respecto a los otros combustibles; así como también, el biometano respecto a otros combustibles, alcanza bajos niveles de HC que evitan daños a la salud de las personas.
- En el análisis energético exergético, los valores del biometano llegan a tener la misma tendencia que en los demás combustibles y en las demandas de energía de 4 a 5 KW se reduce fuertemente debido al bajo Poder Calorífico que posee por el porcentaje de metano en el biometano (75.5%).

- Aunque el consumo del biometano sea mayor al de otros combustibles, en el análisis de costo por energía se evidencia su bajo costo respecto a los demás combustibles.
- Debido al uso diferente de tres combustibles y pudiendo compararlos, se observa que el uso de biometano tiene grandes oportunidades de ser competente frente a la gasolina y al GLP, las oportunidades de mejora para el biometano es el filtrado del biogás para obtener más metano en su composición (superior al 75%), esto aumentaría el poder calorífico del biometano; así como el avance del ángulo de ignición para mejorar su rendimiento. Al usar biometano también se podrá usar biogás, así como GNV realizando algunas variaciones en su ángulo de ignición para un mejor performance.



## 6. RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones, se recomienda poder mejorar el proceso de filtrado para que el metano sea más puro y así pueda entregar mayor energía; de esta manera la energía del biogás purificado podrá ser más comparado como combustibles como el GNV, que también posee un alto grado de pureza de metano en su composición.
- Poder realizar el adelantamiento de combustión, adecuar el motor en esta configuración ayudará también a un mejor rendimiento en las pruebas, debido al tiempo más largo que posee el biometano en su combustión.
- Se recomienda poder realizar estas pruebas en motores Diesel, así como de mayor tamaño, esto ayudará a evaluar mayores márgenes de potencia y ampliar la utilización del biometano en la zona agrícola, así como en la zona industrial.
- Usar más instrumentación para así tener valores más finos a la hora de poder usar las formulas y tener valores más exactos marcados a la realidad.

## 7. REFERENCIAS

Mccabe, B. (2018). How biomethane can help turn gas into a renewable energy source.

The Conversation. Recuperado desde: <https://phys.org/news/2018-10-biomethane-gas-renewable-energy-source.html#jCp>

EBA (2018). "Statistical Report of the European Biogas Association 2018." Brussels, Belgium, December 2018.

EBA (2016) "Biomethane in transport of the European Biogas Association 2016" Brussels, Belgium, April 2016.

Aparicio, A. (2015). Biometano: Alternativa sostenible del Gas Natural. Revista et&Flu11

Hidalgo, D (2019). Producción de Biometano. Recuperado desde:

[http://cyted.org/sites/default/files/produccion\\_de\\_biometano\\_cartif.pdf](http://cyted.org/sites/default/files/produccion_de_biometano_cartif.pdf)

FAO (2019a). Informe técnico-analítico para una estrategia de promoción de la incorporación de biometano a la red de gas natural. Colección Informes Técnicos N.º 2. Buenos Aires. 72 pp.

MINAGRI (2011). Biodigestores en el Perú. Recuperado desde:

<http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-+-boletines/bioenergia/biodigestores.pdf>

Barreda, M. A., Maicelo, J.L., Gamarra, O.A., Oliva, M., Leiva, S.T., Taramona, L.A.,

Huanes, M.A., Ordinola, C.M.. (2019). Biogás: Producción y aplicaciones.

Chachapoyas, Perú: UNTRM.

Moraga, A (2017). Curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales.

Recuperado desde: <http://4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/Biogas-modulo1-Introduccion-11-2017.pdf>

SILVA, C. L., RABELO, J. M. O., BOLLMANN, H. A. (2008) Energia no lixo: Uma avaliação da viabilidade do uso do biogás a partir e resíduos sólidos urbanos [Energía en la basura: una evaluación de la viabilidad del uso de biogás a partir de residuos sólidos urbanos]. IV Encontro Nacional da Anppas Brasília.

IDAE (2007). Energía de la biomasa. Manuales de Energías Renovables. Recuperado desde:

[http://dl.idae.es/Publicaciones/10374\\_Energia\\_de\\_la\\_biomasa\\_A2007.pdf](http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Energia_de_la_biomasa_A2007.pdf)

EsF (2012). Biomasa y desarrollo: Oportunidades de la biomasa para mejorar el acceso local a la energía en comunidades rurales aisladas de América Latina.

Recuperado desde:

[https://www.energiasinfronteras.org/attachments/article/70/GUIA\\_BIOMASAalta.pdf](https://www.energiasinfronteras.org/attachments/article/70/GUIA_BIOMASAalta.pdf)

PETERSSON, A., THOMSEN, M. H., HAUGGAARD-NIELSEN, H. (2007). Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean [Potencial producción de bioetanol y biogás utilizando biomasa lignocelulósica de centeno de invierno, colza y haba]. National Laboratory, P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark

FOCER. (2002). Biomasa. Manual sobre energía renovable. Costa Rica: BUN-CA

Castillo, D., & Tito, C. (2011). Obtención de biogás a partir de excremento de cuy en condiciones ambientales en Tacna, Perú. Ciencia & Desarrollo, 13-20.

FNR (2010). Guía sobre el Biogás: Desde la producción hasta el uso. Recuperado desde:

<https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>

- Hilbert, J (s.f.). Manual para la producción de Biogás. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado desde: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)
- FAO (2019b). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires. 104 pp.
- Lopez, J., Ramírez, B., Gomes, C., Morgan-Sagastume, J. (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de aguas residuales. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. 1ªed. México.
- FAO (2011). Manual de Biogás. Santiago de Chile. 119 pp. Recuperado desde: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- IDAE (2007). Biomasa: Digestores Anaeróbicos. BESEL, S.A. (Departamento de Energía). Madrid – España.
- Landeros (2013). Potencial de la biomasa residual del fruto de *Jatropha Curcas L.* para la producción de biogás: un enfoque experimental. [Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana Centro de Investigaciones Tropicales]. Recuperado desde: <https://www.uv.mx/met/files/2015/11/LanderosGutierrezCesarSantos-Noviembre2013.pdf>
- Morero (2014). Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Litoral]. Recuperado desde: <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/572>
- EPM (s.f.). Evaluación técnica para la recuperación de biogás. Recuperado desde: [https://www.grupo-epm.com/site/Portals/1/biblioteca\\_epm\\_virtual/tesis/capitulo5.pdf](https://www.grupo-epm.com/site/Portals/1/biblioteca_epm_virtual/tesis/capitulo5.pdf)
- Varnero (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás

- usado en la Generación Eléctrica. Scielo. Recuperado desde:  
[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642012000200005](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000200005)
- Giles, R. V., Evett, J. B., LIU, C. (1996). Mecânica dos Fluidos. 2ª Ed. Makron Books. 458pg. São Paulo.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., (2011). Termodinámica. 7ª Ed. Mc Graw Hill. México.
- Gil Martinez, Hermógenes (2004), Manual del Automóvil, Reparación y Mantenimiento, Cultural S.A. Madrid – España., 8pp.
- Universidad Técnica de Cotapaxi, UTC (s.f.). El motor de combustión Interna. Recuperado desde: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1155/1/T-UTC-0813.pdf>
- Ramirez, J., Basantes, J. (2013). Elaboración de material didáctico en un motor de combustión interna de 4 tiempos en corte con caja de cambios. [Tesis de Título, Universidad San Francisco de Quito]. Recuperado desde: <https://core.ac.uk/download/pdf/147381966.pdf>
- Melegari, S. (2016). MANUAL DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE BIOGÁS EN ENTORNO RURAL. p.11. Recuperado desde: [http://portalpos.unioeste.br/media/File/vanderleia.schmidt/Manual\\_Geracao\\_Energia\\_Eletrica\\_Biogas.pdf](http://portalpos.unioeste.br/media/File/vanderleia.schmidt/Manual_Geracao_Energia_Eletrica_Biogas.pdf)
- Payri, F., Desantes, J. (2011). Motores de Combustión Interna Alternativos. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial Reverté.
- Jóvaj, M.S. (1982). Motores de Automóvil. Editorial MIR. Moscú.
- Sampaio, M. (2011). AVALIAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE COMBUSTÍVEIS [Evaluación de

- un motor de combustión interna OTTO utilizando diferentes tipos de combustibles]. [Tesis de Post-grado, Universidade Federal da bahía].  
Recuperado desde: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/18744>
- Mitzlaff, K. (1988). Engines for Biogas [Motores a Biogás]. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE
- Molina, F. (2018). Conceptos básicos del encendido, Encendido convencional.  
Recuperado desde: <https://slideplayer.es/slide/12302256/>
- Heisler, H. (1995). Advanced Engine Technology [Tecnología avanzada del motor]. Society of automotive Engineers. Recuperado desde:  
<https://es.scribd.com/document/440776145/Advanced-Engine-Technology-by-Heinz-Heisler-pdf>
- Osinermin (2011). Especificaciones técnicas y beneficios del gasohol. Recuperado desde:  
<https://www.osinermin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/II%20FORO%20DE%20HIDROCARBUROS%20REGION%20PUNO/7.Presentacion%20Gasohol%20%20UOE%20-%20Diciembre%202011.pdf>
- Petroperú (2014). Especificaciones técnicas Petroperú. Recuperado desde:  
<https://www.petroperu.com.pe/Docs/spa/files/productos/et-q90.pdf>
- Alvarado D. (2016). Los beneficios y desventajas de usar gasohol. Recuperado desde:  
<https://www.nitro.pe/el-urbano/los-beneficios-y-desventajas-de-usar-gasohol.html>
- Generac (2015). Manual del Propietario. Recuperado desde:  
<https://www.generac.com/service-support/product-support-lookup/product-support-details?productid=1c8a6f5f-9dd2-4b24-865e-092f50da7c8d>

Quispe, J. (2016). Evaluación de los efectos de la variación del octanaje de la gasolina y el gasohol e7.8 sobre el comportamiento de un motor monocilíndrico de encendido por chispa. [Tesis de Pre-grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Recuperado desde:

[http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7338/QUISPE\\_JAVIER\\_MOTOR\\_COMBUSTI%  
c3%93N.pdf?sequence=1&isAlloved=y](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7338/QUISPE_JAVIER_MOTOR_COMBUSTI%c3%93N.pdf?sequence=1&isAlloved=y)

Bisso, J. (2015). Determinación de la velocidad de llama laminar en un quemador de premezcla. [Tesis de Pre-grado, Pontificia Universidad Católica del Perú].

Recuperado desde:

[file:///C:/Users/HP/Downloads/BISSO\\_JOSE\\_DETERMINACION\\_VELOCIDAD\\_LLAMA\\_LAMINAR%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/BISSO_JOSE_DETERMINACION_VELOCIDAD_LLAMA_LAMINAR%20(1).pdf)

Bernal, E. (2014). Física termodinámica 6M. Entalpía & Entropía. Recuperado de:

<https://estebanbernal10.wordpress.com/tercer-corte/entalpia-entropia/>

KOTAS, T. (1985). The exergy method of thermal plant analysis. 2ed. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company

Campos, P. (2015). *Instrumentos de Medición para la Evaluación del Consumo de Energía Térmica*. Recuperado desde:

<https://es.scribd.com/document/142140144/Instrumentos-de-Medicion-del-Consumo-de-Energia-Termica>

Rovira, A., Muñoz, M. (2015). Motores de Combustión Interna. Universidad Nacional de educación a distancia. Madrid. 511 pp. Recuperado desde:

<https://lopezva.files.wordpress.com/2019/11/343564272-motores-de-combustion-interna.pdf>

Alós, V. (2018). El filtro de partículas, un arma contra la contaminación de los motores

diésel. Highmotor. Recuperado desde: <https://www.highmotor.com/filtro-particulas-que-es-como-funciona-tipos.html>

Kepler. (2014). Planta Experimental de Biogás de Altas Prestaciones. SNOWLEOPARD, KEPLER, Responsabilidad, Ciencia y Tecnología al Servicio de la Sostenibilidad.

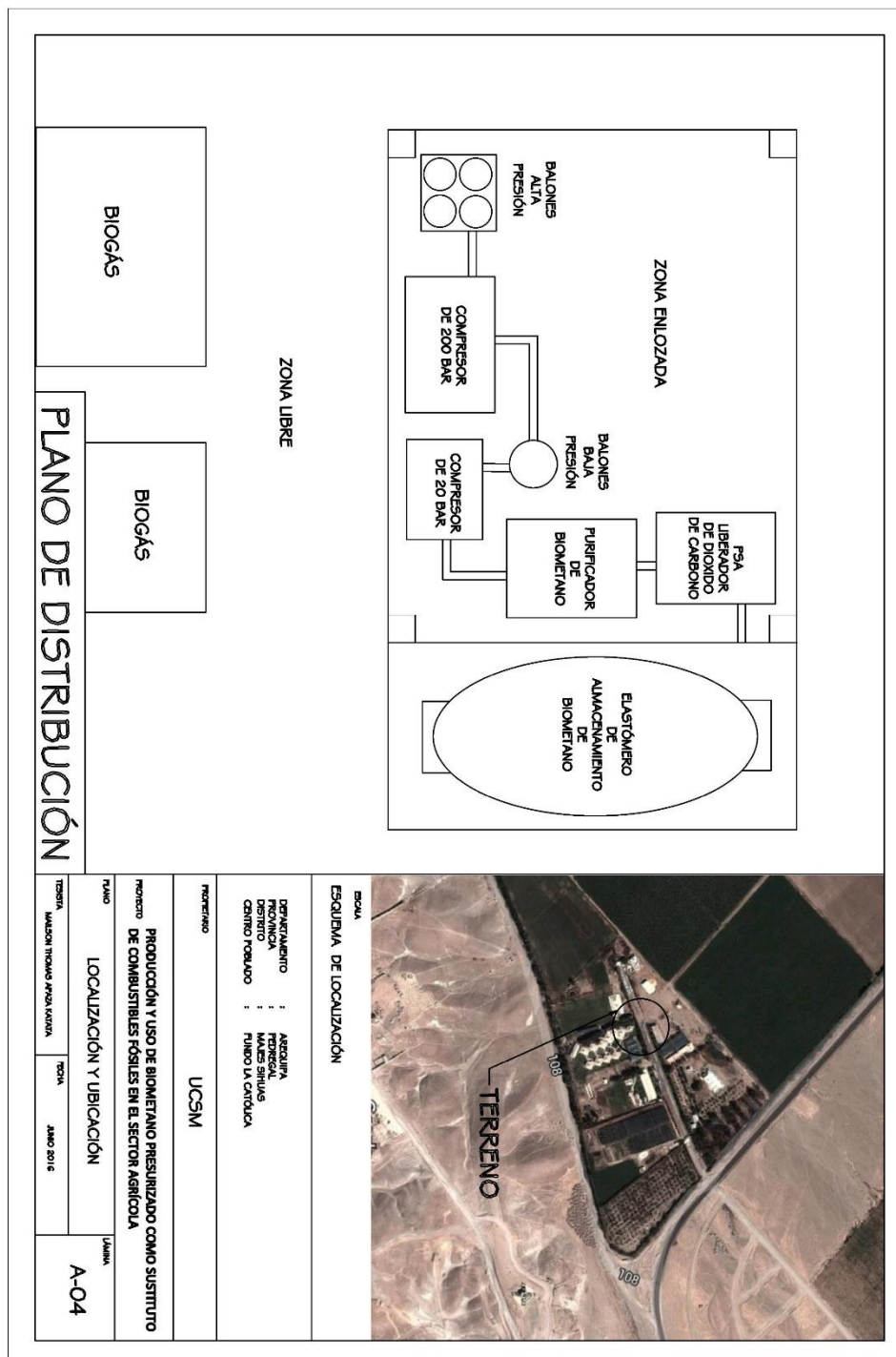
2014. KUVIER, ECOATIA, SEQUO, BMZ, IIDS, UCSM. Separata.

Zeballos, H. (2018). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO BÁSICO DE EQUIPO DE PURIFICACIÓN UTILIZANDO SCRUBBER PARA MEJORAR EL BIOGÁS REDUCIENDO SU CONTENIDO DE DIÓXIDO DE CARBONO EN EL DISTRITO DE MAJES-AREQUIPA. [Tesis de Pre-grado, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA]. Recuperado desde:

<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7750>

### 8. ANEXOS

#### ANEXO 1: PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA DE PRESURIZACIÓN DE BIOMETANO



ANEXO 2: ESPECIFICACIONES SOBRE BIOMETANO EN ESTANDARES DE  
LA INDIA

भारतीय मानक

बायोगैस (बायोमीथेन) — विशिष्टि

*Indian Standard*

## BIOGAS (BIOMETHANE) — SPECIFICATION

## FOREWORD

This Indian Standard was adopted by the Bureau of Indian Standards, after the draft finalized by the Petroleum, Lubricants and Their Related Products Sectional Committee had been approved by the Petroleum, Coal and Related Products Division Council.

The purpose of this standard is to provide general guidelines for the biogas (biomethane) composition, quality parameters and for biogas (biomethane) thermal application, applications in stationary engines, automotive applications and supply through piped network.

Biogas (biomethane) as a fuel, meeting the requirements of the compositional standards, should,

- a) provide the safe operation of the engine whether stationary or automotive and associated equipments;
- b) protect the fuel system from the detrimental effects of corrosion, poisoning and liquid or solid deposition; and
- c) not emit any pollutants or the greenhouse gases after combustion, beyond prescribed limit.

Biogas (biomethane) is primarily methane gas which is generated from an anaerobic digestion of organic wastes by micro organisms. It is a relatively simple and economical method to produce a fuel from waste. While technically biogas (biomethane) can be produced from any type of organic material, most times, biogas (biomethane) is produced from organic waste. This waste could comprise agricultural and crop waste, human waste and animal waste (cow dung for instance). Biogas (biomethane) is an environment friendly, clean, cheap and versatile fuel which can be used for various applications.

Biogas (biomethane) is a natural product produced from the biodegradable substrates like cattle dung, poultry waste, food waste, sewage waste etc. It has methane as the main component around 50-70 percent, CO<sub>2</sub> around 30-40 percent and H<sub>2</sub>S and moisture in trace quantities. It varies in composition depending upon the substrates used. The raw biogas (biomethane) from the biogas (biomethane) digesters is properly processed and purified from the unwanted gases like CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S and moisture upto a certain required level.

While implementing this standard all the regulatory and statutory provisions shall be complied.

For the purpose of deciding whether a particular requirement of this standard is complied with, the final value, observed or calculated, expressing the result of a test or analysis, shall be rounded off in accordance with IS 2 : 1960 'Rules for rounding off numerical values (revised)'. The number of significant places retained in the rounded off value should be the same as that of the specified value in this standard.

IS 16087 : 2013

## *Indian Standard* BIOGAS (BIOMETHANE) — SPECIFICATION

### 1 SCOPE

This standard prescribes the requirements and the methods of sampling and test for the biogas (biomethane) applications in stationary engines, automotive and thermal applications and supply through piped network.

### 2 REFERENCES

The following standards contain provisions which through reference in this text constitute the provisions of the standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision and parties to agreements based on this standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standard indicated below:

<i>IS No./ International Standard</i>	<i>Title</i>
1070 : 1992	Reagent grade water ( <i>third revision</i> )
7285 (Part 2) : 2004	Refillable seamless steel gas cylinders: Part 2 Quenched and tempered steel cylinders with tensile strength less than 1 100 MPa (112 kgf/mm <sup>2</sup> )
15125 : 2002/ ISO 10715 : 1997	Natural gas — Sampling guidelines
15130 (Part 3) : 2002/ ISO 6974-3 : 2000	Natural gas — Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography: Part 3 Determination of hydrogen, helium, oxygen, nitrogen, carbon dioxide and hydrocarbons up to C <sub>8</sub> using two packed columns
15319 : 2003/ ISO 13734 : 1998	Natural gas — Organic sulphur compounds used as odorants — Requirements and test methods
15320 : 2003/ ISO 15403 : 2000	Natural gas — Designation of the quality of natural gas for use as a compressed fuel for vehicles
15490 : 2004	Cylinders for on-board storage of compressed natural gas as a fuel for automotive vehicles
15641 (Part 2) : 2006/ ISO 10101-2 : 1993	Natural gas — Determination of water by Karl Fischer method: Part 2 Titration procedure

### *IS No./*

### *International Standard*

ISO 6326-3 : 1989	Natural gas — Determination of sulphur compounds: Part 3 Determination of hydrogen sulphide, mercaptan sulphur and carbonyl sulphide sulphur by potentiometry
ISO 14532 : 2001	Natural gas — Vocabulary

### *Title*

### 3 TERMINOLOGY

For the purpose of this standard, the definitions given in ISO 14532 shall apply.

### 4 REQUIREMENTS

**4.1** Biogas (biomethane) shall be free from liquids over the entire range of temperatures and pressures encountered in the storage and dispensing system, fuel containers, engine and fuel system and piped network.

**4.2** The biogas (biomethane) fuel shall be free from particulate matter such as dust, dirt and mist.

#### 4.3 Odour

Biogas (biomethane) delivered to any vehicle, stationary engine or piped network, shall be odorized similar to a level found in the local distribution (*see* IS 15319).

**4.4** The biogas (biomethane) for automotive application and piped network shall also comply with the requirements given in Table 1 when tested in accordance with the methods given in col 4 of Table 1.

**Table 1 Requirements for Biogas (Biomethane)**

Sl No. (1)	Characteristic (2)	Requirements (3)	Method of Test, Ref to (4)
i)	CH <sub>4</sub> , percent, <i>Min</i>	90	IS 15130 (Part 3)
ii)	Moisture, mg/m <sup>3</sup> , <i>Max</i>	16	IS 15641 (Part 2)
iii)	H <sub>2</sub> S, mg/m <sup>3</sup> , <i>Max</i>	30.3	ISO 6326-3
iv)	CO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> , percent, <i>Max (w/v)</i>	10	IS 15130 (Part 3)
v)	CO <sub>2</sub> , percent, <i>Max (w/v)</i> (when intended for filling in cylinders)	4	IS 15130 (Part 3)
vi)	O <sub>2</sub> , percent, <i>Max (w/v)</i>	0.5	IS 15130 (Part 3)

## ANEXO 3: ESPECIFICACIONES SOBRE EL GRUPO MOTOR GENERADOR

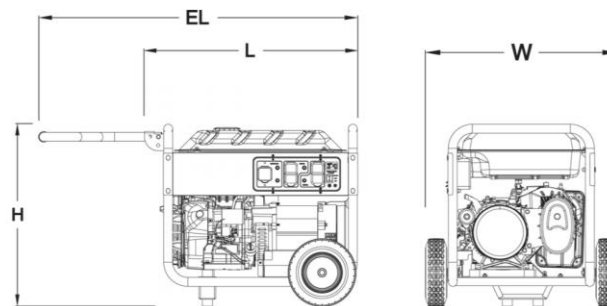
### GP7500E

#### specifications

Product Series	GP7500E	Start Switch Type	3-Position
Model	5943-0	Switch Location	On Control Panel
Configuration/Emissions	49-State	Single-Point Lifting Eye	N/A
A/C Rated Output Watts:	7500	Fuel Gauge	Built-in Tank
A/C Maximum Output Watts:	9375	Fuel Tank Capacity (Gal)	8.00
A/C Voltage	120/240VAC	Fuel Tank Capacity (Ltrs)	30.28
A/C Frequency	60 Hz	Run Time at 50% (Hours)	12.00
Rated 120/240 VAC Amperage	31.2	Cord Set	N/A
Max 120/240 VAC Amperage	39.0	Handle Style	Folding
Engine Displacement	420cc	Wheel type	9.5" Solid Wheels
Engine Type	OHV	Maintenance Kit	Sold Separately
Engine RPM	3600	Warranty - Residential	2 Year
Recommended Oil	SAE30	Warranty - Commercial	1 Year
Lubrication Method	Splash Sump		
Choke Type	Manual Lever		
Fuel Shut Off	Manual Lever		
Idle Control	Full Speed		
Starting Method	Electric/Manual		
Battery	Included		
Battery Size	12VDC 10 Ahr		
Low Oil Shutdown Method	Low Level		

#### dimensions and weights

Length (L)	28.8
Width (W)	26.8
Height (H)	26.0
Extended Length (EL)	45.0
Carton Length	31.0
Carton Width	21.7
Carton Height	24.0
Unit Weight (lbs)	201.0
Shipping Weight (lbs)	215.0



**GENERAC**

Generac Power Systems, Inc. • S45 W29290 HWY. 59, Waukesha, WI 53189 • generac.com

© 2011 Generac Power Systems, Inc. All rights reserved. All specifications are subject to change without notice. Bulletin 0189310SBV/Printed in U.S.A. 3/31/2011

ANEXO 4: COSTO DE PRODUCCIÓN DE UNA PLANTA DE BIOMETANO

DESCRIPCION	PLANTA BIOGAS	PLANTA FILTRADO	PLANTA PRESURIZADO	
VN (US\$)	18,000	9,500	22,000	
VR (US\$)	4,500	1,900	6,600	
CGCR (h-1)	0.00002	0.000015	0.00003	
Duración (años)	12	15	12	
Tasa interes nominal.	0.08	0.08	0.08	
Tasa inflación	0.04	0.04	0.04	
Costo Mano obra (US\$/h)	2.36	2.36	2.36	
Mano de obra (h/día)	2	1	2	
Potencia eléctrica (kW)	2	1	6	
Costo electricidad (US\$/kW.h)	0.17	0.17	0.17	
Uso electricidad (h/día)	2	15	15	
Estiércol (t/año)	120	0	0	
Costo estiércol (US\$/t)	30.30	0	0	
Uso anual (h/año)	5600	5250	5250	
Tasa interes real	0.04	0.04	0.04	
Cargas sociales	1.18	1.18	1.18	
Seguro (US\$/año)	360	190	440	
Resguardo (US\$/año)	270	142.5	330	
Salario (US\$/año)	1,654.55	827.27	1,654.55	
GCR (US\$/año)	2,016	748	3,465	
Electricidad (US\$/año)	233.33	875	5,250	
Amortizacion (US\$/año)	1,125.00	506.67	1,283.33	
Interes (US\$/año)	450	228	572	
Costo Total (US\$/año)	9,745.24	3,517.56	12,994.88	26,257.69
Costo Medio (US\$/h)	1.74	0.67	2.48	4.89

ANEXO 5: COSTO POR VOLUMEN DE BIOMETANO

BIOMETANO	
Costo	0.61 US\$/m3

ANEXO 6: TABLA DE DATOS BIOMETANO, GLP Y GASOLINA

GASOLINA																
DEMANDA	TIEMPO (min)	POTENCIA		GASES DE ESCAPE						CONSUMO			TEMPERATURAS DE MOTOR			
		TENSIÓN (V)	CORRIENTE (Amp)	CO %	HC (ppm)	CO2 %	O2 %	N2	CO+CO2	Peso inicial (Kg)	Peso Final (Kg)	Temp escape (°C)	Temp carter (°C)	Temp motor 1 (°C)	Temp motor 2 (°C)	Temp motor 3 (°C)
1000 W	5	242.2	5.11	9.85	166	8.6	0.09	81.46	18.45	17.17	17.06	286	51.6	70	104.3	130.2
2000 W	5	242.1	10.17	9.87	156	8.5	0.06	81.57	18.37	17.01	16.87	301.7	53.4	67	105.3	127.9
3000 W	5	241.8	15.08	11.86	118	7.07	0.07	81	18.93	16.81	16.63	347	49.8	67.5	108.2	131.7
4000 W	5	241.3	20.15	11.82	121	7.4	0.01	80.77	19.22	16.49	16.28	363.7	51.8	75.1	105.4	144.1

GLP																
DEMANDA	TIEMPO (min)	POTENCIA		GASES DE ESCAPE						CONSUMO			TEMPERATURAS DE MOTOR			
		TENSIÓN (V)	CORRIENTE (Amp)	CO %	HC (ppm)	CO2 %	O2 %	N2	CO+CO2	Peso inicial (kg)	Peso inicial (m3)	Peso Final (m3)	Temp escape (°C)	Temp carter (°C)	Temp motor 1 (°C)	Temp motor 2 (°C)
1000 W	5	241.8	5.99	11.28	647	5.9	0.2	82.62	17.18	21.42	60.467	282.2	50.8	59.6	90.1	105.4
2000 W	5	241.8	10.03	10.18	366	6.7	0.08	83.04	16.88	21.29	60.581	306.6	46.2	61.3	80.3	104.8
3000 W	5	241.3	15.07	8.57	219	7.9	0.05	83.48	16.47	21.14	60.744	314	36.5	64.5	81.3	101.7
4000 W	5	240.9	20.07	7.7	190	8.5	0.04	83.76	16.2	20.82	60.926	351.6	51.2	68.7	96.7	128.7
5000 W	5	220.3	18.84	9.58	261	6.7	0.88	82.84	16.28	61.15	61.271	332	66	68.3	105	138

BIOMETANO																	
DEMANDA	TIEMPO (min)	POTENCIA			GASES DE ESCAPE					CONSUMO			TEMPERATURAS DE MOTOR				
		TENSIÓN (V)	CORRIENTE (Amp)		CO (%)	HC (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	N2	CO+CO2	Peso inicial (m3)	Peso Final (m3)	Temp escape (°C)	Temp carter (°C)	Temp motor 1 (°C)	Temp motor 2 (°C)	Temp motor 3 (°C)
1000 W	5	242.4	4.44		0.18	0	12.5	1.24	86.08	12.68	7.874	8.078	335.5	67	71.5	107.7	141.3
					0.09	140	11.9	2.76	85.25	11.99							
					0.016	0	13.1	0.64	86.244	13.26							
					0.12	100	10.6	4.49	84.79	10.72							
2000 W	5	242.3	9.41		0.13	0	10.6	4.11	85.16	10.73	7.561	7.834	341.6	68.2	77.3	110.9	146.3
					0.08	181	11.2	3.73	84.99	11.28							
					0.09	20	11.3	3.37	85.24	11.39							
					0.06	120	12.2	2.2	85.54	12.26							
					0.04	303	9.9	6.03	84.03	9.94							
3000 W	5	225	13.79		0.13	0	12.6	1.35	85.92	12.73	7.212	7.482	367.8	67	75	115	145.6
					0.08	252	11.2	3.53	85.19	11.28							
					0.04	262	9.4	6.43	84.13	9.44							
					0.04	232	9.2	6.7	84.06	9.24							
4000 W	5	183.4	16.3		0.23	40	13.2	0.56	86.01	13.43	6.8	7.048	254.8	55	65.4	111.9	159.6
					0.06	181	8.1	7.99	83.85	8.16							
					0.06	130	7.4	9.13	83.41	7.46							

ANEXO 6: TABLA DATOS ENERGÉTICOS BIOMETANO, GLP Y GASOLINA

GASOLINA																		
TIEMPO MIN	DEMANDA W	CONSUMO KG	CONSUMO MB	R a/c	m aire kg	PCI	41612		740.212		N EXER							
							m total	cpar	kJ/kg	Q COMB		Q POTENCIA	QK Indet	N ENER	β	Ecomb	Egases	Ek indet
300	1000	0.11	0.0001486	10.4081	1.1449	1.2549	1.0412	1.1626	15.26	1.29	1.24	12.73	0.0811	1.0444	15.94	0.62	14.08	0.078
300	2000	0.14	0.0001891	10.3656	1.4512	1.5912	1.0446	1.1685	19.42	1.75	2.46	15.21	0.1268	1.0444	20.28	0.86	16.96	0.121
300	3000	0.18	0.0002432	11.22	2.0196	2.1996	1.0552	1.1752	24.97	2.82	3.65	18.50	0.1460	1.0444	26.08	1.49	20.94	0.140
300	4000	0.21	0.0002837	11.26	2.3646	2.5746	1.0592	1.1805	29.13	3.48	4.86	20.78	0.1669	1.0444	30.42	1.88	23.68	0.160
300	5000	0.27	0.0003648	11.52	3.1104	3.3804	1.0695	1.1926	37.45	5.19	6.18	26.08	0.1651	1.0444	39.11	2.95	29.98	0.158

GLP																		
TIEMPO MIN	DEMANDA W	CONSUMO KG	CONSUMO MB	R a/c	m aire kg	PCI	49718		2.49		N EXER							
							m total	cpar	kJ/kg	Q COMB		Q POTENCIA	QK Indet	N ENER	β	Ecomb	Egases	Ek indet
300	1000	0.23904	0.096	12.49	2.9856	3.2246	1.0403	1.1427	39.62	3.22	1.45	34.95	0.0366	1.03815	41.13	1.52	38.16	0.035
300	2000	0.24402	0.098	12.71	3.1015	3.3455	1.0458	1.1489	40.44	3.67	2.43	34.34	0.0600	1.03815	41.98	1.82	37.74	0.058
300	3000	0.27888	0.112	11.47	3.1988	3.4776	1.0474	1.1616	46.22	3.96	3.64	38.62	0.0787	1.03815	47.98	1.98	42.36	0.076
300	4000	0.32868	0.132	11.811	3.8820	4.2107	1.0563	1.1712	54.47	5.45	4.83	44.19	0.0888	1.03815	56.55	2.89	48.82	0.085
300	5000	0.30129	0.121	11.718	3.5305	3.8318	1.0516	1.1654	49.93	4.64	4.15	41.14	0.0831	1.03815	51.84	2.40	45.29	0.080

BIOMETANO																		
TIEMPO MIN	DEMANDA W	CONSUMO KG	CONSUMO MB	R a/c	m aire kg	PCI	23420.74		1.1513		N EXER							
							m total	cpar	kJ/kg	Q COMB		Q POTENCIA	QK Indet	N ENER	β	Ecomb	Egases	Ek indet
300	1000	0.2349	0.204	9.819	2.3061	2.5409	1.0923	1.2265	18.34	3.28	1.08	13.98	0.0587	1.0396	19.06	1.70	16.29	0.056
300	2000	0.3143	0.273	10.593	3.3293	3.6436	1.0780	1.2039	24.54	4.70	2.28	17.55	0.0929	1.0396	25.51	2.46	20.77	0.089
300	3000	0.3108	0.27	9.909	3.0801	3.3910	0.9858	1.1227	24.27	4.41	3.10	16.75	0.1279	1.0396	25.23	2.40	19.73	0.123
300	4000	0.2855	0.248	9.288	2.6519	2.9374	0.9461	1.0765	22.29	2.47	2.99	16.83	0.1341	1.0396	23.17	1.10	19.08	0.129

ANEXO 7: FOTOS DEL ENSAYO

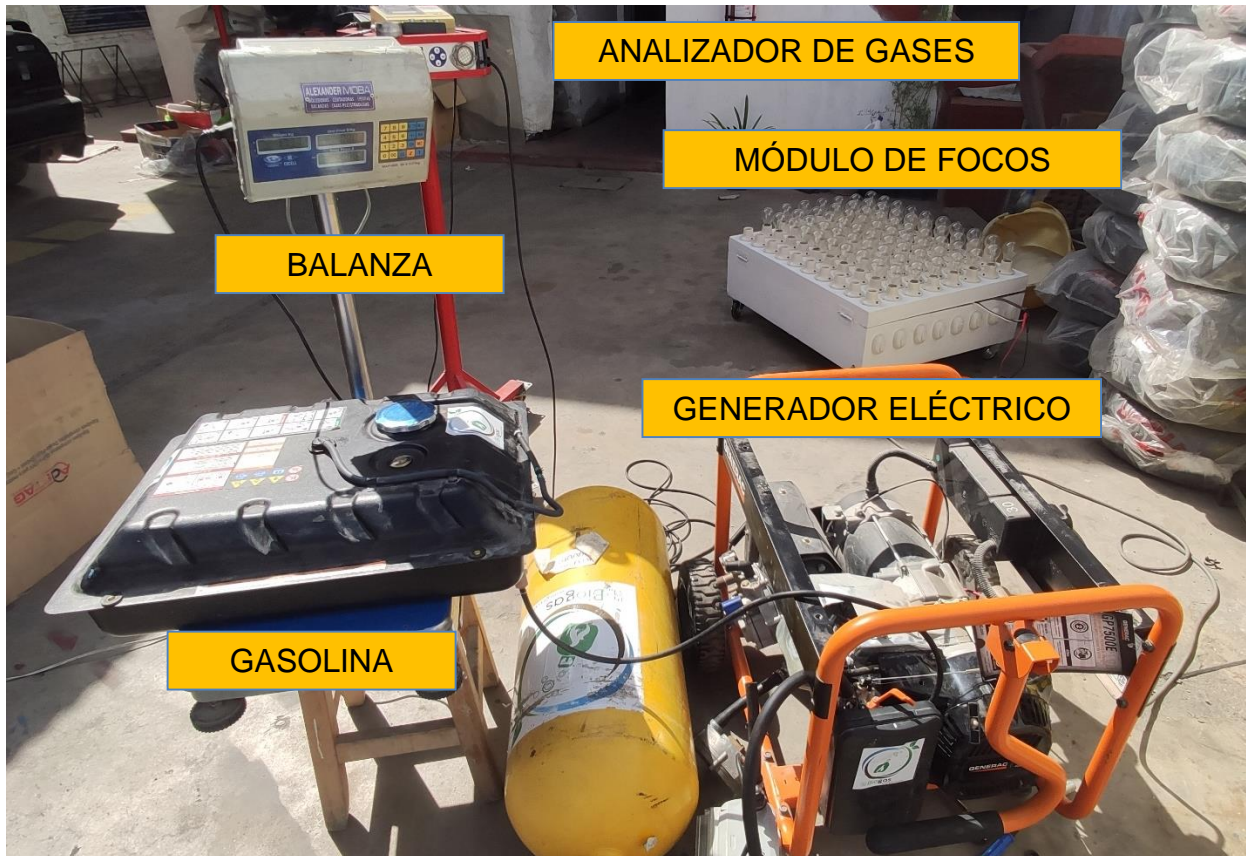


FOTO 1: MODULO DE ENSAYO DE GASOLINA



FOTO 2: MODULO ENSAYO BIOMETANO



FOTO 3: MODULO ENSAYO GLP



FOTO 4: MEDICIÓN DE POTENCIA EN MÓDULO FOCOS



FOTO 5: ANALIZADOR DE GASES USADO



FOTO 6: MEDICIÓN TEMPERATURA DE ESCAPE DE MOTOR



FOTO 7: MEDICIÓN PESO POR 5 MINUTOS EN BALANZA

ANEXO 8: RESULTADOS DE ANÁLISIS ANALIZADOR DE GASES

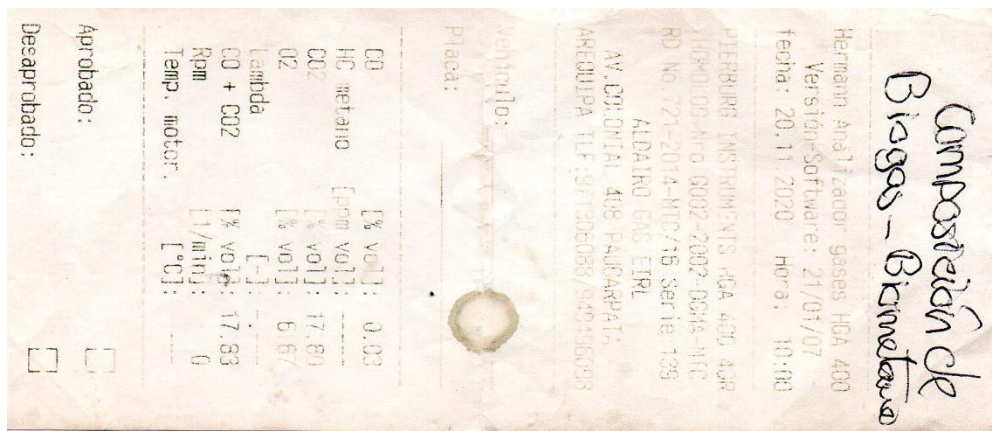
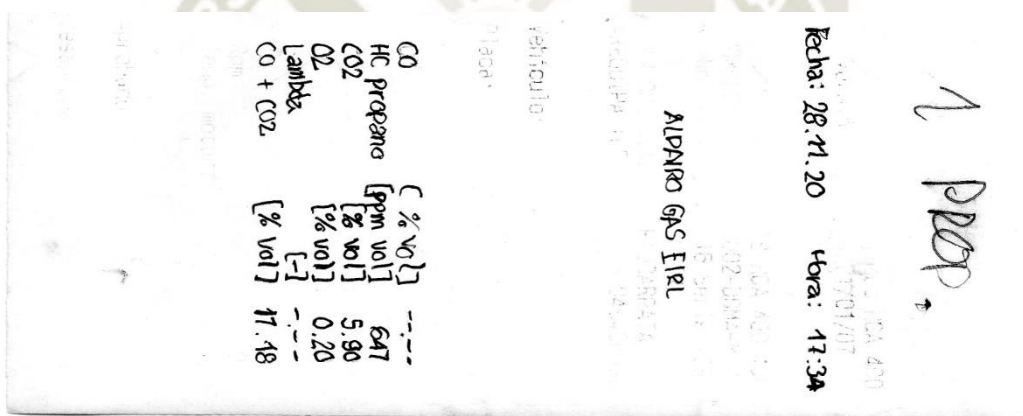


FOTO1: Composición de Biogás purificado



FOTOS 2: Resultado a diferentes cargas de GLP a 1000 KW



FOTOS 3: Resultado a diferentes cargas de GLP a 2000 KW



FOTOS 4: Resultado a diferentes cargas de GLP a 3000 KW



FOTOS 5: Resultado a diferentes cargas de GLP a 4000 KW



FOTOS 6: Resultado a diferentes cargas de GLP a 5000 KW



FOTOS 7: Resultado a diferentes cargas de Gasolina a 1000 KW



FOTOS 8: Resultado a diferentes cargas de Gasolina a 2000 KW



FOTOS 9: Resultado a diferentes cargas de Gasolina a 3000 KW

*M gasolina.*

Hermann Analizador gases HGA 400  
 Versión-Software: 21/01/07  
 fecha: 20.11.2020 Hora: 15:04

PIEBURG INSTRUMENTS HGA 400 4SR  
 HOMOLOG. Nro G002-2002-DSMA-MTC  
 RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139  
 ALDAIRO GAS EIRL  
 AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA  
 AREQUIPA TLF: 971306088/949496096

Vehículo: \_\_\_\_\_  
 Placa: \_\_\_\_\_

CO	[% vol]:	121
HC hexano	[ppm vol]:	7.40
CO2	[% vol]:	0.01
O2	[% vol]:	19.22
Lambda	[-]:	0
CO + CO2	[% vol]:	0
Rpm	[1/min]:	---
Temp. motor.	[°C]:	---

Aprobado:

Desaprobado:

FOTOS 10: Resultado a diferentes cargas de Gasolina a 4000 KW

*5 gasol.*

Hermann Analizador gases HGA 400  
 Versión-Software: 21/01/07  
 fecha: 20.11.2020 Hora: 15:11

PIEBURG INSTRUMENTS HGA 400 4SR  
 HOMOLOG. Nro G002-2002-DSMA-MTC  
 RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139  
 ALDAIRO GAS EIRL  
 AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA  
 AREQUIPA TLF: 971306088/949496096

Vehículo: \_\_\_\_\_  
 Placa: \_\_\_\_\_

CO	[% vol]:	89
HC hexano	[ppm vol]:	8.20
CO2	[% vol]:	0.00
O2	[% vol]:	18.77
Lambda	[-]:	0
CO + CO2	[% vol]:	0
Rpm	[1/min]:	---
Temp. motor.	[°C]:	---

Aprobado:

Desaprobado:

FOTOS 11: Resultado a diferentes cargas de Gasolina a 5000 KW

1 B10

A, X

1, 1, 2 B15

1, 1, 3 B10

Hermann Analizador gases HGA 400  
Version-Software: 21/01/07  
fecha: 28.11.2020 Hora: 13:36

PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR  
HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC  
RD No. 721-2014-MTC/16 Serie:139  
ALDAIRO GAS EIRL  
AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA  
AREQUIPA TLF: 971306098/949496098

Vehículo: \_\_\_\_\_  
Placa: \_\_\_\_\_

CO	[% vol]:	0.18
HC propano	[ppm vol]:	0
CO2	[% vol]:	12.50
O2	[% vol]:	1.24
Lambda	[-]:	1.091
CO + CO2	[% vol]:	12.68
Rpm	[1/min]:	0
Temp. motor.	[°C]:	---

Aprobado:  Desaprobado:

Hermann Analizador gases HGA 400  
Version-Software: 21/01/07  
fecha: 28.11.2020 Hora: 13:36

PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR  
HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC  
RD No. 721-2014-MTC/16 Serie:139  
ALDAIRO GAS EIRL  
AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA  
AREQUIPA TLF: 971306098/949496098

Vehículo: \_\_\_\_\_  
Placa: \_\_\_\_\_

CO	[% vol]:	0.09
HC metano	[ppm vol]:	140
CO2	[% vol]:	11.90
O2	[% vol]:	2.76
Lambda	[-]:	1.226
CO + CO2	[% vol]:	11.99
Rpm	[1/min]:	0
Temp. motor.	[°C]:	---

Aprobado:  Desaprobado:

Hermann Analizador gases HGA 400  
Version-Software: 21/01/07  
fecha: 28.11.2020 Hora: 16:10

PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR  
HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC  
RD No. 721-2014-MTC/16 Serie:139  
ALDAIRO GAS EIRL  
AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA  
AREQUIPA TLF: 971306098/949496098

Vehículo: \_\_\_\_\_  
Placa: \_\_\_\_\_

CO	[% vol]:	0.16
HC metano	[ppm vol]:	0
CO2	[% vol]:	13.10
O2	[% vol]:	0.64
Lambda	[-]:	1.042
CO + CO2	[% vol]:	13.26
Rpm	[1/min]:	0
Temp. motor.	[°C]:	---

Aprobado:  Desaprobado:

Hermann Analizador gases HGA 400  
Version-Software: 21/01/07  
fecha: 28.11.2020 Hora: 16:11

PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR  
HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC  
RD No. 721-2014-MTC/16 Serie:139  
ALDAIRO GAS EIRL  
AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA  
AREQUIPA TLF: 971306098/949496098

Vehículo: \_\_\_\_\_  
Placa: \_\_\_\_\_

CO	[% vol]:	0.12
HC metano	[ppm vol]:	100
CO2	[% vol]:	10.60
O2	[% vol]:	4.49
Lambda	[-]:	1.413
CO + CO2	[% vol]:	10.72
Rpm	[1/min]:	0
Temp. motor.	[°C]:	---

Aprobado:  Desaprobado:

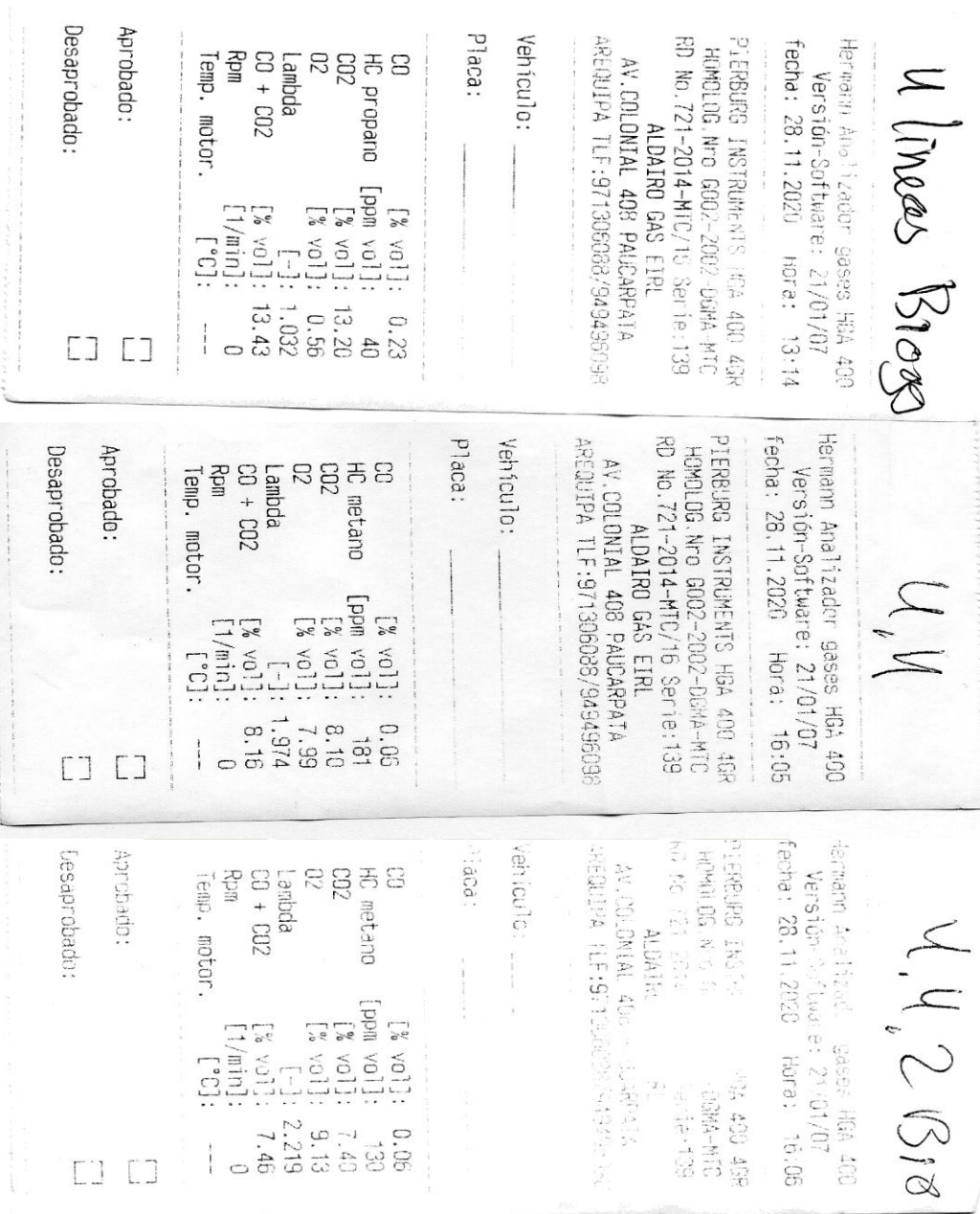
FOTOS 12: Resultado a diferentes cargas de BIOMETANO a 1000 KW

<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">2,2 B10</p> <p>Herrmann Analizador gases HGA 400 Versión-Software: 21/01/07 fecha: 28.11.2020 Hora: 16:02</p> <p>PIEBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949456098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <table border="0"> <tr><td>CO</td><td>[% vol]:</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>HC metano</td><td>[ppm vol]:</td><td>181</td></tr> <tr><td>CO2</td><td>[% vol]:</td><td>11.29</td></tr> <tr><td>O2</td><td>[% vol]:</td><td>3.73</td></tr> <tr><td>Lambda</td><td>[-]:</td><td>1.327</td></tr> <tr><td>CO + CO2</td><td>[% vol]:</td><td>11.28</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>[1/min]:</td><td>0</td></tr> <tr><td>Temp. motor.</td><td>[°C]:</td><td>---</td></tr> </table> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/></p> <p>Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	CO	[% vol]:	0.08	HC metano	[ppm vol]:	181	CO2	[% vol]:	11.29	O2	[% vol]:	3.73	Lambda	[-]:	1.327	CO + CO2	[% vol]:	11.28	Rpm	[1/min]:	0	Temp. motor.	[°C]:	---	<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">2.2.2 B10</p> <p>Herrmann Analizador gases HGA 400 Versión-Software: 21/01/07 fecha: 28.11.2020 Hora: 16:08</p> <p>PIEBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 4,8 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949456095</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <table border="0"> <tr><td>CO</td><td>[% vol]:</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>HC metano</td><td>[ppm vol]:</td><td>20</td></tr> <tr><td>CO2</td><td>[% vol]:</td><td>11.30</td></tr> <tr><td>O2</td><td>[% vol]:</td><td>3.37</td></tr> <tr><td>Lambda</td><td>[-]:</td><td>1.292</td></tr> <tr><td>CO + CO2</td><td>[% vol]:</td><td>11.39</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>[1/min]:</td><td>0</td></tr> <tr><td>Temp. motor.</td><td>[°C]:</td><td>---</td></tr> </table> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/></p> <p>Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	CO	[% vol]:	0.09	HC metano	[ppm vol]:	20	CO2	[% vol]:	11.30	O2	[% vol]:	3.37	Lambda	[-]:	1.292	CO + CO2	[% vol]:	11.39	Rpm	[1/min]:	0	Temp. motor.	[°C]:	---	<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">2,2,3</p> <p>Herrmann Analizador gases HGA 400 Versión-Software: 21/01/07 fecha: 28.11.2020 Hora: 16:54</p> <p>PIEBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949456098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <table border="0"> <tr><td>CO</td><td>[% vol]:</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>HC metano</td><td>[ppm vol]:</td><td>120</td></tr> <tr><td>CO2</td><td>[% vol]:</td><td>12.20</td></tr> <tr><td>O2</td><td>[% vol]:</td><td>2.20</td></tr> <tr><td>Lambda</td><td>[-]:</td><td>1.177</td></tr> <tr><td>CO + CO2</td><td>[% vol]:</td><td>12.26</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>[1/min]:</td><td>0</td></tr> <tr><td>Temp. motor.</td><td>[°C]:</td><td>---</td></tr> </table> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/></p> <p>Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	CO	[% vol]:	0.06	HC metano	[ppm vol]:	120	CO2	[% vol]:	12.20	O2	[% vol]:	2.20	Lambda	[-]:	1.177	CO + CO2	[% vol]:	12.26	Rpm	[1/min]:	0	Temp. motor.	[°C]:	---	<p style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">2,2,5 B10</p> <p>Herrmann Analizador gases HGA 400 Versión-Software: 21/01/07 fecha: 28.11.2020 Hora: 16:57</p> <p>PIEBURG INSTRUMENTS HGA 400 4GR HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949456098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <table border="0"> <tr><td>CO</td><td>[% vol]:</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>HC metano</td><td>[ppm vol]:</td><td>303</td></tr> <tr><td>CO2</td><td>[% vol]:</td><td>9.90</td></tr> <tr><td>O2</td><td>[% vol]:</td><td>6.03</td></tr> <tr><td>Lambda</td><td>[-]:</td><td>1.503</td></tr> <tr><td>CO + CO2</td><td>[% vol]:</td><td>9.94</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>[1/min]:</td><td>0</td></tr> <tr><td>Temp. motor.</td><td>[°C]:</td><td>---</td></tr> </table> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/></p> <p>Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	CO	[% vol]:	0.04	HC metano	[ppm vol]:	303	CO2	[% vol]:	9.90	O2	[% vol]:	6.03	Lambda	[-]:	1.503	CO + CO2	[% vol]:	9.94	Rpm	[1/min]:	0	Temp. motor.	[°C]:	---
CO	[% vol]:	0.08																																																																																																	
HC metano	[ppm vol]:	181																																																																																																	
CO2	[% vol]:	11.29																																																																																																	
O2	[% vol]:	3.73																																																																																																	
Lambda	[-]:	1.327																																																																																																	
CO + CO2	[% vol]:	11.28																																																																																																	
Rpm	[1/min]:	0																																																																																																	
Temp. motor.	[°C]:	---																																																																																																	
CO	[% vol]:	0.09																																																																																																	
HC metano	[ppm vol]:	20																																																																																																	
CO2	[% vol]:	11.30																																																																																																	
O2	[% vol]:	3.37																																																																																																	
Lambda	[-]:	1.292																																																																																																	
CO + CO2	[% vol]:	11.39																																																																																																	
Rpm	[1/min]:	0																																																																																																	
Temp. motor.	[°C]:	---																																																																																																	
CO	[% vol]:	0.06																																																																																																	
HC metano	[ppm vol]:	120																																																																																																	
CO2	[% vol]:	12.20																																																																																																	
O2	[% vol]:	2.20																																																																																																	
Lambda	[-]:	1.177																																																																																																	
CO + CO2	[% vol]:	12.26																																																																																																	
Rpm	[1/min]:	0																																																																																																	
Temp. motor.	[°C]:	---																																																																																																	
CO	[% vol]:	0.04																																																																																																	
HC metano	[ppm vol]:	303																																																																																																	
CO2	[% vol]:	9.90																																																																																																	
O2	[% vol]:	6.03																																																																																																	
Lambda	[-]:	1.503																																																																																																	
CO + CO2	[% vol]:	9.94																																																																																																	
Rpm	[1/min]:	0																																																																																																	
Temp. motor.	[°C]:	---																																																																																																	

FOTOS 13: Resultado a diferentes cargas de BIOMETANO a 2000 KW

3 B50	3,3 B70	3,3,2	3,3,4
<p>Hermann Analizador gases HGA 400 Version-Software: 21/01/07 Fecha: 28.11.2020 Hora: 13:22</p> <p>PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 40R HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949493098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <p>CO [% vol]: 0.13 HC propano [ppm vol]: 0 CO2 [% vol]: 12.60 O2 [% vol]: 1.35 Lambda [-]: 1.101 CO + CO2 [% vol]: 12.73 Rpm [1/min]: 0 Temp. motor. [°C]: ---</p> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/> Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	<p>Hermann Analizador gases HGA 400 Version-Software: 21/01/07 Fecha: 28.11.2020 Hora: 16:03</p> <p>PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 40R HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949493098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <p>CO [% vol]: 0.08 HC metano [ppm vol]: 252 CO2 [% vol]: 11.20 O2 [% vol]: 3.53 Lambda [-]: 1.309 CO + CO2 [% vol]: 11.28 Rpm [1/min]: 0 Temp. motor. [°C]: ---</p> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/> Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	<p>Hermann Analizador gases HGA 400 Version-Software: 21/01/07 Fecha: 28.11.2020 Hora: 16:51</p> <p>PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 40R HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949493098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <p>CO [% vol]: 0.04 HC metano [ppm vol]: 262 CO2 [% vol]: 9.40 O2 [% vol]: 6.43 Lambda [-]: 1.678 CO + CO2 [% vol]: 9.44 Rpm [1/min]: 0 Temp. motor. [°C]: ---</p> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/> Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>	<p>Hermann Analizador gases HGA 400 Version-Software: 21/01/07 Fecha: 28.11.2020 Hora: 16:58</p> <p>PIERBURG INSTRUMENTS HGA 400 40R HOMOLOG. Nro 6002-2002-DGMA-MTC RD No. 721-2014-MTC/16 Serie: 139 ALDAIRO GAS EIRL AV. COLONIAL 408 PAUCARPATA AREQUIPA TLF: 971306088/949493098</p> <p>Vehículo: _____ Placa: _____</p> <p>CO [% vol]: 0.04 HC metano [ppm vol]: 232 CO2 [% vol]: 9.20 O2 [% vol]: 6.70 Lambda [-]: 1.722 CO + CO2 [% vol]: 9.24 Rpm [1/min]: 0 Temp. motor. [°C]: ---</p> <p>Aprobado: <input type="checkbox"/> Desaprobado: <input type="checkbox"/></p>

FOTOS 14: Resultado a diferentes cargas de BIOMETANO a 3000 KW



FOTOS 15: Resultado a diferentes cargas de BIOMETANO a 4000 KW

ANEXO 9  
PLANO ESQUEMATICO DE COMPRESOR DE BIOMETANO

