

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Estudio de la utilización energética de biogás por medios directos e indirectos

Ana Elizabeth Estrella You

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniera Química

Quito
Junio de 2012

Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Estudio de la utilización energética de biogás por medios directos e indirectos

Ana Elizabeth Estrella You

Dr.-Ing. Daniela Almeida

Directora de tesis y

Miembro del comité de tesis

Lourdes Orejuela, M.Sc.

Miembro del comité de tesis

Ing. César Octavio León Orellana

Miembro del comité de tesis

Santiago Gangotena, Ph.D.

Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito

Junio de 2012

© Derechos de autor
Ana Elizabeth Estrella You
2012

Agradecimientos

A Dios

A mis padres, a mi hermano

A mi directora de tesis Dr.-Ing. Daniela Almeida

A la Universidad San Francisco de Quito y al Decanato de Investigación por otorgar el financiamiento del proyecto

A Carlos Fabara, M.Sc., director del Departamento de Química e Ingeniería Química

A los miembros del comité de tesis, Lourdes Orejuela M.Sc., e Ing. César Octavio León Orellana

A mis amigos

A mis estudiantes

Resumen

En este trabajo se realiza el diseño y construcción del sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas de la Universidad San Francisco de Quito (LaDEA – USFQ) con el fin de obtener energía eléctrica a partir del funcionamiento de un generador eléctrico, y también obtener energía térmica mediante el uso de un calefón. En la primera parte se diseña el sistema de almacenamiento de biogás a presión atmosférica en base a la producción diaria promedio de biogás de la planta piloto durante el reinicio de su operación, la cual es de 303 L/día. Luego se diseña el sistema de compresión de biogás con todos los requerimientos y medidas de seguridad necesarias con el fin de comprimir el gas desde 1 bar hasta 8 bar. Posterior a esto, se construye el sistema de utilización energética de biogás con todos sus equipos y accesorios como: gasómetro, intercambiadores de calor, compresor, tanque de almacenamiento, separador tipo sifón, válvulas, llama piloto, generador, etc.; además del sistema de control automático para optimizar el uso del biogás. Por último, se prosigue con la puesta en marcha en frío para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema. Para este último paso se realiza el control de fugas y hermeticidad, y funcionamiento de equipos.

Abstract

This thesis project consists of the design and construction of a biogas energy use system for the pilot scale anaerobic digester of the Laboratory of Development of Alternative Energies at the San Francisco de Quito University (LaDEA – USFQ). The goal is to obtain electric power from the operation of an electric generator, and also obtain thermal energy by using a water heater with biogas. Initially, the biogas storage system at atmospheric pressure is designed based on the mean daily production of biogas of the pilot scale digester during the restart of its operation, which is 303 L/day. Then, the biogas compression system is designed including all the requirements and necessary security measures in order to compress the biogas from 1 bar to 8 bar. Once the design is finished, the biogas energy use system is built with all the necessary equipment and accessories such as: gas meter, heat exchangers, compressor, storage tank, siphon condensate drain, valves, flame arrester, generator, etc. Besides the automatic control system is built in order to optimize the use of biogas. During the commissioning the proper functioning of the system is checked. For this last step, the leakage control, and the sealing and operation of equipment are performed.

Tabla de contenido

Resumen	v
Abstract	vi
Tabla de contenido	vii
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xiv
Nomenclatura	xvi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
2 Fundamentos teóricos	4
2.1 Digestión anaerobia	4
2.1.1 Etapas microbiológicas de la digestión anaerobia	4
2.1.2 Parámetros de operación en la de producción de biogás	8
2.1.3 Biol	10
2.2 Biogás	10
2.2.1 Características del biogás	10
2.2.2 Principales usos y aplicaciones del biogás	11
2.2.2.1 Uso doméstico	11
2.2.2.2 Obtención de energía eléctrica	12
2.2.2.3 Obtención de energía térmica	14
2.2.2.4 Materia prima para la síntesis química	16
2.2.3 Purificación del biogás	17
2.3 Descripción de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA	18
2.4 Utilización energética de biogás	20
2.4.1 Almacenamiento de biogás	20

2.4.2	Compresión de biogás	22
2.4.3	Obtención de energía eléctrica a partir de biogás	26
2.4.3.1	Motor gas-Otto	26
2.4.3.2	Motor inyección-piloto	30
2.4.3.3	Motor Stirling	34
2.4.4	Obtención de energía térmica a partir de biogás	35
3	Diseño del sistema de utilización energética de biogás	36
3.1	Cuantificación y caracterización del biogás	37
3.1.1	Prueba de gas	37
3.1.2	Contenido de H ₂ S	40
3.1.3	Cuantificación del biogás	42
3.2	Diseño del sistema de utilización energética de biogás	46
3.2.1	Proceso general del sistema de utilización energética de biogás	46
3.2.2	Diseño del sistema de purificación del biogás	49
3.2.3	Diseño del sistema de acumulación del biogás	53
3.2.4	Diseño del sistema de compresión de biogás	59
3.2.5	Diseño de los intercambiadores de calor	61
3.2.6	Diseño del separador tipo sifón	74
3.2.7	Tanque de almacenamiento de gas a presión	76
3.2.8	Generador eléctrico	77
3.2.9	Calefón	79
3.2.10	Accesorios	80
3.2.11	Instrumentación	88
3.2.12	Diagrama de flujo	91
3.3	Pérdidas de presión	95
3.4	Implementación del sistema de utilización energética de biogás	98
4	Análisis económico del sistema de utilización energética de biogás	99
5	Puesta en marcha en frío	100
5.1	Funcionamiento de las válvulas electromecánicas	100
5.2	Funcionamiento del compresor	100

5.3	Funcionamiento del generador	101
5.4	Funcionamiento del calefón	101
5.5	Sellado de tuberías para biogás	101
5.6	Hermeticidad del gasómetro	102
5.7	Hermeticidad del separador tipo sifón	102
5.8	Hermeticidad de los intercambiadores de calor	102
5.9	Ciclo de llenado del tanque de almacenamiento	103
6	Conclusión y Recomendaciones	106
7	Bibliografía	109
8	Anexos	113
	Anexo 1	113
	Anexo 2	119
	Anexo 3	121

Lista de figuras

Figura 2.1: Reacciones enzimáticas de descomposición durante la hidrólisis	5
Figura 2.2: Reacciones de la acidogénesis	6
Figura 2.3: Reacciones de oxidación de la acetogénesis	6
Figura 2.4: Etapas principales de la digestión anaerobia.....	7
Figura 2.5: Uso doméstico del biogás [²⁰]	12
Figura 2.6: Energía obtenida al combustionar 1 m ³ de biogás	14
Figura 2.7: Obtención de energía térmica a partir del biogás.....	15
Figura 2.8: Diagrama de bloques de la digestión anaerobia de la planta piloto del LaDEA	19
Figura 2.9: Depósito de gas externo de baja presión [¹²].....	21
Figura 2.10: Cúpula de un digestor vista desde el interior [¹²].....	22
Figura 2.11: Esquema del funcionamiento de un compresor de tornillo [³⁰]	23
Figura 2.12: Esquema del funcionamiento de un compresor de pistón [³⁰]	24
Figura 2.13: Esquema de un compresor de espiral [³¹].....	25
Figura 2.14: Fase de admisión en el ciclo de Otto [³⁴]	27
Figura 2.15: Fase de compresión en el ciclo de Otto [³⁴]	28
Figura 2.16: Fase de trabajo en el ciclo de Otto [³⁴].....	29
Figura 2.17: Fase de escape en el ciclo de Otto [³⁴]	30
Figura 2.18: Fase de admisión del funcionamiento de un motor inyección-piloto [³⁶].....	31
Figura 2.19: Fase de compresión del funcionamiento de un motor inyección-piloto [³⁶]...	32
Figura 2.20: Fase de trabajo del funcionamiento de un motor inyección-piloto [³⁶].....	33
Figura 2.21: Fase de escape del funcionamiento de un motor inyección-piloto [³⁶].....	34
Figura 3.1: Diagrama de bloque general del proceso de utilización energética de biogás..	36
Figura 3.2: Prueba cualitativa del biogás (combustión)	37

Figura 3.3: Absorción química del CO ₂ en la solución de NaOH al 4 %. (a) antes de la absorción, (b) después de varias pruebas de absorción	38
Figura 3.4: Calidad del biogás durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.....	39
Figura 3.5: Calidad del biogás durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA	40
Figura 3.6: Tubos colorimétricos Dräger y bomba manual Dräger accuro [³⁷].....	41
Figura 3.7: Medición del contenido de H ₂ S del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.....	42
Figura 3.8: Contador de gas.....	43
Figura 3.9: Producción diaria de biogás durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.....	43
Figura 3.10: Producción diaria de metano durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.....	44
Figura 3.11: Producción diaria de biogás durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.....	45
Figura 3.12: Producción diaria de metano durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.....	46
Figura 3.13: Proceso del sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto del LaDEA.....	48
Figura 3.14: Filtro de eliminación de H ₂ S.....	49
Figura 3.15: Filtro de eliminación de olores y de vapor de agua	52
Figura 3.16: Trampa de agua.....	53
Figura 3.17: Esquema de las condiciones iniciales del gasómetro de biogás.....	55
Figura 3.18: Esquema del gasómetro lleno con biogás	56
Figura 3.19: Gasómetro (vista exterior)	57
Figura 3.20: Gasómetro (vista interior)	57
Figura 3.21: Nivel adjunto al tanque # 1 del gasómetro.....	58

Figura 3.22: Sensor de nivel del agua del gasómetro [³⁹]	58
Figura 3.23: Compresor de aire TRUPER [⁴⁰]	60
Figura 3.24: Motor del compresor	60
Figura 3.25: Viscosidad del agua	66
Figura 3.26: Conductividad del agua	67
Figura 3.27: Intercambiador de calor. (a) vista exterior, (b) vista interior	73
Figura 3.28: Esquema del separador tipo sifón [³²]	74
Figura 3.29: Separador tipo sifón	75
Figura 3.30: Tanque de almacenamiento de gas a presión	76
Figura 3.31: Generador	77
Figura 3.32: Modificación del tubo de escape del generador eléctrico. (a) alargue del tubo de escape, (b) salida del tubo de escape en el exterior del LaDEA	79
Figura 3.33: Calefón	79
Figura 3.34: Esquema de un arrestallamas [³²]	81
Figura 3.35: Arrestallama	81
Figura 3.36: Acople de llama piloto [⁴⁴]	82
Figura 3.37: Válvula de bola de acero inoxidable	83
Figura 3.38: Corte interior de la válvula check. A-conexión de entrada, B-conexión de salida, C-hexágono para llave, D-longitud efectiva [⁴⁵]	84
Figura 3.39: Válvula check [⁴⁵]	84
Figura 3.40: Esquema de una válvula electromecánica normalmente cerrada [⁴⁶]	85
Figura 3.41: Válvula electromecánica	86
Figura 3.42: Corte interior de la válvula de seguridad. A-conexión, B-altura, C-hexágono para llave [⁴⁵]	87
Figura 3.43: Válvula de seguridad [⁴⁵]	87
Figura 3.44: Sistema eléctrico de control automático	88

Figura 3.45: Distancias medidas en un trayecto del sistema de utilización energética de biogás.....	96
---	----

Lista de tablas

Tabla 2.1: Composición del biogás	11
Tabla 2.2: Energías equivalentes de 1 m ³ de biogás.....	13
Tabla 2.3: Opciones más usadas para el almacenamiento de biogás.....	20
Tabla 3.1: Tiempo de residencia en el filtro de eliminación de H ₂ S.....	50
Tabla 3.2: Estimación de la remoción de H ₂ S	51
Tabla 3.3: Tiempo de residencia en el filtro de eliminación de H ₂ S.....	52
Tabla 3.4: Presión y temperatura del biogás después de la compresión.....	65
Tabla 3.5: Cálculo de h_o (intercambiador antes de la compresión)	67
Tabla 3.6: Cálculo de h_i (intercambiador antes de la compresión).....	68
Tabla 3.7: Cálculo de U (intercambiador antes de la compresión)	68
Tabla 3.8: Cálculo de ΔT_{ML} (intercambiador antes de la compresión).....	68
Tabla 3.9: Cálculo de Q (intercambiador antes de la compresión)	69
Tabla 3.10: Cálculo de A y h (intercambiador antes de la compresión)	69
Tabla 3.11: Cálculo de h_o (intercambiador después de la compresión).....	70
Tabla 3.12: Cálculo de h_i (intercambiador después de la compresión)	70
Tabla 3.13: Cálculo de U (intercambiador después de la compresión).....	71
Tabla 3.14: Cálculo de ΔT_{ML} (intercambiador después de la compresión).....	71
Tabla 3.15: Cálculo de Q (intercambiador después de la compresión).....	71
Tabla 3.16: Cálculo de A y h (intercambiador después de la compresión)	72
Tabla 3.17: Especificaciones técnicas del calefón.....	80
Tabla 3.18: Características de la válvula check [⁴⁵]	84
Tabla 3.19: Características de la válvula de seguridad [⁴⁵]	87
Tabla 3.20: Lógica del controlador de nivel de agua en el tubo de PVC	89
Tabla 3.21: Lógica del sistema de control automático	90
Tabla 3.22: Efectos de la acción del controlador automático del tanque presurizado.....	91

Tabla 3.23: Nomenclatura de equipos	93
Tabla 3.24: Nomenclatura de accesorios	94
Tabla 3.25: Nomenclatura de tipo de control	94
Tabla 3.26: Descripción de flujos del sistema de utilización energética de biogás.....	95
Tabla 3.27: Pérdidas de presión en la tubería del trayecto de la Figura 3.45	97
Tabla 3.28: Distancias equivalentes de accesorios	97
Tabla 3.29: Pérdidas de presión en los accesorios del trayecto de la Figura 3.45	98
Tabla 3.30: Pérdidas de presión total del trayecto de la Figura 3.45.....	98
Tabla 4.1: Lista de precios para la construcción e instalación del sistema de utilización energética de biogás.....	99
Tabla 5.1: Variación de volumen en la compresión del biogás.....	103
Tabla 5.2: Ciclo de llenado del gasómetro y compresión del biogás	104

Nomenclatura

g	Aceleración de la gravedad	$[\text{m/s}^2]$
A	Área superficial de la pared donde se transfiere el calor	$[\text{m}^2]$
ΔT_i	Cambio de temperatura en el fluido interior	$[\text{K}]$
C_{po}	Capacidad calórica del fluido exterior	$[\text{J/kg}\cdot\text{K}]$
C_{pi}	Capacidad calórica del fluido interior	$[\text{J/kg}\cdot\text{K}]$
h_o	Coefficiente de transferencia de calor del fluido exterior	$[\text{W/K}\cdot\text{m}^2]$
h_i	Coefficiente de transferencia de calor del fluido interior	$[\text{W/K}\cdot\text{m}^2]$
λ	Coefficiente de conductividad térmica de la tubería	$[\text{W/K}\cdot\text{m}]$
U	Coefficiente global de transferencia de calor del sistema	$[\text{W/K}\cdot\text{m}^2]$
C_{H_2S}	Concentración de H_2S en el biogás	$[\text{mg/L}]$
k_o	Conductividad térmica del fluido exterior	$[\text{W/K}\cdot\text{m}]$
k_i	Conductividad térmica del fluido interior	$[\text{W/K}\cdot\text{m}]$
n	Constante igual a 1.2	$[-]$
ρ	Densidad	$[\text{kg/m}^3]$
ρ_o	Densidad del fluido exterior	$[\text{kg/m}^3]$
ρ_i	Densidad del fluido interior	$[\text{kg/m}^3]$
D	Diámetro interior de la tubería para intercambio de calor	$[\text{m}]$
ΔT_{ML}	Diferencia de temperatura media logarítmica entre el fluido exterior y el interior a la entrada y a la salida del intercambiador	$[\text{K}]$
L_{eq}	Distancia equivalente de accesorios	$[\text{m}]$
s	Espesor de la tubería para intercambio de calor	$[\text{m}]$
f_f	Factor de fricción de Fanning	$[-]$

Q	Flujo calórico	[W]
\dot{m}_o	Flujo másico del fluido exterior	[kg/s]
\dot{m}_i	Flujo másico del fluido interior	[kg/s]
\dot{V}_o	Flujo volumétrico de agua	[L/min]
\dot{V}_i	Flujo volumétrico de biogás (en los intercambiadores de calor)	[L/min]
\dot{V}	Flujo volumétrico de biogás (en la purificación)	[L/min]
\dot{V}_{H_2S}	Flujo volumétrico de H ₂ S	[g/día]
L	Longitud del tramo	[m]
h	Longitud del tubo para intercambio de calor	[m]
$m_{Fe_2O_3}$	Masa de Fe ₂ O ₃ (masa de esponjas de hierro)	[g]
m_{H_2S}	Masa de H ₂ S que puede ser removido con las esponjas	[g]
Nu	Número de Nusselt	[-]
Pr	Número de Prandtl	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
Re_o	Número de Reynolds del fluido exterior	[-]
Re_i	Número de Reynolds del fluido interior	[-]
Δp	Pérdida de presión	[N/m ²]
P_1	Presión del biogás antes de ser comprimido	[bar]
P_2	Presión del biogás después de ser comprimido	[bar]
T_1	Temperatura del biogás antes de ser comprimido	[K]
T_2	Temperatura del biogás después de ser comprimido	[K]
T_{1C}	Temperatura del fluido exterior a la entrada del intercambiador	[K]

T_{2C}	Temperatura del fluido exterior a la salida del intercambiador	[K]
T_{1H}	Temperatura del fluido interior a la entrada del intercambiador	[K]
T_{2H}	Temperatura del fluido interior a la salida del intercambiador	[K]
t	Tiempo duración del filtro de H ₂ S	[día]
τ	Tiempo de residencia	[min]
v	Velocidad	[m/s]
v_o	Velocidad del fluido exterior	[m/s]
v_i	Velocidad del fluido interior	[m/s]
μ	Viscosidad	[Pa*s]
μ_o	Viscosidad del fluido exterior	[Pa*s]
μ_i	Viscosidad del fluido interior	[Pa*s]
V_1	Volumen del biogás antes de ser comprimido	[L]
V_2	Volumen del biogás después de ser comprimido	[L]
V	Volumen del filtro	[L]

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La demanda mundial de energía está creciendo rápidamente. En la actualidad, alrededor del 88 % de esta demanda se satisface mediante combustibles fósiles [1]. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en este siglo la demanda de energía incrementará por un factor de 2 a 3 [2]. Además, la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera también está aumentando constantemente, ocasionado en parte por las emisiones de CO₂ derivadas del uso de combustibles fósiles [1].

En este contexto, el desarrollo de fuentes de energía alternativas permite dejar atrás la dependencia del petróleo y sus derivados utilizados principalmente en termoeléctricas y combustibles para el transporte. La biomasa con alto contenido de humedad se puede utilizar como una fuente de energía alternativa y renovable, ya que puede ser sometida a procesos de digestión anaerobia por degradación microbológica para producir gas combustible conocido como biogás. Este gas, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, incluye el gas de rellenos sanitarios formado por la digestión de los desechos orgánicos presentes en los rellenos, gas producido a partir de la fermentación anaerobia de las aguas residuales, y otros como los gases provenientes de estiércol animal, de los residuos en mataderos, cervecerías u otras industrias agroalimentarias [3].

De esta forma, el biogás proveniente de los desechos, residuos o cultivos energéticos jugará un papel vital en el futuro, ya que esta fuente versátil de energía renovable puede ser usada para sustituir a los combustibles fósiles en la producción de energía y calor, y para el uso de combustible gaseoso en los vehículos. Además, el biogás al ser un gas rico en metano puede reemplazar al gas natural como una materia prima en la síntesis de productos químicos, productos orgánicos y combustibles líquidos [1]. Es por esto que la recuperación de biogás en procesos de digestión anaerobia para su uso directo o conversión en energía es una práctica común en países desarrollados [4].

Por otra parte, debido a que el biogás contiene gas metano, el cual es un gas de efecto invernadero, con su recuperación y utilización energética se puede reducir este efecto [4]. El metano producido en el tratamiento de desechos animales, puede contribuir directa e indirectamente al efecto invernadero. Se tiene un efecto directo cuando este gas se

encuentra en la atmósfera y retiene radiación. Por otro lado, se tiene un efecto indirecto cuando el gas de efecto invernadero influye en el tiempo de vida de otros gases en la atmósfera, y/o cuando el gas afecta a procesos atmosféricos que alteran el balance radiativo terrestre (periodo prolongado de tiempo en el que la temperatura de la Tierra permanece esencialmente constante) [5].

En fin, el aumento del uso de biogás (recuperación de metano) como fuente de energía también conlleva a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se reducen las emisiones directas ya que el efecto invernadero del metano es 24 veces más dañino que el CO₂ que se obtiene con su combustión. Y se reducen las emisiones indirectas gracias a la reducción en el uso de los combustibles fósiles [6].

1.2 Justificación del proyecto

Este proyecto es importante porque beneficia directamente a las comunidades rurales y municipios del Ecuador. Esto se debe a que en estas zonas se produce una gran cantidad de desechos orgánicos, los cuales generan malos olores, contaminación de aguas, aparición de roedores y aves de rapiña, etc. Es por esto que mediante el desarrollo de la digestión anaerobia de estos desechos orgánicos, se podría eliminar estos problemas al tratar los desechos y además, se podría utilizar el biogás producido principalmente para generar electricidad y calor para las comunidades rurales. En otras palabras, la producción y utilización de biogás a partir de desechos orgánicos permitiría una mejor calidad de vida para los habitantes de las comunidades rurales del Ecuador [7].

Además, el sistema de producción de energía a través del biogás es de bajo costo debido a que para producir este gas se usa como materia prima los desechos y subproductos de industrias locales agrícolas y de alimentos. También se puede usar como materia prima para la producción de biogás, materia orgánica de origen vegetal y animal, la cual se encuentra en nuestro entorno directo [8].

Por otro lado, es importante considerar el aprovechamiento del biogás debido a que este gas es una fuente versátil de energía renovable. El biogás además de ser usado para la generación de energía eléctrica y energía térmica, puede ser usado como combustible para vehículos y como materia prima en la síntesis de productos químicos [1]. El biogás debe ser

tratado y purificado antes de ser usado como combustible para vehículos, es decir, se debe eliminar impurezas y CO_2 para llegar a obtener un contenido alto de metano (aproximadamente 97 %), y se lo debe comprimir hasta 200 bar [⁹]. Y, el uso más sofisticado del biogás es su conversión a gas de síntesis. Este gas de síntesis representa una materia prima para la síntesis de hidrocarburos, metanol, amoníaco, metano y otros. Por su contenido de H_2 , es una materia prima fundamental para los procesos de refinación, tales como hidrotatamiento e hidrocracking [¹⁰].

En el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas de la Universidad San Francisco de Quito (LaDEA – USFQ) se ha trabajado desde el año 2008 en el desarrollo de la tecnología de digestión anaerobia a diferentes escalas (en laboratorio y escala de planta piloto). Se ha logrado optimizar el proceso de digestión anaerobia y la obtención de fertilizante orgánico. Sin embargo, hasta el momento no se ha podido utilizar energéticamente el biogás. Por esta razón, en este estudio se investiga la forma de utilizar el biogás como combustible para el funcionamiento de un generador eléctrico y de un calefón.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar, instalar y poner en marcha el sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA de la USFQ.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estandarizar un método para cuantificar y caracterizar el biogás
- Diseñar e instalar un sistema de acumulación del biogás obtenido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA
- Adaptar el sistema de producción de biogás para implementar el uso de un generador eléctrico y un calefón

2 Fundamentos teóricos

2.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que se descompone materia orgánica o biomasa residual. Esta descomposición la llevan a cabo microorganismos que son capaces de vivir bajo condiciones de ausencia de oxígeno. Los productos finales de este proceso son el biogás y el biol, el material residual del digestor [5, 11]. Este proceso bioquímico es complejo y puede ser dividido en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada etapa de degradación es llevada a cabo por diferentes colonias de microorganismos [1].

La digestión anaerobia es un proceso común en muchos ambientes naturales, por ejemplo, en sedimentos marinos, en el estómago de rumiantes o en pantanos. Este proceso es ampliamente usado en la actualidad para producir biogás en reactores herméticos, comúnmente llamados digestores. En este tipo de reactores, generalmente el sustrato utilizado es una mezcla homogénea de 2 o más tipos de materia prima (por ejemplo, estiércol animal y desechos orgánicos de industrias alimentarias), y por ello el proceso de degradación también es llamado co-digestión [12].

A diferencia de la degradación aerobia, en la digestión anaerobia se genera muy poco calor [12]. Esto se debe a que alrededor del 90 % de la energía proveniente del sustrato, queda contenida principalmente en el biogás producido, en forma de metano, y solo un 10 % de la energía se consume en crecimiento bacteriano, frente al 50 % de energía consumida en la digestión aerobia [13].

2.1.1 Etapas microbiológicas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es el resultado de varias etapas vinculadas entre sí, en las cuales la materia prima es continuamente descompuesta en unidades más pequeñas. Grupos específicos de microorganismos se encuentran envueltos en cada etapa individual. Estos microorganismos descomponen sucesivamente los productos de etapas previas. Las cuatro etapas principales de la digestión anaerobia son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [12].

Las cuatro etapas antes mencionadas, ocurren paralelamente en el digestor de operación continua. La velocidad del proceso de descomposición está determinada por la reacción más lenta. Durante la hidrólisis, cantidades relativamente pequeñas de biogás son producidas. La producción de biogás alcanza su pico durante la metanogénesis [12]. A continuación se presenta cada una de estas etapas y su interacción.

- *Hidrólisis*

Teóricamente, la hidrólisis es la primera etapa de la digestión anaerobia. Durante esta etapa, la materia orgánica (polímeros) es descompuesta en unidades más pequeñas (monómeros u oligómeros). Es decir, carbohidratos, lípidos y proteínas son convertidos en glucosa, glicerol, purinas y piridinas, mediante enzimas hidrolíticas (por ejemplo: celulasa, celobiosa, xilanas, amilasa, lipasa y proteasa) que son excretadas por microorganismos hidrolíticos [1, 12]. Las reacciones de descomposición que se dan en la hidrólisis se presentan en la Figura 2.1 [12].

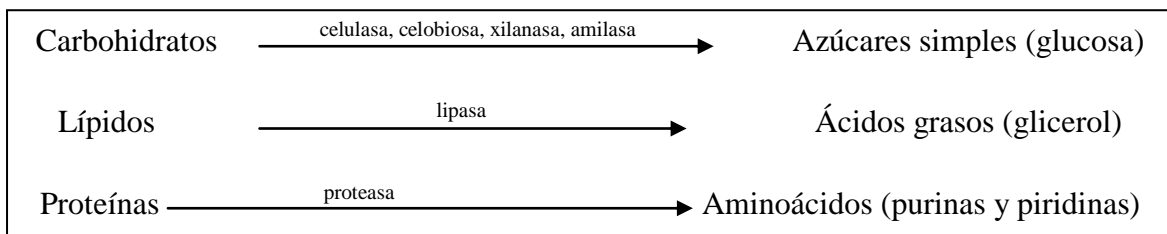


Figura 2.1: Reacciones enzimáticas de descomposición durante la hidrólisis

- *Acidogénesis*

Durante la acidogénesis, bacterias acidogénicas convierten los productos de la hidrólisis en sustratos metanogénicos. En este caso, azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos son descompuestos mayormente (70 %) en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, y en menor medida (30 %) en ácidos grasos volátiles (por ejemplo: propionato y butirato) y alcoholes [1, 12]. A continuación en la Figura 2.2 se muestran las reacciones involucradas en la acidogénesis [12].

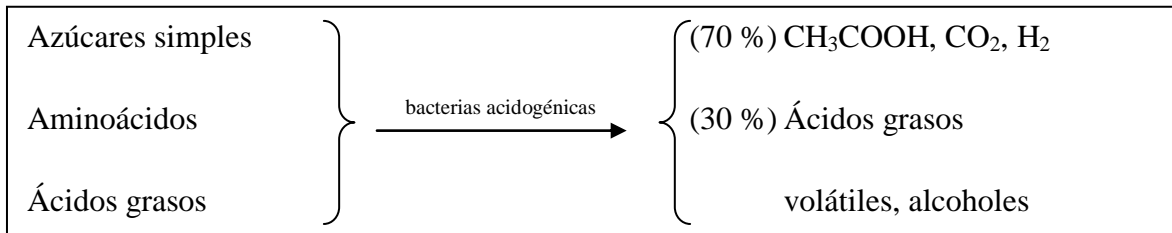


Figura 2.2: Reacciones de la acidogénesis

- *Acetogénesis*

En esta etapa, los productos de la acidogénesis son convertidos en sustratos metanogénicos. Los ácidos grasos volátiles y los alcoholes son oxidados en sustratos como ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. El hidrógeno es un producto no deseado de la acetogénesis, ya que inhibe el metabolismo de las bacterias acetogénicas. Pero, durante la metanogénesis, el hidrógeno es convertido en metano. Es por esto que la acetogénesis y la metanogénesis constituyen una simbiosis de dos grupos de organismos, ya que ocurren paralelamente [12]. En la Figura 2.3 se muestran las reacciones de oxidación que se producen durante la acetogénesis [12].

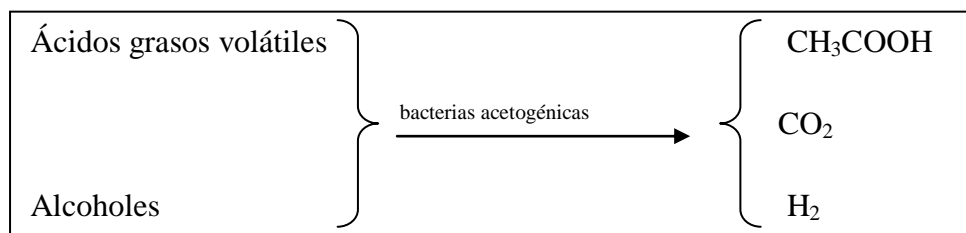
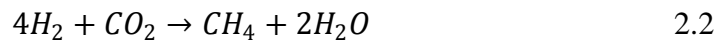
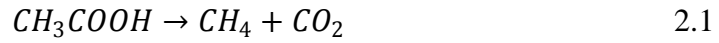


Figura 2.3: Reacciones de oxidación de la acetogénesis

- *Metanogénesis*

Esta etapa es la más crítica del proceso de digestión anaerobia, ya que es la reacción más lenta del proceso. Las bacterias metanogénicas producen metano y dióxido de carbono (biogás) mayormente a partir de ácido acético (70 %) y en menor cantidad a partir de hidrógeno y dióxido de carbono (30 %) [12], de acuerdo a las siguientes reacciones:



La combinación de las diferentes etapas de la digestión anaerobia se presenta en la Figura 2.4. Se puede observar los pasos de descomposición sucesiva de productos de etapas previas [12].

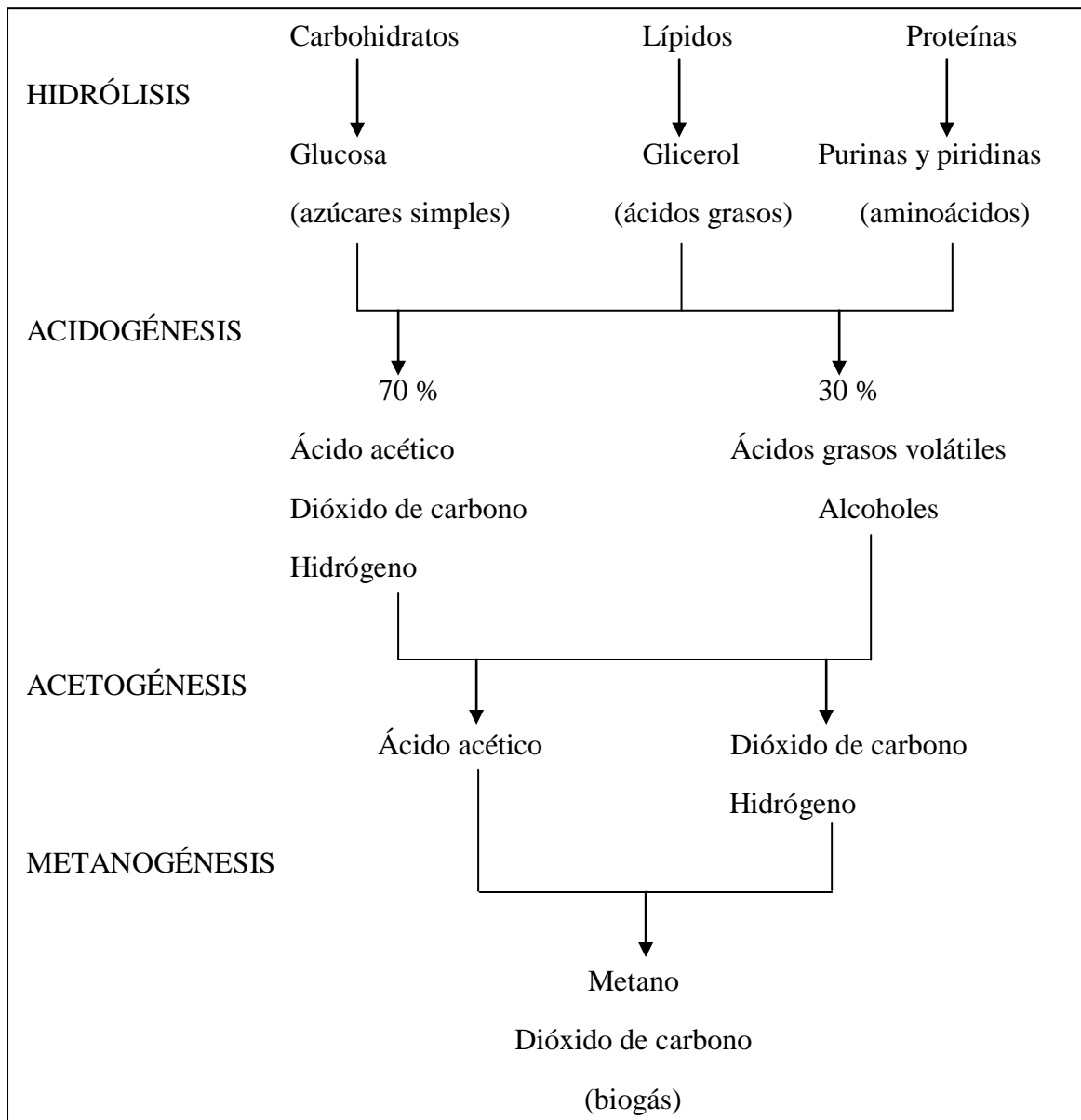


Figura 2.4: Etapas principales de la digestión anaerobia

2.1.2 *Parámetros de operación en la de producción de biogás*

La eficiencia de la digestión anaerobia puede evaluarse mediante: la composición del biogás producido, la efectividad de la degradación de la biomasa tratada o la concentración de material orgánico al final del sistema de digestión [6]. Estos resultados varían de acuerdo a los siguientes parámetros:

- *Composición y propiedades de la alimentación*

En el proceso de digestión se puede tratar estiércol de cerdos, vacas o de pollos con la adición de cosustratos (como desechos vegetales y alimenticios) para aumentar el contenido de material orgánico y así obtener una mayor producción de biogás [1].

La velocidad de producción de biogás depende parcialmente del contenido de sólidos totales de la alimentación, es decir de la concentración de microorganismos en la biomasa. En otras palabras, la cantidad de metano que se produzca depende de los sólidos presentes en los desechos y su grado de degradabilidad [14]. Compuestos no disueltos como la celulosa, proteínas o grasas son lentamente degradadas en monómeros durante varios días aunque proveen la mayor producción de biogás. Por otra parte, la hidrólisis de carbohidratos solubles se lleva a cabo durante pocas horas, pero conlleva a una menor producción de biogás [1].

Para aumentar el grado de degradación de los sustratos, se puede realizar un pretratamiento mecánico (trituration), térmico (hidrólisis térmica), químico o enzimático (adición de enzimas hidrolíticas) a la alimentación. El proceso de descomposición de la materia orgánica se acelera al disminuir el tamaño de partícula, pero no necesariamente aumenta la producción de biogás [1].

- *Temperatura*

Es importante mantener una temperatura constante durante el proceso de digestión, ya que los cambios de temperatura tienen un efecto negativo en la producción de biogás. La digestión anaerobia puede darse a condiciones de temperatura mesofílica (35 – 42 °C) o termofílica (45 – 60 °C). Los procesos termofílicos son más sensibles a los cambios de temperatura y requieren más tiempo para adaptarse a una nueva temperatura. Pero, la

velocidad de crecimiento de las bacterias metanogénicas es mayor a temperaturas de procesos termofílicos, haciendo que el proceso sea más rápido y más eficiente (menor tiempo de retención hidráulico). Por otra parte, las bacterias mesofílicas toleran cambios de temperatura de ± 3 °C sin que exista una reducción significativa en la producción de metano [1].

- *pH*

La formación del metano se lleva a cabo dentro de un intervalo de pH relativamente reducido, desde alrededor de 6.5 a 8.5 y con un intervalo óptimo entre 7.0 y 8.0. Un pH menor a 6.0 o mayor a 8.5 inhibe gravemente a las bacterias metanogénicas. El valor del pH aumenta por la acumulación de amoníaco, lo cual ocurre al aumentar la temperatura durante la degradación de proteínas. Por otra parte, el valor del pH disminuye por la acumulación de ácidos grasos volátiles. Sin embargo, la acumulación de estos ácidos no siempre resultará en una disminución del pH debido a la capacidad buffer del sustrato al tener un exceso de alcalinidad, el cual estabiliza el pH [1].

- *Intensidad de agitación*

Otro parámetro que afecta la producción de biogás es la agitación y su frecuencia. Esto se debe a que la agitación asegura una mezcla homogénea de la biomasa, es decir, mediante la agitación es posible que exista mezcla en la superficie y en el fondo del digestor [15].

- *Nutrientes*

Varios macronutrientes (como carbono, fósforo y azufre), así como micronutrientes (hierro, níquel, cobalto, selenio, molibdeno y tungsteno) son necesarios para el crecimiento y sobrevivencia de grupos específicos de microorganismos. El requerimiento de macronutrientes es bastante bajo debido a que no se produce mucha biomasa. Así mismo, la concentración necesaria de micronutrientes es baja y se encuentra en el rango de 0.05 y 0.06 mg/L. Solo el hierro es necesario en mayor concentración: entre 1 y 10 mg/L. La falta

de micronutrientes puede ser reducida con la adición de estiércol, la cual conlleva además a un aumento de la velocidad de conversión anaerobia [1].

En fin, para obtener un rendimiento óptimo en la producción de biogás, se debe evitar sobrecargas de alimentación, cambios de temperatura, entrada de oxígeno y grandes cantidades de inhibidores como amoníaco, azufre, metales, etc. [12].

2.1.3 Biol

El residuo líquido del digestor, llamado biol, puede ser usado como un excelente fertilizante orgánico para la producción de alimentos en tierras de cultivo. Esto se debe a que el biol es rico en nutrientes para plantas y a que mejora las propiedades físicas y químicas del suelo. De esta forma, el biol reduce la necesidad del fertilizantes artificiales [16].

2.2 Biogás

2.2.1 Características del biogás

El biogás es un gas combustible limpio amigable para el medio ambiente que principalmente contiene alrededor de 55-65 % de metano (CH_4), 30-45% dióxido de carbono (CO_2), trazas de ácido sulfhídrico (H_2S), vapor de agua. Este gas puede ser producido mediante la digestión anaerobia de desechos agrícolas, estiércol vacuno [14], desechos de comida, residuos de mataderos, [16], desechos industriales y municipales, etc. [5]. En la Tabla 2.1 se muestra la composición promedio del biogás [12].

Tabla 2.1: Composición del biogás

Compuesto	Contenido (% v/v)
Metano (CH ₄)	55 – 65
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 – 45
Vapor de agua (H ₂ O)	2 (20 °C) – 7 (40 °C)
Oxígeno (O ₂)	< 2
Nitrógeno (N ₂)	< 2
Amoniaco (NH ₃)	< 1
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	< 1
Hidrógeno (H ₂)	< 1

El biogás es una fuente de energía renovable [16]. Su contenido energético está ligado a su contenido de metano. Considerando el contenido estándar de metano del 50 %, la densidad del biogás es de 1.22 kg/Nm³ y su valor calórico es 21 MJ/Nm³ (5.8 kWh/Nm³) [12].

2.2.2 Principales usos y aplicaciones del biogás

A continuación se describen cuatro formas de uso del biogás como son: el uso doméstico, generación de electricidad, la producción de calor y vapor, y síntesis de productos químicos [17].

2.2.2.1 Uso doméstico

Las plantas de biogás domésticas usan la descomposición de residuos orgánicos, tal como el estiércol vacuno y biomasa, para producir un gas inflamable que puede ser usado para cocinar e iluminar hogares [2]. Además, se lo puede conectar directamente a calefones o calefactores a gas para producir agua caliente y calentar viviendas. Esta aplicación tiene especial validez en zonas frías. Por otra parte, el biogás puede ser aprovechado para el riego mecanizado a través de redes de producción y distribución en un pueblo. Este tipo de arreglos pueden mejorar la autosuficiencia de los residentes rurales durante períodos de escasez de combustibles [18].

En las viviendas uno de los usos más importantes del biogás es en la cocina o en la preparación de alimentos. Es así como se puede ahorrar en el consumo de leña o carbón directamente [19]. En la Figura 2.5 se presenta una foto de un digester de uso doméstico.



Figura 2.5: Uso doméstico del biogás [20]

2.2.2.2 Obtención de energía eléctrica

El proceso de obtención de energía eléctrica a partir del biogás empieza con la purificación de dicho gas para luego inyectarlo en una red de gas adaptada apropiadamente. Sin embargo, por lo general se quema el biogás in situ en un motor de gas en el cual la energía química del biogás es convertida en electricidad. La eficiencia de la generación de electricidad en este tipo de dispositivos puede llegar hasta un 40 % [21].

A menudo, este tipo de motores son descritos como unidades de calor y electricidad (CHP, combined heat and power station) [1], ya que el motor debe ser enfriado durante su operación. Es por esto que se utiliza un flujo de agua de refrigeración del motor (y parcialmente de los gases de escape) a una temperatura de 90 °C. Parte de la energía proveniente del sistema de enfriamiento del motor es usada para propósitos in situ como en el calentamiento de las instalaciones. En fin, la energía total producida por el biogás puede ser dividida en: producción de electricidad (cerca del 40 %), energía térmica (40 %) y el resto son pérdidas de calor [21].

Todos los motores pueden ser adaptados para funcionar con biogás, pero los más comúnmente usados son los motores de gas-Otto y los de gas-Diesel [19]. Es así como 1 m³ de biogás puede compararse con 0.52 L de diesel, 0.80 L de gasolina ó 1.40 kg de carbón [22]. En la Tabla 2.2 se muestran las energías equivalentes de los combustibles más comunes con 1 m³ de biogás [13, 22].

Tabla 2.2: Energías equivalentes de 1 m³ de biogás

Biogás	Energías equivalentes
1 m ³	0.52 L de diesel
	0.80 L de gasolina
	1.40 kg de carbón
	3.47 kg de leña
	0.62 L kerosene
	0.65 m ³ de gas natural

Además, al combustionar 1 m³ de biogás se obtiene suficiente energía para [19]:

- generar 1.25 kWh de electricidad
- generar 6 horas de luz equivalente a un foco de 60 W
- poner a funcionar un refrigerador de 1 m³ de capacidad durante 1 hora
- hacer funcionar una incubadora de 1 m³ de capacidad por 30 minutos
- hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas

A continuación, en la Figura 2.6 se muestran algunas cantidades de energía equivalente producida al combustionar 1 m³ de biogás [19].

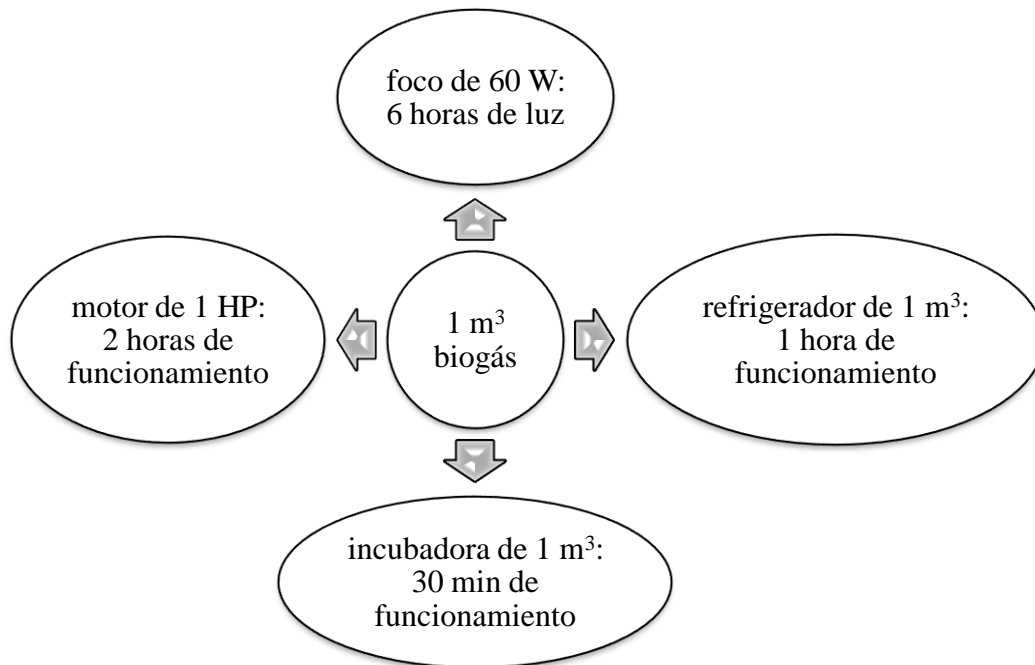


Figura 2.6: Energía obtenida al combustionar 1 m³ de biogás

2.2.2.3 Obtención de energía térmica

La utilización del biogás para la obtención de energía térmica es muy cotizada debido a su alta eficiencia de 60 % [21] y a su amplia gama de aplicaciones como se presentan a continuación.

El biogás puede ser utilizado en unidades de producción para el calentamiento de las crías recién nacidas de cerdos y aves. De esta forma es posible ahorrar energía eléctrica y/o combustibles fósiles que se utilizan para el funcionamiento de generadores eléctricos, calefactores o calefones. El valor calorífico del biogás está entre 5 a 6 kWh/m³. Esto quiere decir que 1 m³ de biogás equivale aproximadamente a 0.5 L de diesel [19].

Como se menciona en la sección 2.2.2.2, en los motores combinados de calor y electricidad (CHP) alrededor del 40 % de la energía producida es en forma de energía térmica, otro 40 % en forma de energía eléctrica y un 20 % son pérdidas de calor. Esta tasa de energía térmica es excesiva para el propio consumo de una planta de biogás. Es por esto que el calor se lo transfiere a clientes como son poblados cercanos u otras industrias. Esta solución fue usada en una planta de biogás en Anklam, Alemania, para el suministro a la

red de calefacción urbana. En la Figura 2.7 se muestran usos de la energía térmica obtenida a partir del biogás [21].

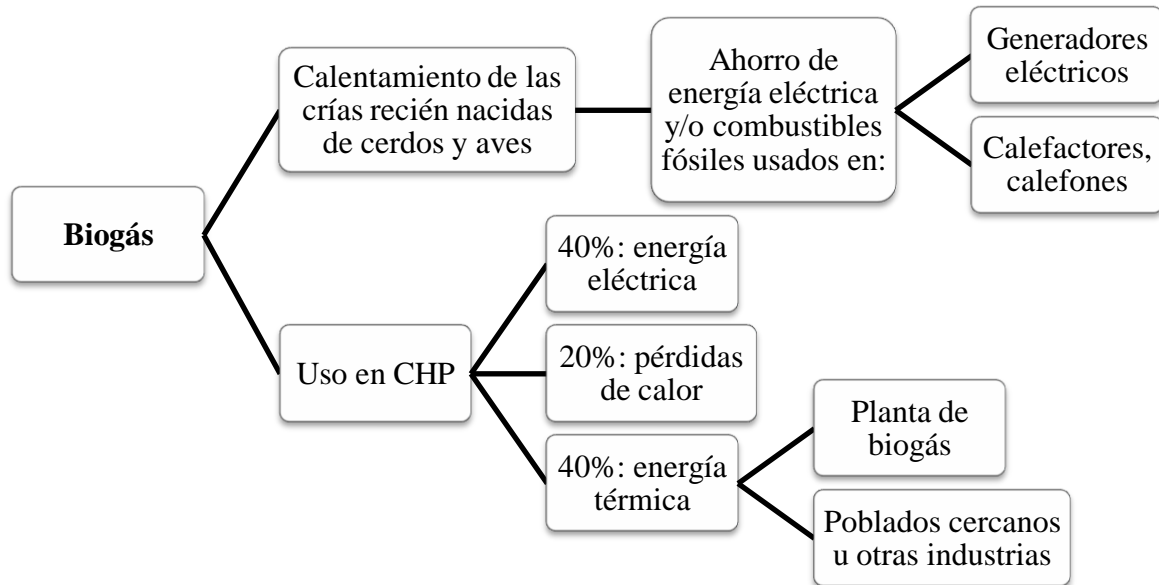


Figura 2.7: Obtención de energía térmica a partir del biogás

En plantas industriales de producción de biogás a partir de la digestión de estiércol de ganado y biomasa se puede tener una contribución significativa al suministro de gas local cuando este gas es modificado bajo especificaciones prescritas para su inyección en una red de gas. Es por esto que este gas puede ser utilizado para satisfacer las necesidades de la presente generación como un sustituto del gas natural sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades [23].

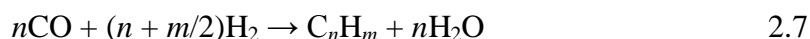
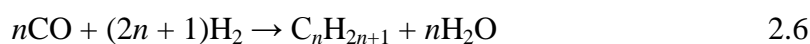
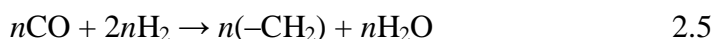
La modificación y purificación del biogás para ser inyectado en una red de gas natural se ha hecho cada vez más importante debido a que dicho gas puede ser usado como energía de una forma más eficiente. Todos los contaminantes presentes en el biogás principalmente CO_2 y H_2S , deben ser removidos para obtener un gas mejorado con un contenido de más del 95 % de metano y cumplir con los requisitos de calidad de los diferentes aparatos que operan con gas. Adicionalmente, es necesario asegurar que este gas no contenga bacterias ni hongos que puedan crear riesgos inaceptables para la salud humana y los equipos [1].

2.2.2.4 Materia prima para la síntesis química

El uso más sofisticado del biogás es su conversión a gas de síntesis, el cual es una materia prima o una fuente de energía alternativa de alta calidad y de bajas emisiones. Este proceso de conversión se realiza utilizando tecnologías de reformación como: oxidación parcial, reformación con CO₂, reformación con vapor y reformación con plasma no térmico (NTP, non-thermal-plasma) [24]. Las reacciones correspondientes a los procesos más comunes de reformación química de biogás son:



El gas de síntesis representa una materia prima para la síntesis de hidrocarburos o por su contenido de H₂ para los procesos de refinación, tales como hidrotratamiento e hidrocracking. También se puede utilizar como materia prima para procesos petroquímicos como la síntesis de metanol, síntesis de amoníaco y síntesis de hidrocarburos. En otras palabras, el gas de síntesis es una materia prima para la síntesis a gran escala de importantes productos orgánicos base. Las reacciones fundamentales de la química del gas de síntesis son: la síntesis de metanol, síntesis Fischer-Tropsch (FTS), síntesis-oxo (hidroformilación) y síntesis de CH₄. Las reacciones básicas FTS son [10]:



donde

n es la longitud promedio de la cadena del hidrocarburo

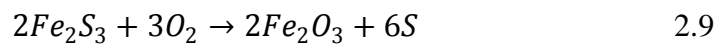
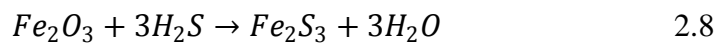
m es el número de átomos de H por átomo de C [10]

Todas las reacciones son exotérmicas y el producto de cada una de ellas es una mezcla de diferentes hidrocarburos en los que parafinas y olefinas son los componentes principales [10].

2.2.3 Purificación del biogás

Antes de usar el biogás en un proceso de conversión, éste debe ser tratado para remover cualquier condensado, partículas y otras impurezas. El tipo de tratamiento depende de la aplicación final. Generalmente la humedad debe ser removida, y si es necesario, también se debe usar una serie de filtros para remover impurezas. Si el biogás contiene ácido sulfhídrico (H_2S), la temperatura de combustión debe ser cuidadosamente controlada para evitar problemas de corrosión [4].

Antes de quemar el biogás, el H_2S debe ser eliminado. Este ácido puede ser eliminado mediante adsorción química al hacer pasar el biogás a través de un filtro de limallas de hierro (óxido de hierro III) [4]. De esta forma se da un proceso de oxidación a través de las siguientes reacciones químicas [25]:



Otra forma de eliminar el H_2S es mediante la adsorción física con carbón activado. En este caso, las moléculas disueltas del ácido se adhieren a la superficie del carbón. Este tipo de filtración tiene limitaciones debido a que sólo permite eliminar cantidades muy pequeñas de H_2S , generalmente concentraciones bajo 0.3 mg/L, ya que el carbón activado tiene una capacidad limitada para adsorber el ácido [25]. Sin embargo, al usar un filtro de carbón activado, también es posible reducir la humedad y los olores que puedan existir en el biogás. Esto se debe a que el vapor de agua contenido en el gas, también se adhiere a la superficie del carbón y luego se condensa [26].

Por otra parte, al purificar el biogás, el dióxido de carbono (CO_2) también debe ser removido. El CO_2 puede ser separado del CH_4 mediante absorción física, absorción química y mediante una membrana de separación [4]. El método más sencillo y eficiente para remover el CO_2 del biogás es mediante la absorción química en una solución de cal (CaO). Sin embargo, este método requiere de mucha atención debido a que la solución de cal se agota y a que necesita cambiarse periódicamente. A continuación se muestra la reacción química que se da en esta remoción [25]:



Una alternativa de bajo costo es la absorción física en agua, ya que el CO_2 es muy soluble a presión atmosférica y temperatura de 20 °C, mientras que el CH_4 no lo es. A presiones altas, la solubilidad del CO_2 aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de CH_4 también aumente. Además, este método es muy sencillo para la eliminación de impurezas [25].

2.3 Descripción de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

La planta piloto procesa una mezcla de materia prima compuesta por desechos orgánicos vegetales (cáscaras y restos de frutas) y desechos orgánicos animales (estiércol vacuno). La mezcla es preparada de la siguiente forma:

- Materia orgánica vegetal: se reduce el tamaño del desecho utilizando una trituradora
- Materia orgánica animal: es pesada, diluida en agua y posteriormente filtrada mediante el uso de un tamiz con malla de 4 mm para separar todos los sólidos contenidos en el estiércol
- De acuerdo a la cantidad de mezcla que se requiera alimentar al digestor, se pesa el desecho vegetal triturado y el desecho animal filtrado
- Se mezclan los desechos preparados en el tanque de alimentación hasta que se observe que la mezcla esté homogénea
- En caso de ser necesario, se agregan aditivos para regular el pH [26]

Luego, se descarga del digestor una cantidad de biol igual a la cantidad que se alimenta de la mezcla inicial y se lo almacena. Se hace ingresar la mezcla al digestor a través de una bomba centrífuga marca WEG, modelo Caracol Super 1 1/2" NPT. Después de ingresada toda la mezcla de desechos al digestor, se mantiene una agitación constante mediante recirculación, para permitir el contacto entre el sustrato fresco y los microorganismos presentes en el interior del digestor. Una vez que la mezcla se encuentra homogénea en el tanque de alimentación, se toma una pequeña muestra de ésta para realizar análisis de: sólidos totales, sólidos orgánicos, demanda química de oxígeno y contenido de nitrógeno [26].

Después de haber llevado a cabo la alimentación de la mezcla de materia prima, se realiza el control de temperatura, nivel del líquido y presión en el digestor mediante un sistema de control automático y un manómetro. Finalmente, después de la digestión, el biogás producido es purificado y luego cuantificado por medio de un contador de gas. En el proceso de purificación se utiliza un filtro de limaduras de hierro y un filtro de carbón activado para el proceso de eliminación de H_2S , y se usa una trampa de agua para eliminar el vapor de agua condensado. Además, se realiza un análisis del gas para conocer la calidad del mismo, es decir, para conocer el porcentaje de metano y de dióxido de carbono que contiene y las trazas de H_2S contenidos. En la Figura 2.8 se presenta un diagrama de bloques del proceso de digestión anaerobia de la planta piloto del LaDEA [26].

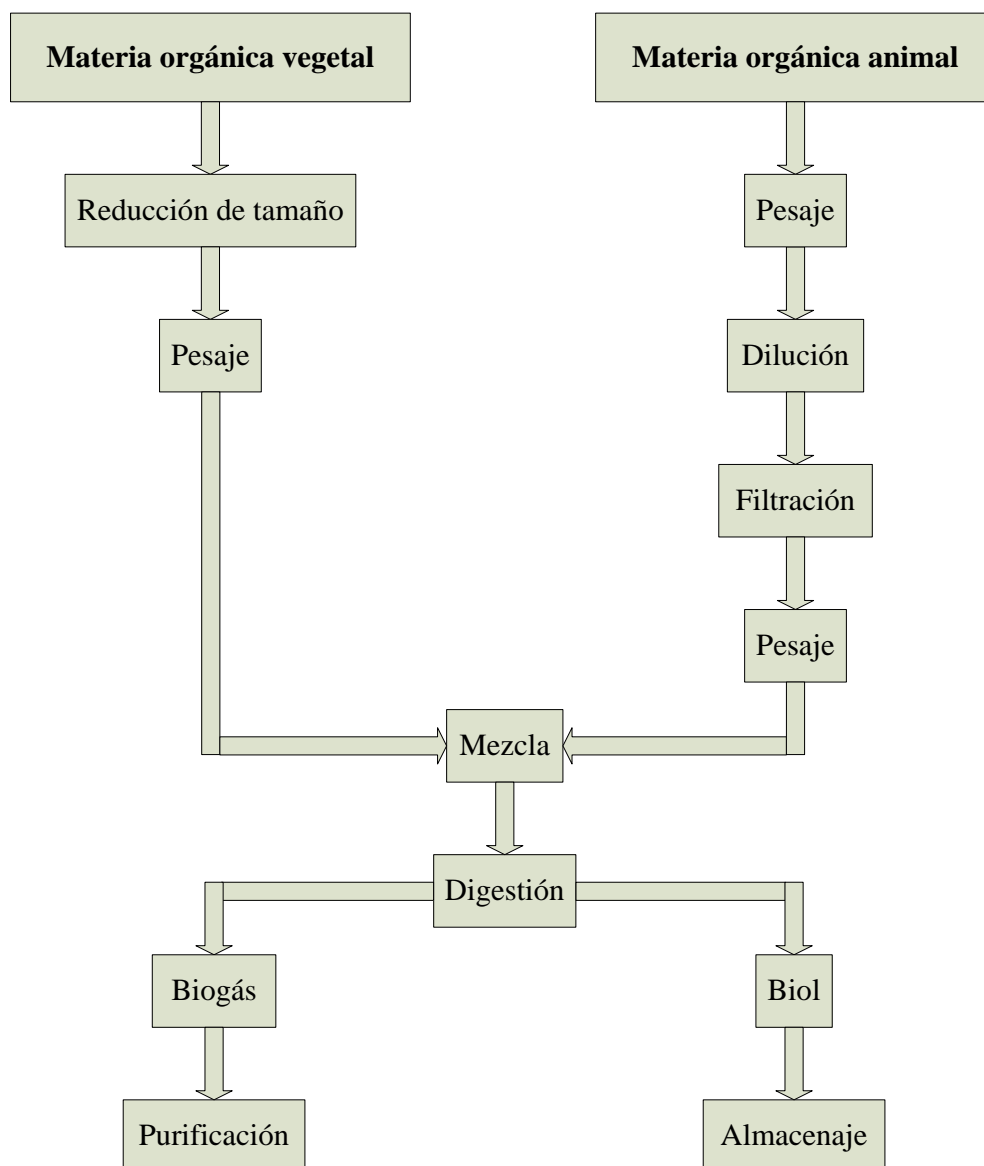


Figura 2.8: Diagrama de bloques de la digestión anaerobia de la planta piloto del LaDEA

2.4 Utilización energética de biogás

2.4.1 Almacenamiento de biogás

La producción de biogás debe ser mantenida tan estable y constante como sea posible. Sin embargo, dentro del digestor el biogás es formado en cantidades fluctuantes. Además, cuando el biogás es utilizado, la demanda de este gas puede variar durante el día. Para compensar todas estas variaciones se debe almacenar temporalmente el biogás producido en instalaciones apropiadas [12].

Es necesario comprobar la hermeticidad de las instalaciones de almacenamiento de biogás antes de poner en marcha la planta de biogás. Además, como medida de seguridad, estas instalaciones tienen que estar equipadas con válvulas de seguridad para evitar sobrepresiones, subpresiones, o riesgos de daño. Y por último, las instalaciones de almacenamiento de biogás deben contar con protección contra explosiones y con una llama piloto de emergencia [12].

La capacidad mínima de biogás que las instalaciones de almacenamiento deben tener corresponde a 1/4 de la producción diaria del gas. Generalmente, se recomienda una capacidad de uno o dos días de producción de biogás [12]. La correcta selección y dimensionamiento de las instalaciones de almacenamiento de biogás implica una contribución considerable a la eficiencia, duración y seguridad de la planta de biogás. Además, se asegura un suministro constante de biogás y una minimización de pérdidas del gas [12].

Antes de almacenar el biogás, éste debe ser previamente purificado extrayendo el vapor de agua, CO₂ y H₂S que contiene [27]. A continuación en la Tabla 2.3 se presentan las opciones más comúnmente usadas para el almacenamiento de biogás [28].

Tabla 2.3: Opciones más usadas para el almacenamiento de biogás

Presión	Dispositivo de almacenamiento	Material
Baja (0.138 – 0.414 bar)	Gasómetro con sello de agua	Acero
	Bolsa de gas	Caucho, plástico, vinil
Media (1.05 – 1.97 bar)	Tanque de propano o butano	Acero
Alta (200 bar)	Cilindros de gas comercial	Aleación

Los tipos de instalaciones de almacenamiento de biogás se diferencian de acuerdo a la presión de operación como se muestra continuación [12]:

- *Almacenamiento a presión baja*

Este tipo de instalaciones normalmente tienen un rango de sobrepresión de 0.05 a 0.5 mbar y están hechas de membranas especiales, las cuales deben cumplir con ciertos requisitos de seguridad como: hermeticidad, a prueba de rayos UV y resistencia a la presión, temperatura y cambios de la intemperie. Las membranas son instaladas como depósitos externos de gas o como cúpulas/cubiertas en la parte superior del digestor [12].

Los depósitos externos pueden ser diseñados con forma de balones de gas, y pueden ser ubicados dentro de edificaciones para que posean protección contra la intemperie o pueden ser equipados con una segunda membrana. A continuación en la Figura 2.9 se presenta una foto de un depósito de gas externo de baja presión.



Figura 2.9: Depósito de gas externo de baja presión [12]

Por otra parte, las cúpulas son membranas herméticas que se encuentran en la parte superior del digestor y que también cumplen la función de tapa del digestor. En la Figura 2.10 se presenta una foto de una cúpula de un digestor vista desde el interior.



Figura 2.10: Cúpula de un digestor vista desde el interior [12]

- *Almacenamiento a presión media y alta*

Este tipo de instalaciones soportan presiones de entre 5 y 250 bar, pero tienen un alto consumo de energía y altos costos de operación. Para depósitos de gas de hasta 10 bar, se deben considerar requerimientos de energía de hasta 0.22 kWh/m^3 , y para depósitos de presión alta entre 200 a 300 bar, el requerimiento de energía es de alrededor de 0.31 kWh/m^3 . Debido al alto costo, estos tipos de instalaciones de almacenamiento de biogás son raramente usados en plantas de biogás agrícolas [12].

2.4.2 Compresión de biogás

El almacenamiento de biogás es posible por periodos cortos sin la compresión del gas, pero para periodos de más de un par de horas, generalmente no es factible debido al gran volumen requerido [12]. Con el propósito de reducir el volumen del gas se lo debe comprimir y almacenar a presiones bajas (0.138 – 0.414 bar), medias (1.05 – 1.97 bar) o altas (200 bar) [28].

Al comprimir el biogás se reducen los requerimientos de almacenamiento, se concentra el contenido de energía y se aumenta la presión hasta el nivel necesario para superar la resistencia al flujo de gas. Pero, debido a que el biogás está principalmente compuesto por CH_4 no puede ser fácilmente almacenado, ya que el metano no licúa bajo

condiciones de presión y temperatura ambiente. La temperatura crítica y presión crítica necesarias para licuar el biogás son -85 °C y 47 bar , respectivamente [14].

Para seleccionar el sistema de compresión de biogás se empieza por escoger el mecanismo de compresión. Para esto se puede considerar técnicas clásicas de compresión de aire. Los compresores más usados son los de desplazamiento positivo. A continuación se presentan los compresores más comunes de desplazamiento positivo [29].

- *Compresor de tornillo*

El compresor de tornillo es un equipo de desplazamiento positivo en el cual un rotor macho empuja aire a lo largo de un rotor hembra en volúmenes cada vez más pequeños. Este tipo de compresor puede ser utilizado para un rango desde presiones muy bajas hasta presión muy altas, y además su uso es estacionario o portátil. Sin embargo, para que un compresor de tornillo produzca un rendimiento alto, necesariamente debe tener un sistema de enfriamiento [29]. A continuación en la Figura 2.11 se presenta el esquema de funcionamiento de un compresor de tornillo.

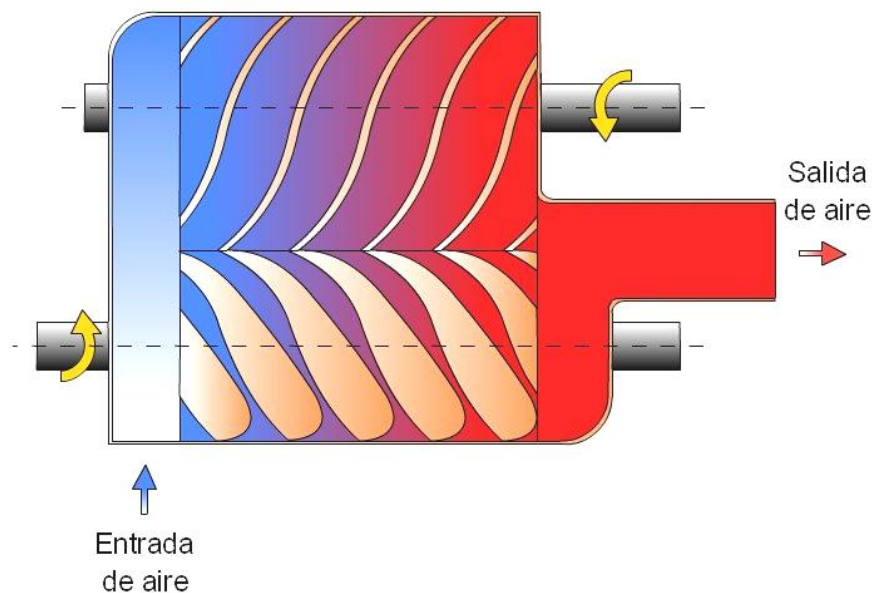


Figura 2.11: Esquema del funcionamiento de un compresor de tornillo [30]

En la Figura 2.11 se observa el progreso de la compresión a medida que cambia el color. Es decir, el color azul indica el aire sin comprimir, y el color rojo, el aire comprimido.

- *Compresor recíprocante o de pistón*

En el compresor recíprocante el gas a ser comprimido es conducido hacia la cámara de compresión y es ahí donde se reduce físicamente el volumen del gas. Este tipo de compresor puede ser usado de forma estacionaria o portátil y algunos de sus componentes son relativamente simples, pero puede ser ruidoso y además la presión de descarga es generalmente menor que la de un compresor de tornillo [29]. A continuación en la Figura 2.12 se presenta el esquema de funcionamiento de un compresor de pistón.

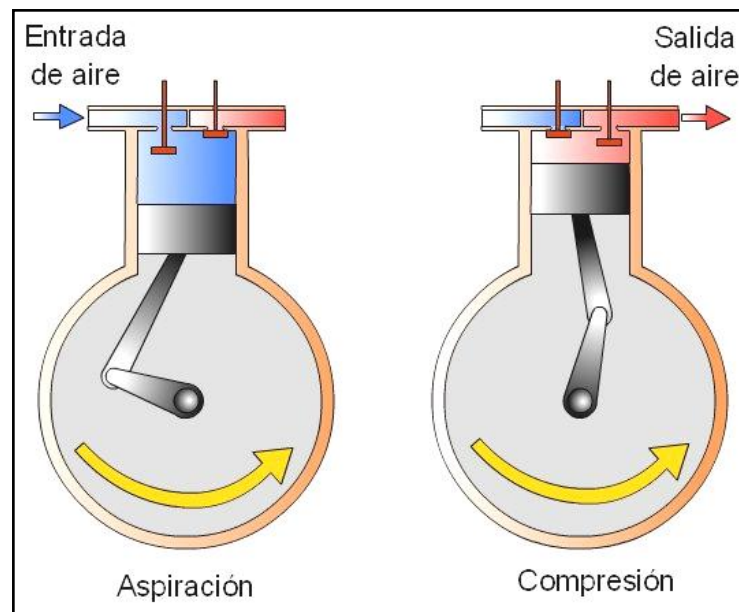


Figura 2.12: Esquema del funcionamiento de un compresor de pistón [30]

- *Compresor de espiral*

El compresor de espiral funciona en base a una forma relativamente nueva de compresión. En este compresor, una espiral o “scroll” orbitante concéntrico se mueve en un círculo en relación a otro scroll fijo concéntrico, lo cual resulta en una reducción de volumen y consecuentemente el gas comprimido se encuentra contenido en bolsillos de

presión dentro de las espirales. A pesar de que este tipo de compresor tiene pocas partes que se mueven, éstas no son simples de fabricar [29]. A continuación en la Figura 2.13 se presenta el esquema de un compresor de espiral.

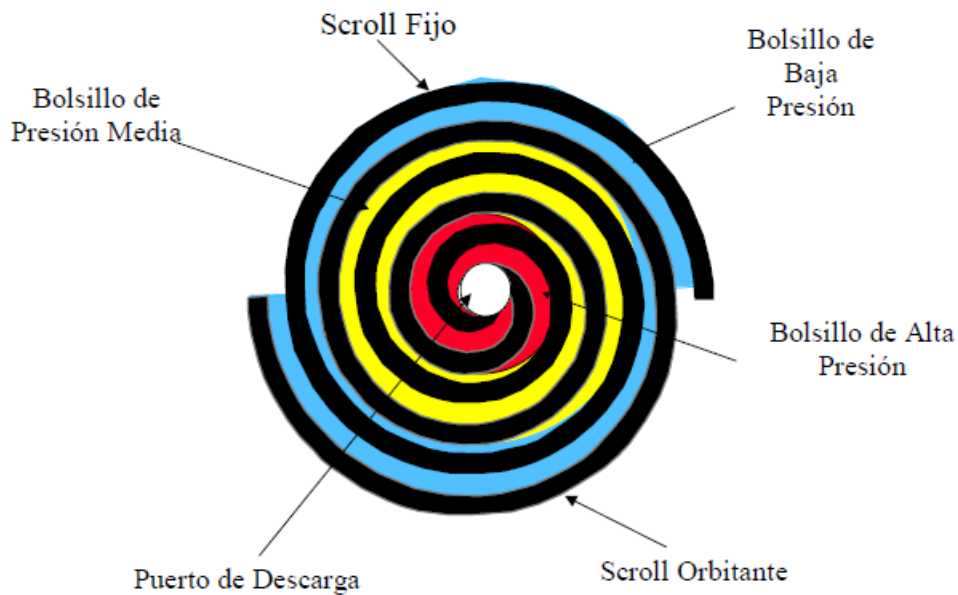


Figura 2.13: Esquema de un compresor de espiral [31]

Después de haber escogido el tipo de compresor a utilizar, se debe cumplir con las siguientes medidas de seguridad:

- el motor del compresor debe estar compuesto por materiales anti corrosivos como acero inoxidable, aluminio, hierro dúctil o acero alto en carbono, y no de cobre o bronce.
- ser adecuado para gases inflamables, para esto el motor del compresor debe estar localizado lejos del tanque en donde se almacena el biogás comprimido.
- estar ubicado en un lugar en donde se puedan ventilar las fugas.
- contar con tubería de compensación de presión, válvulas de seguridad para alivio de sobrepresión, sistema de refrigeración con drenaje de condensados [32].

2.4.3 Obtención de energía eléctrica a partir de biogás

El uso del biogás en motores donde se combina la obtención de energía eléctrica y energía térmica, es considerado un uso muy eficiente del gas. Las plantas de CHP, por sus siglas en inglés *combined heat and power station*, más comunes poseen motores de combustión acoplados a un generador. Un tipo de motor acoplado al sistema CHP es el de gas-diesel, el cual es operado sin necesidad de aceite de ignición. La electricidad producida a partir del biogás puede ser usada como energía de proceso para equipos eléctricos como: bombas, sistemas de control y agitadores. El excedente de electricidad producida puede ser vendido a la red de electricidad del propio país. Por otra parte, el calor producido en estos sistemas se puede usar en el calentamiento de los digestores o en el calentamiento de las instalaciones de la planta. Pero también se lo puede transferir a poblados cercanos u otras industrias para usarlo de la misma forma como calefacción. A continuación se describe el funcionamiento de tres tipos de motores CHP [12].

2.4.3.1 Motor gas-Otto

Los motores gas-Otto fueron específicamente desarrollados para el uso con biogás de acuerdo al principio Otto. Estos motores son operados con un exceso de aire, para minimizar las emisiones de monóxido de carbono, y con biogás cuyo contenido mínimo de metano es 45 %. Además, los motores gas-Otto son útiles durante el arranque de una planta de biogás ya que el calor que producen es usado en el calentamiento de los digestores [12]. En este tipo de motores alrededor del 40 % de la energía producida es en forma de energía térmica, otro 40 % en forma de energía eléctrica y un 20 % son pérdidas de calor [21].

El principio Otto explica mediante cuatro fases la transformación de energía calorífica en energía mecánica utilizable. Durante estas fases un pistón se desplaza dentro de un cilindro y efectúa cuatro desplazamientos alternativos, mediante un sistema biela-manivela (cigüeñal), y transforma el movimiento lineal del pistón en movimiento de rotación del cigüeñal. El cigüeñal gira 720° durante las cuatro fases [33]. A continuación se describe cada fase del ciclo Otto.

- Admisión

En la fase de admisión del ciclo Otto se abre la válvula de admisión por donde ingresa la mezcla de aire/combustible. Esta válvula permanece abierta mientras el pistón se

desplaza desde la parte superior del cilindro hacia la parte inferior del cilindro. De esta forma, el pistón efectúa el primer desplazamiento lineal creando un vacío interno en el cilindro. Este vacío aspira la mezcla de aire/combustible hasta llenar totalmente el cilindro con la mezcla. La válvula de admisión se abre instantáneamente al inicio del desplazamiento del pistón, y se cierra también, de forma instantánea, al final del desplazamiento. Durante esta fase el cigüeñal realiza un giro de 180° y la válvula de escape permanece cerrada [33]. A continuación, en la Figura 2.14 se muestra un diagrama de la fase de admisión en el ciclo Otto.

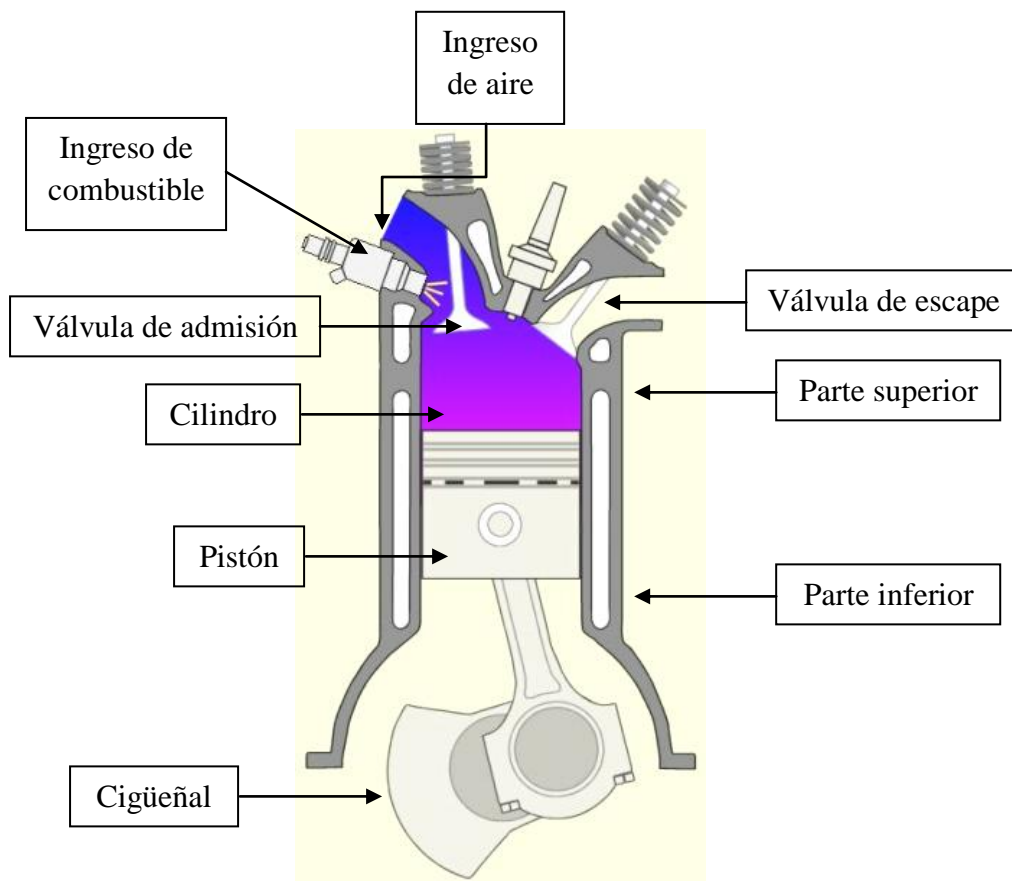


Figura 2.14: Fase de admisión en el ciclo de Otto [34]

- *Compresión*

En la fase de compresión del ciclo Otto el pistón efectúa el segundo desplazamiento. El pistón se desplaza desde la parte inferior del cilindro hacia la parte superior del cilindro comprimiendo la mezcla de aire/combustible. Durante esta fase el cigüeñal realiza otro giro de 180° y las válvulas de admisión y de escape permanecen cerradas [33]. A

continuación, en la Figura 2.15 se muestra un diagrama de la fase de compresión en el ciclo Otto.

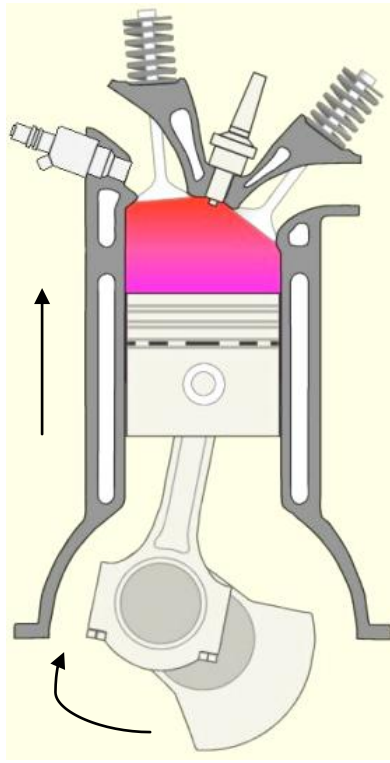


Figura 2.15: Fase de compresión en el ciclo de Otto [34]

- *Trabajo*

En la fase de trabajo del ciclo Otto el pistón llega al final de la compresión. Además, entre los electrodos de una bujía, se produce una chispa en el interior del cilindro que produce la ignición de la mezcla de aire/combustible. De esta forma se libera la energía calorífica del combustible y se tiene una temperatura elevada en el interior del cilindro. Consecuentemente la energía cinética de las moléculas de los productos de la combustión aumenta considerablemente. Estas moléculas chocan contra la cabeza del pistón y generan la fuerza de empuje que hace que el pistón se desplace hacia la parte inferior del cilindro [33].

En esta fase se produce la transformación de energía calorífica en trabajo. La presión generada por las moléculas de los productos de la combustión en el interior del cilindro baja rápidamente debido al aumento de volumen y también disminuye la

temperatura interior debido a la expansión. Durante esta fase el cigüeñal realiza otro giro de 180° y la válvula de admisión permanece cerrada. La válvula de escape permanece cerrada hasta que el pistón llega a la parte inferior del cilindro, e instantáneamente se abre la válvula [33]. A continuación, en la Figura 2.16 se muestra un diagrama de la fase de trabajo en el ciclo Otto.

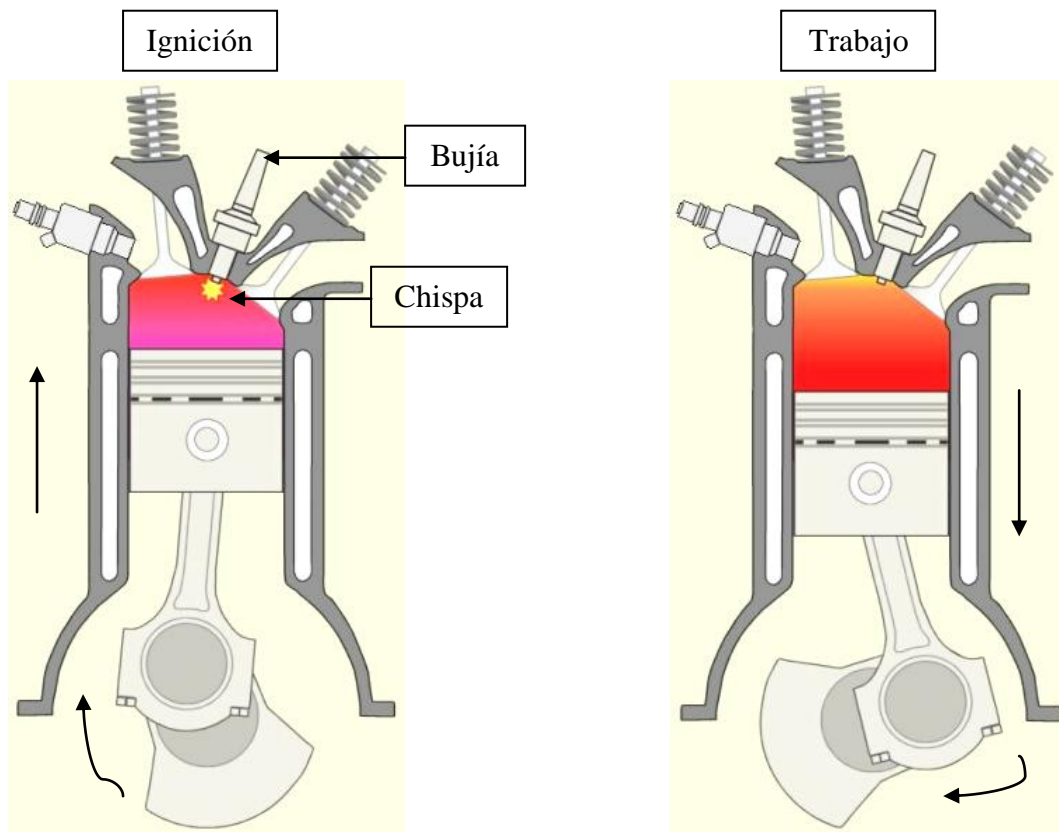


Figura 2.16: Fase de trabajo en el ciclo de Otto [34]

- *Escape*

En la fase de escape del ciclo Otto el pistón efectúa el cuarto desplazamiento. El pistón se desplaza desde la parte inferior del cilindro hacia la parte superior del cilindro expulsando los productos de la combustión a través de la válvula de escape que permanece abierta. Durante esta fase el cigüeñal realiza un giro de 180° . La válvula de admisión permanece cerrada hasta que el pistón llega a la parte superior del cilindro, e instantáneamente se cierra la válvula de escape y simultáneamente se abre la válvula de admisión. De esta forma se completa un ciclo [33]. A continuación, en la Figura 2.17 se muestra un diagrama de la fase de escape en el ciclo Otto.

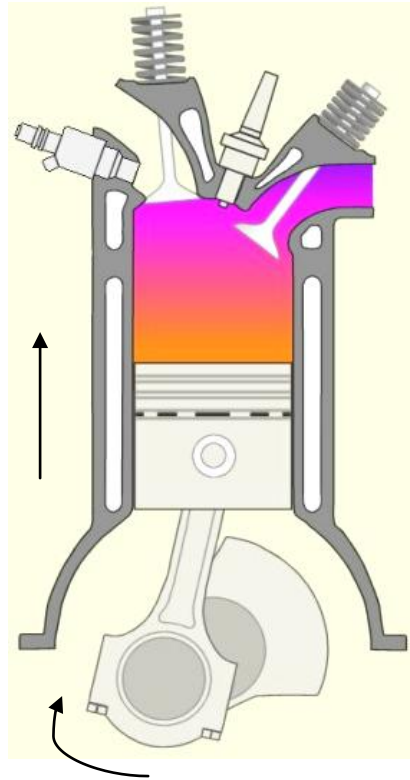


Figura 2.17: Fase de escape en el ciclo de Otto [34]

2.4.3.2 Motor inyección-piloto

Los motores inyección-piloto se basan en el mecanismo de funcionamiento de los motores a diesel de tractores y vehículos pesados. El biogás es inyectado en una cámara de combustión con aire a alta temperatura. El biogás se inflama en contacto con el aire caliente y se produce la combustión del mismo [12]. La eficiencia óptima de este tipo de motores puede ser del 29 % [35]. En caso de que se interrumpa el suministro de biogás, este tipo de motores puede operar sin problema sólo con aceite de ignición o diesel. La sustitución del biogás por aceite o diesel puede ser necesaria durante el arranque de una planta de biogás para generar calor [12].

El funcionamiento de los motores inyección-piloto de cuatro tiempos es similar al funcionamiento de los motores gas-Otto. De igual forma, se tienen cuatro fases en las que el pistón se desplaza dentro del cilindro y efectúa cuatro desplazamientos alternativos, haciendo que el cigüeñal gire 720° durante las cuatro fases [33]. A continuación se describe cada fase del funcionamiento de un motor inyección-piloto.

- *Admisión*

En la fase de admisión del funcionamiento de un motor inyección-piloto se abre la válvula de admisión por donde ingresa el aire. Esta válvula permanece abierta mientras el pistón se desplaza desde la parte superior del cilindro hacia la parte inferior del cilindro. De esta forma, el pistón efectúa el primer desplazamiento lineal creando un vacío interno en el cilindro. Este vacío aspira el aire hasta llenar totalmente el cilindro con este gas. La válvula de admisión se abre instantáneamente al inicio del desplazamiento del pistón, y se cierra también, de forma instantánea, al final del desplazamiento. Durante esta fase el cigüeñal realiza un giro de 180° y la válvula de escape permanece cerrada [33]. A continuación, en la Figura 2.18 se muestra un diagrama de la fase de admisión del funcionamiento de un motor inyección-piloto.

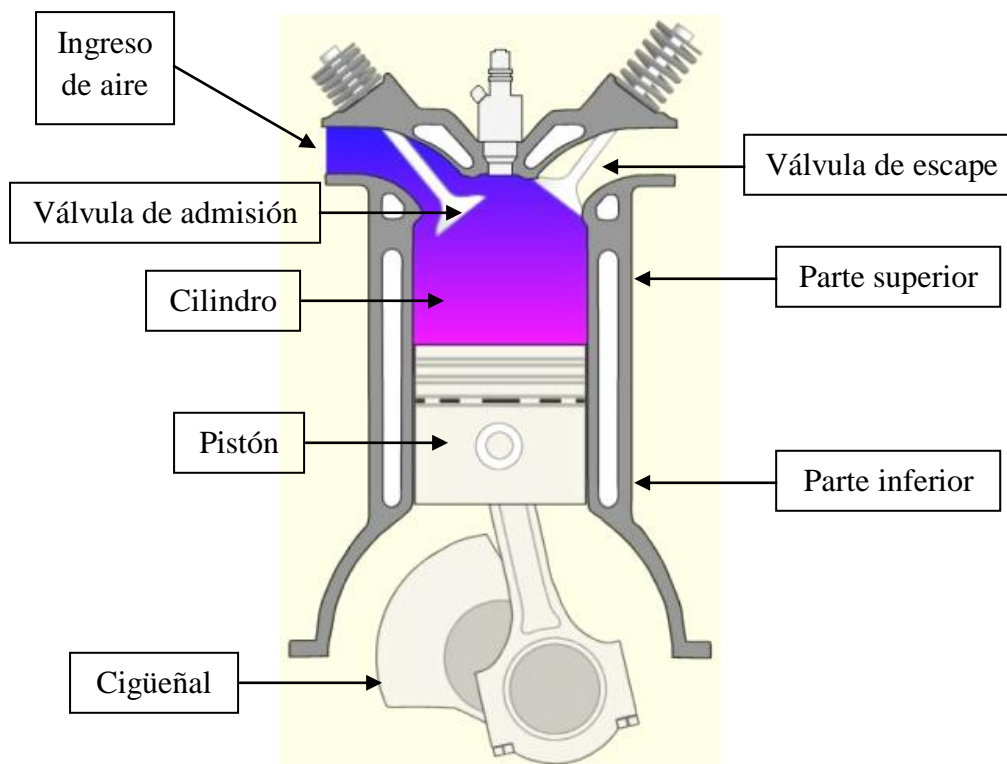


Figura 2.18: Fase de admisión del funcionamiento de un motor inyección-piloto [36]

- *Compresión*

En la fase de compresión del funcionamiento de un motor inyección-piloto el pistón efectúa el segundo desplazamiento. El pistón se desplaza desde la parte inferior del cilindro

hacia la parte superior del cilindro comprimiendo el aire a gran presión. La presión alcanzada en el interior del cilindro mantiene la temperatura del aire por encima del punto de inflamación del combustible. Durante esta fase el cigüeñal realiza otro giro de 180° y las válvulas de admisión y de escape permanecen cerradas [33]. A continuación, en la Figura 2.19 se muestra un diagrama de la fase de compresión del funcionamiento de un motor inyección-piloto.

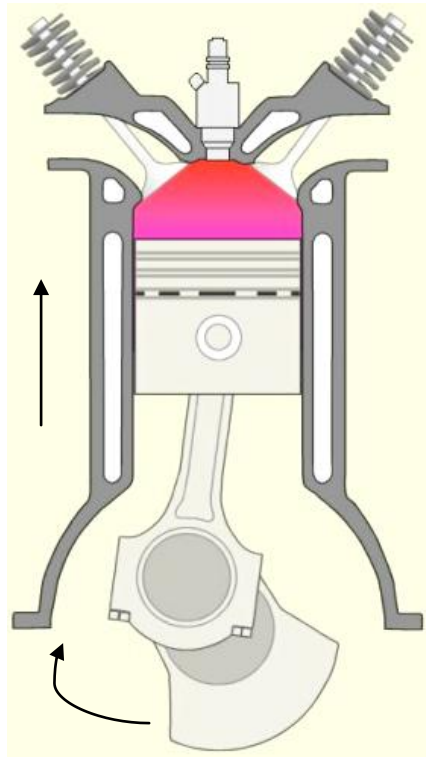


Figura 2.19: Fase de compresión del funcionamiento de un motor inyección-piloto [36]

- *Trabajo*

En la fase de trabajo del funcionamiento de un motor inyección-piloto el pistón llega al final de la compresión. Además, se inyecta en el cilindro una cantidad de combustible a una presión muy superior a la del interior del cilindro. La cantidad de combustible se regula mediante una bomba de inyección. El combustible se inflama en contacto con el aire caliente y se produce la combustión del mismo. De esta forma se tiene una temperatura elevada en el interior del cilindro. Consecuentemente la energía cinética las moléculas de los productos de combustión chocan contra la cabeza del pistón y generan

la fuerza de empuje que hace que el pistón se desplace hacia la parte inferior del cilindro [33].

Durante esta fase el cigüeñal realiza otro giro de 180° y la válvula de admisión permanece cerrada. La válvula de escape permanece cerrada hasta que el pistón llega a la parte inferior del cilindro, e instantáneamente se abre la válvula [33]. A continuación, en la Figura 2.20 se muestra un diagrama de la fase de trabajo del funcionamiento de un motor inyección-piloto.

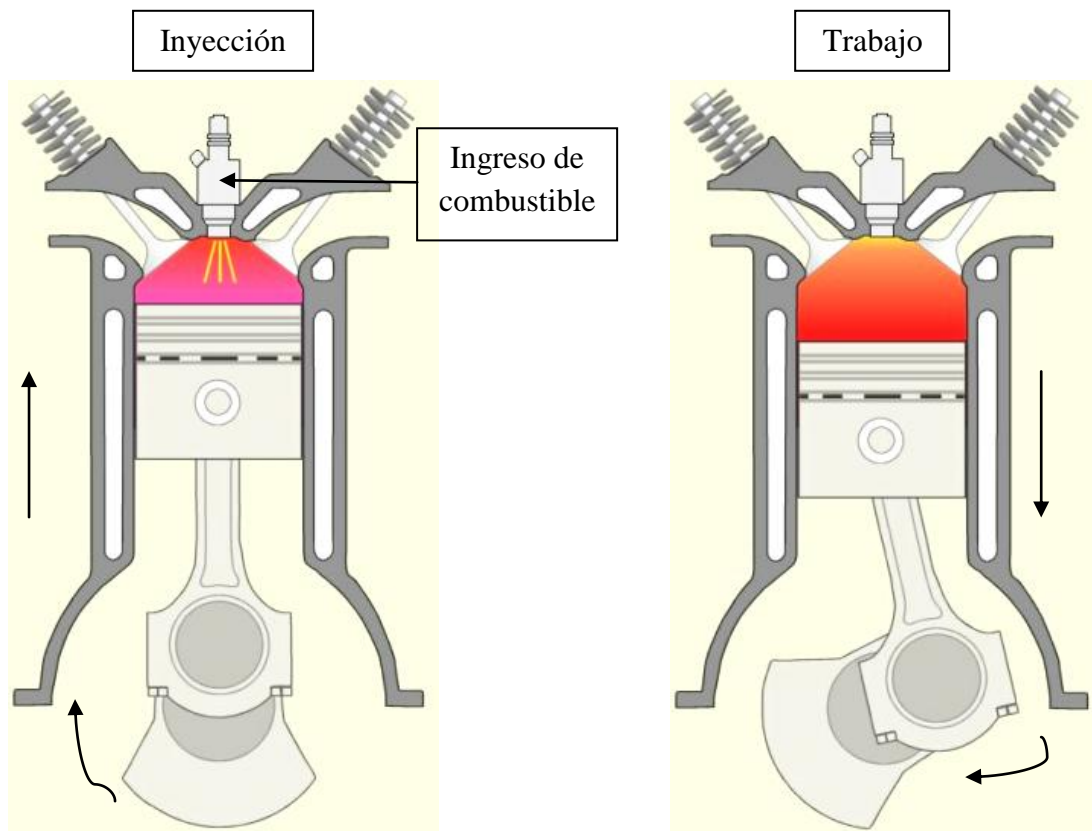


Figura 2.20: Fase de trabajo del funcionamiento de un motor inyección-piloto [36]

- *Escape*

En la fase de escape del funcionamiento de un motor inyección-piloto el pistón efectúa el cuarto desplazamiento. El pistón se desplace desde la parte inferior del cilindro hacia la parte superior del cilindro expulsando los productos de la combustión a través de la válvula de escape que permanece abierta. Durante esta fase el cigüeñal realiza otro giro de 180° . La válvula de admisión permanece cerrada hasta que el pistón llega a la parte

superior del cilindro, e instantáneamente se cierra la válvula de escape y simultáneamente se abre la válvula de admisión [33]. A continuación, en la Figura 2.21 se muestra un diagrama de la fase de escape del funcionamiento de un motor inyección-piloto.

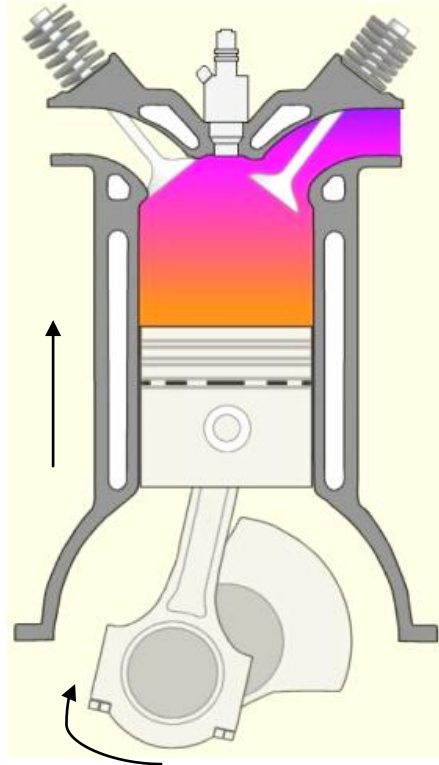


Figura 2.21: Fase de escape del funcionamiento de un motor inyección-piloto [36]

2.4.3.3 Motor Stirling

Los motores Stirling operan sin combustión interna y se basan en el principio de que los cambios de temperatura resultan en cambios de volumen de los gases. Los pistones del motor son movidos por la expansión de gas causado por la inyección de calor desde una fuente externa de energía. El calor necesario puede ser suministrado por fuentes como un quemador que funciona con biogás. Sin embargo, para usar un motor Stirling con biogás, es necesario realizar adaptaciones técnicas. Debido a que existe una combustión externa es posible utilizar biogás con bajo contenido de metano. La eficiencia eléctrica de un motor Stirling es de 24 – 28 %, menor a la de un motor gas-Otto. Por esta razón, los motores Stirling suelen ser usados en centrales térmicas [12].

2.4.4 Obtención de energía térmica a partir de biogás

La forma más simple de usar el biogás es mediante la combustión directa en calderos o quemadores. El biogás puede ser quemado para producir calor ya sea in situ o transportándolo mediante una red de gas adaptada apropiadamente para usuarios finales. Para obtener energía térmica a partir de biogás, no se requiere ningún tipo de purificación del gas ya que las impurezas no restringen su utilización como en el caso de otras aplicaciones. Sin embargo, el biogás necesita someterse a procesos de: condensación de agua, remoción de partículas, compresión, enfriamiento y secado [¹²].

El calor obtenido a partir del biogás puede ser usado en procesos industriales como separación y tratamiento adicional del biol, actividades agrícolas como secado de cultivos o para calentamiento de lugares, edificios y hogares [¹²].

3 Diseño del sistema de utilización energética de biogás

El proyecto inicia con el reinicio de la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA – USFQ y el diseño simultáneo del sistema de utilización energética de biogás. Para realizar el diseño se inicia con la cuantificación y caracterización del biogás producido en la planta piloto. Luego se prosigue con una revisión literaria de diferentes formas de acumulación de biogás y después de hacer una comparación técnica y económica, se continúa con la construcción del sistema seleccionado.

Después de construir el sistema de acumulación y compresión de biogás, se realizan las respectivas adaptaciones a un generador eléctrico y un calefón para llevar a cabo la utilización energética del biogás. En la Figura 3.1 se presenta el diagrama de bloque general del proceso de utilización energética de biogás.

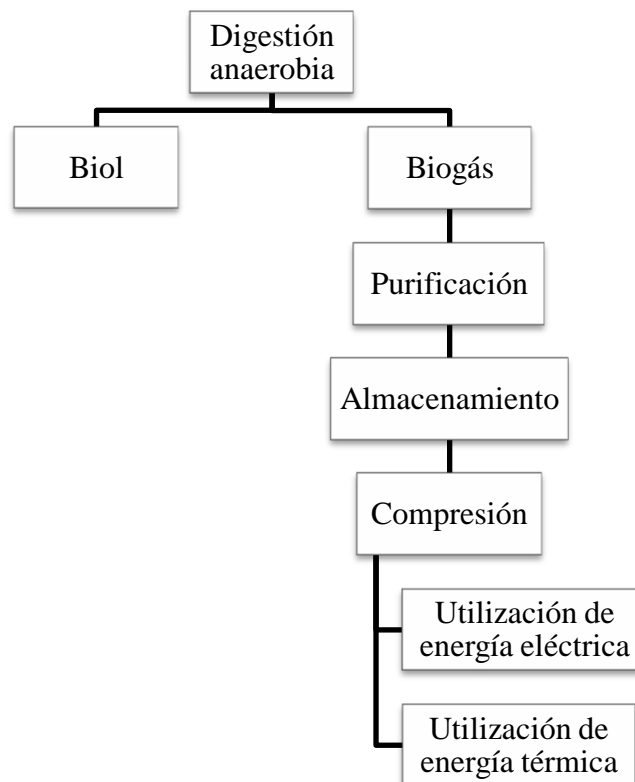


Figura 3.1: Diagrama de bloque general del proceso de utilización energética de biogás

3.1 Cuantificación y caracterización del biogás

3.1.1 Prueba de gas

La prueba de gas permite conocer la calidad del biogás, es decir, el contenido de metano que este contiene. Para esto se realizan dos pruebas: cualitativa y cuantitativa.

- Prueba cualitativa

La prueba cualitativa es la combustión del biogás en una llama. Para esto se enciende el biogás producido en el proceso de digestión anaerobia y se observa el color de la llama y la capacidad de mantenerse encendida [26]. A continuación en la Figura 3.2 se presenta una foto de la prueba cualitativa del biogás.



Figura 3.2: Prueba cualitativa del biogás (combustión)

El biogás obtenido de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA – USFQ presenta en todo momento la capacidad de combustionarse sin llama extensa, por lo que su utilización energética es factible. Esto se nota al observar que se produce una llama al combustionar el biogás sin la necesidad de usar llama piloto.

- *Prueba cuantitativa*

La prueba cuantitativa es la absorción química del CO_2 . Para esto se hace burbujear una cantidad conocida de biogás a través de una solución de hidróxido de sodio, NaOH , al 4 %. Debido a que el metano es insoluble en la solución, éste desplaza al líquido mientras que el CO_2 se absorbe en la solución y de esta forma se puede medir el volumen de metano que es igual al volumen desplazado del líquido. Finalmente, se calcula el porcentaje, % v/v, de metano contenido en el volumen conocido de biogás [²⁶]. En la Figura 3.3 se muestran fotos de cómo afecta la absorción química del CO_2 en la solución de NaOH al 4 %.

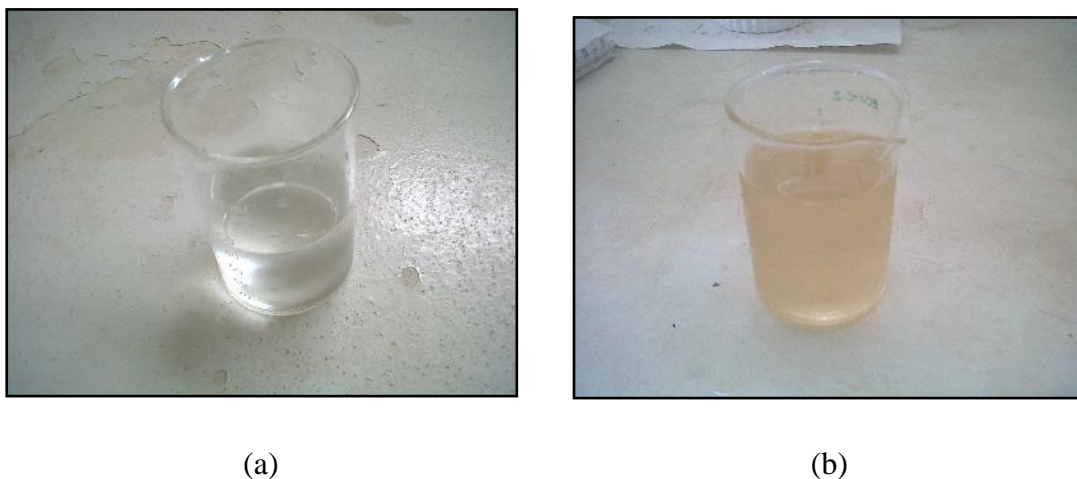


Figura 3.3: Absorción química del CO_2 en la solución de NaOH al 4 %. (a) antes de la absorción, (b) después de varias pruebas de absorción

Los resultados obtenidos después de realizar la prueba cuantitativa de absorción del CO_2 en NaOH al 4 % durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia se presentan en la Figura 3.4:

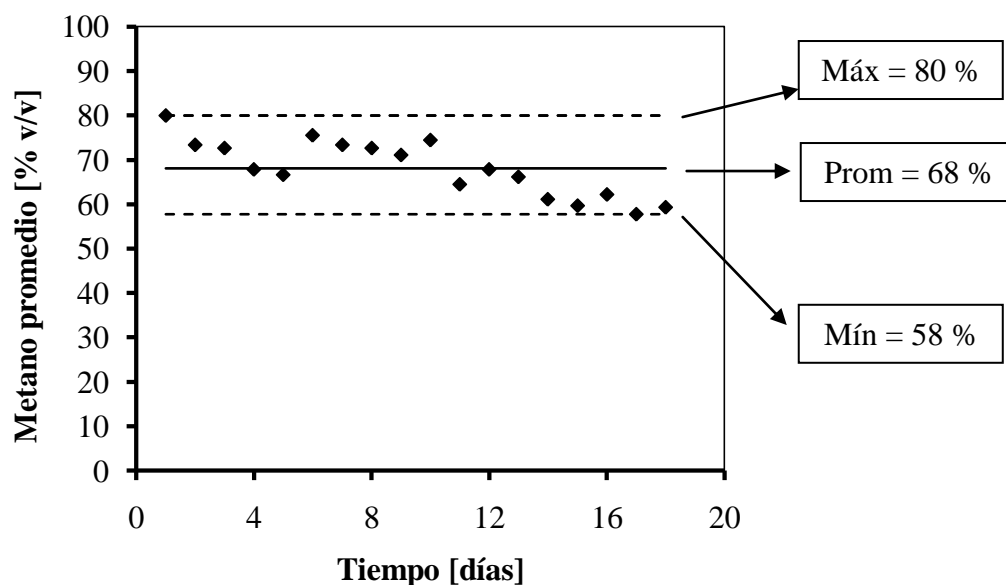


Figura 3.4: Calidad del biogás durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

En la Figura 3.4 cada resultado corresponde al porcentaje de metano promedio de tres días de medición. Se puede decir que el biogás obtenido durante el reinicio de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA fue de buena calidad. El valor más alto medido es de 80 %, lo cual se puede explicar por el largo periodo que el biodigestor permaneció sin alimentación y degradando el material orgánico residual. La mayor parte de resultados se encuentran dentro del rango más común entre 55 y 65 % de metano. El porcentaje promedio de metano más bajo es de 58 %. Esto implica que el biogás producido es de excelente calidad y mediante la combustión del gas se comprueba este hecho, ya que se presenta una coloración azul característica del metano en la prueba cualitativa del biogás. En conclusión, de acuerdo a la Figura 3.4 el porcentaje promedio de metano en el biogás durante el reinicio de la operación de la planta piloto se encuentra en 68 %, con un mínimo de 58 % y un máximo de 80 %.

Los resultados obtenidos después de realizar la prueba cuantitativa de absorción del CO_2 en NaOH al 4 % durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia se presentan en la Figura 3.5:

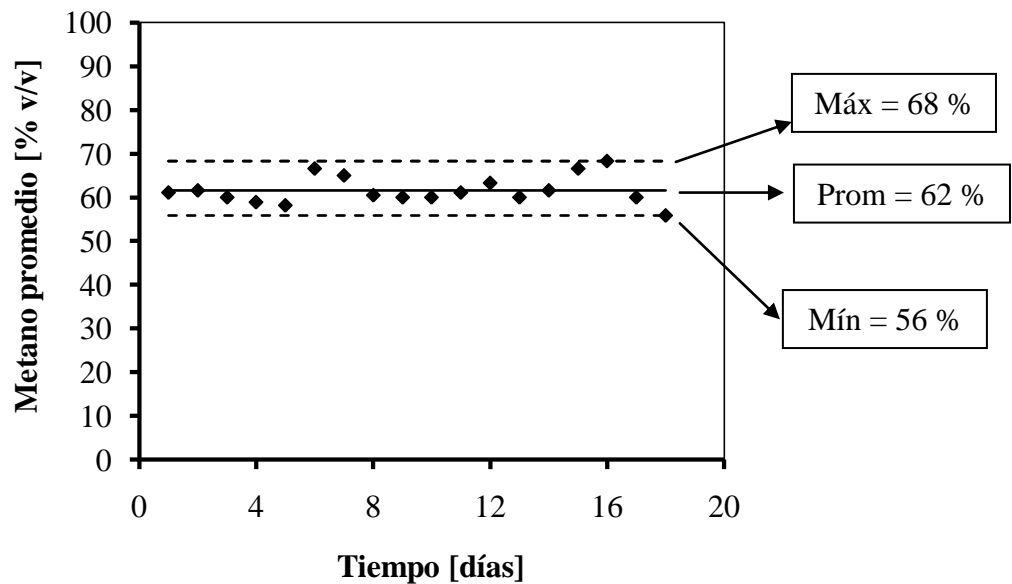


Figura 3.5: Calidad del biogás durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

En la Figura 3.5 se presentan los resultados de la medición del porcentaje de metano contenido en el biogás producido durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA. Así mismo, cada resultado corresponde al porcentaje de metano promedio de tres días de medición. El porcentaje promedio de metano más alto obtenido es de 68 %. La mayor parte de resultados se encuentran dentro del rango entre 55 y 65 %. El porcentaje promedio de metano más bajo medido es de 56 %. El biogás producido es de excelente calidad y mediante la combustión del gas se comprueba este hecho, ya que se presenta una coloración azul característica del metano al medir la calidad del biogás. En conclusión, de acuerdo a la Figura 3.5 el porcentaje promedio de metano en el biogás durante la operación regular de la planta piloto se encuentra en 62 %, con un mínimo de 56 % y un máximo de 68 %.

3.1.2 Contenido de H_2S

Para determinar el contenido de H_2S del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia se utiliza un detector portátil de gases que incluye tubos colorimétricos

Dräger de rango corto y una bomba manual Dräger accuro. A continuación en la Figura 3.6 se presenta una foto del detector portátil de gases.



Figura 3.6: Tubos colorimétricos Dräger y bomba manual Dräger accuro [37]

Los tubos colorimétricos Dräger se usan para realizar mediciones precisas in situ de una gran cantidad de gases y vapores diferentes. Estos tubos se usan manualmente con la bomba de detección de gases Dräger accuro. Esta bomba consta de un fuelle que se comprime y conduce la muestra de gas a través del tubo colorimétrico Dräger [37]. En el Anexo 1 se detalla el procedimiento que se sigue para determinar el contenido de H_2S de un gas mediante el uso de los tubos colorimétricos Dräger.

Después de medir el contenido de H_2S del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia con un tubo colorimétrico Dräger de rango de 100 a 2000 ppm se observa claramente un cambio de color en el tubo como se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7: Medición del contenido de H_2S del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

Se midió el contenido de H_2S del biogás obtenido directamente del digestor de la planta piloto. El contenido promedio de H_2S del biogás es de aproximadamente 100 ppm como se observa en la Figura 3.7.

3.1.3 Cuantificación del biogás

En la cuantificación del biogás se lleva a cabo un seguimiento de la cantidad de biogás producido diariamente en litros. Para este proceso se utiliza un contador de gas marca KEUK DONG, modelo G1.6, de tipo diafragma [26]. A continuación en la Figura 3.8 se muestra una foto del contador de gas.



Figura 3.8: Contador de gas

Los resultados obtenidos después de realizar un seguimiento de la cantidad de biogás producido durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia se presentan en la Figura 3.9:

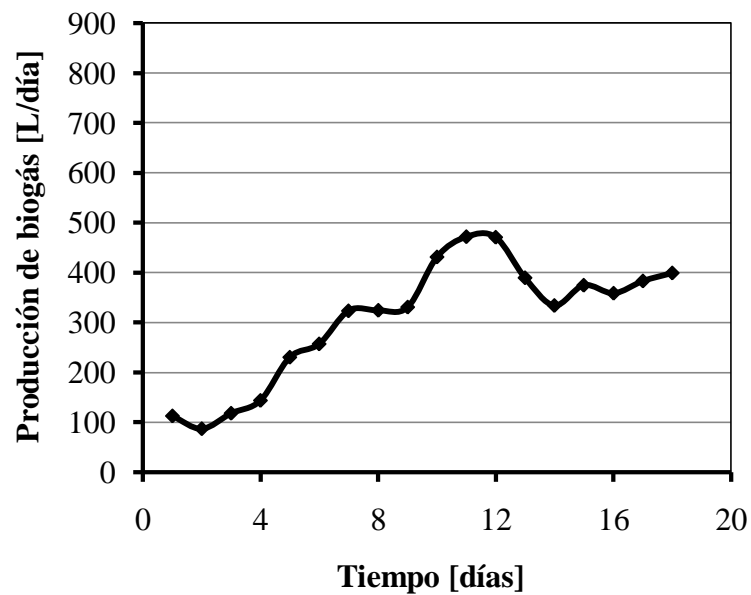


Figura 3.9: Producción diaria de biogás durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

En la Figura 3.9 cada resultado corresponde a la producción promedio de biogás de tres días de medición. Se observan pocos días con una producción alta de biogás (> 400 L/día). Una de las razones para la producción diaria baja de biogás que se muestra en los primeros días de la Figura 3.9, se puede explicar por el largo periodo que el digestor permaneció sin alimentación y degradando el material orgánico residual. De acuerdo a la Figura 3.9, durante este periodo la producción promedio de biogás es de 303 L/día, con un mínimo de 88 L/día y un máximo de 485 L/día.

También se debe tener muy en cuenta la calidad del gas. A continuación en la Figura 3.10 se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de metano producido durante el reinicio de la operación de la planta piloto. Se observa que el contenido de metano se encuentra siempre entre 80 y 58 % con un promedio de 68 %.

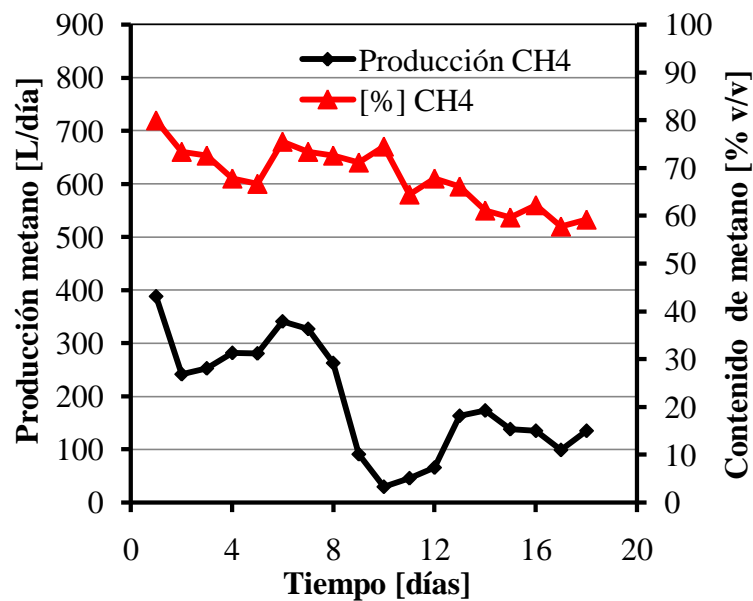


Figura 3.10: Producción diaria de metano durante el reinicio de la operación de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

En la Figura 3.10 cada resultado corresponde a la producción promedio de metano de tres días de medición. Se observa que durante este periodo la producción promedio de metano es de 192 L/día, con un mínimo de 30 L/día y un máximo de 388 L/día.

Los resultados obtenidos de la cuantificación de biogás durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia se presentan en la Figura 3.11:

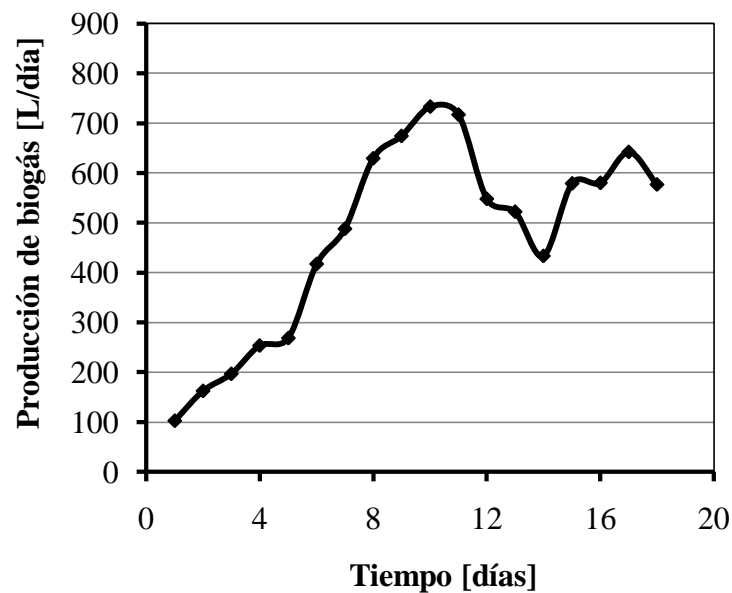


Figura 3.11: Producción diaria de biogás durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

Así mismo, en la Figura 3.11 cada resultado corresponde a la producción promedio de biogás de tres días de medición. En esta figura se observa que en la mayoría de casos se tiene una producción alta de biogás (> 400 L/día). Y se tiene que durante este periodo la producción promedio de biogás es de 478 L/día, con un mínimo de 103 L/día y un máximo de 733 L/día. A continuación en la Figura 3.12 se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de metano producido durante la operación regular de la planta piloto. Se observa que el contenido de metano se encuentra siempre entre 68 y 56 % con un promedio de 62 %.

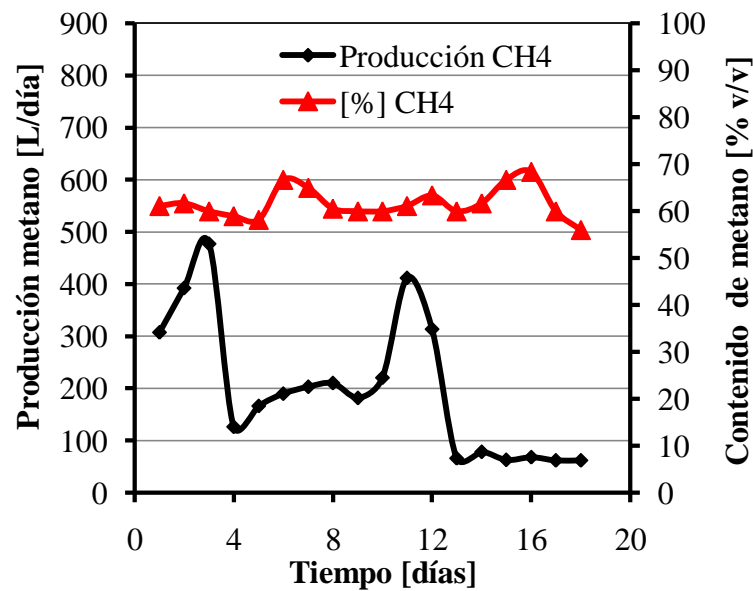


Figura 3.12: Producción diaria de metano durante la operación regular de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA

En la Figura 3.12 cada resultado corresponde a la producción promedio de metano de tres días de medición. Se observa que durante este periodo la producción promedio de metano es de 200 L/día, con un mínimo de 62 L/día y un máximo de 478 L/día.

3.2 Diseño del sistema de utilización energética de biogás

3.2.1 Proceso general del sistema de utilización energética de biogás

El sistema de utilización energética de biogás es diseñado a partir de los resultados obtenidos de la cuantificación y caracterización del biogás obtenido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA. Con estos datos se diseña el sistema de utilización energética de biogás de la siguiente forma: el biogás obtenido en la planta piloto a 35 °C es purificado mediante un sistema de reducción de H₂S, vapor de agua y olores; luego el gas es acumulado a presión atmosférica en un gasómetro de PVC; mediante la instalación de un controlador automático el biogás almacenado en el gasómetro es comprimido a 8 bar. Antes de que el gas sea comprimido, se lo enfría a 20 °C usando un intercambiador de calor, y se elimina el vapor de agua condensado mediante un separador tipo sifón. Además,

antes de que el biogás comprimido sea almacenado, se lo enfría a 100 °C y nuevamente se elimina el vapor de agua condensado. Por último, es almacenado en un tanque presurizado para que posteriormente sea usado para el funcionamiento de un generador eléctrico y un calefón, adaptados para el uso de este combustible.

A continuación en la Figura 3.13 se presenta el proceso que se da en el sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto del LaDEA.

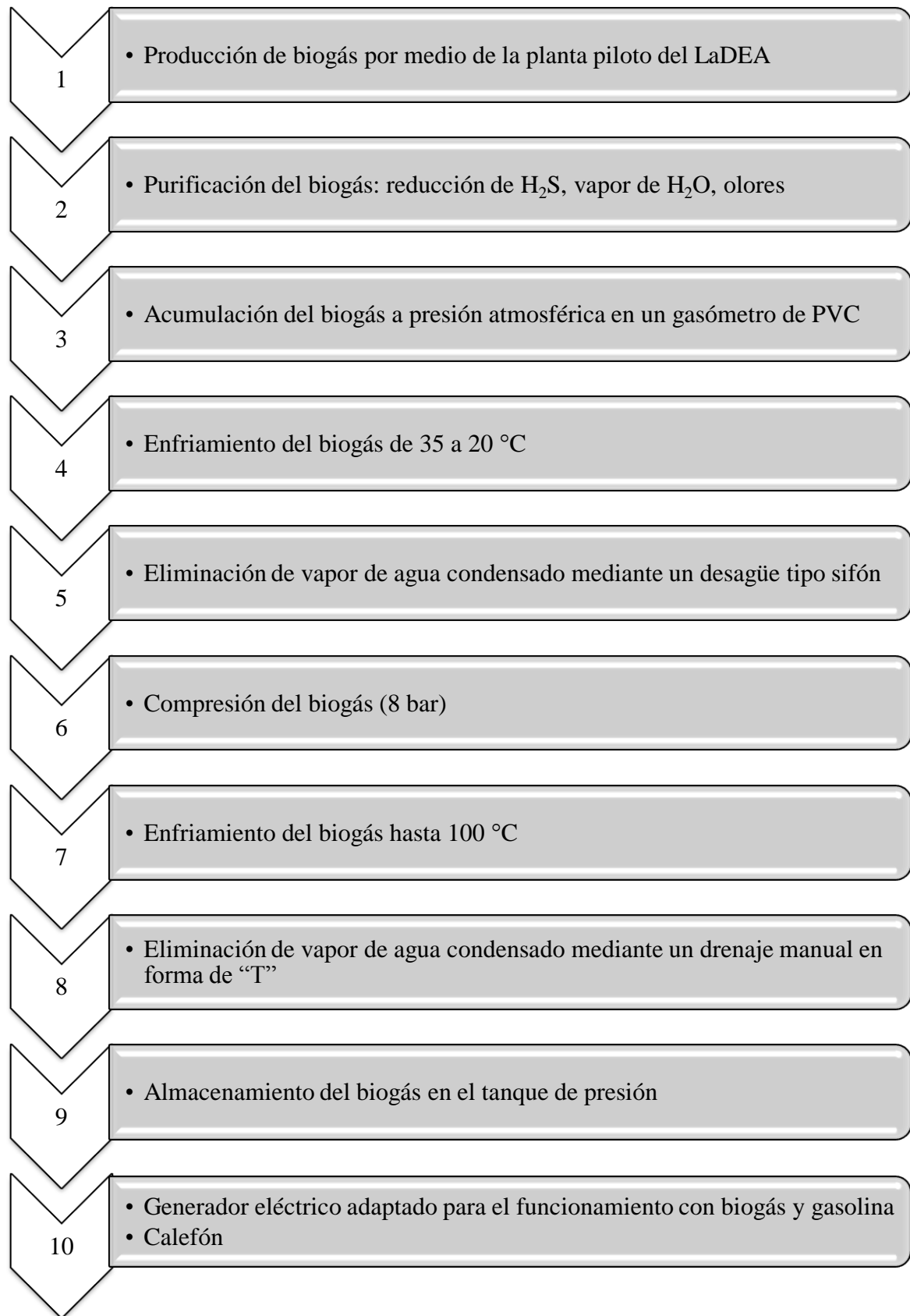


Figura 3.13: Proceso del sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto del LaDEA

3.2.2 Diseño del sistema de purificación del biogás

- Reducción de H_2S

Para la reducción de las trazas de H_2S presentes en el biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA se utiliza un filtro constituido por un cilindro de PVC de 41 cm de longitud y 11 cm de diámetro. En su interior el filtro contiene una esponja de hierro con una masa total de alrededor de 300 g y se encuentra sellado por una tapa en cada uno de sus extremos. El biogás atraviesa el filtro en forma descendente [26]. A continuación en la Figura 3.14 se presenta una foto del filtro de eliminación de H_2S .



Figura 3.14: Filtro de eliminación de H_2S

Además se calcula el tiempo que tarda un volumen de biogás igual al volumen del filtro en entrar al filtro en su totalidad. Este tiempo es conocido como tiempo de residencia, τ , y se calcula mediante la siguiente ecuación [38]:

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad 3.1$$

donde, V es el volumen del filtro [L]

\dot{V} es el flujo volumétrico del biogás [L/min]

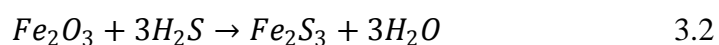
Para calcular el tiempo de residencia, se considera el volumen libre del filtro (V_l) en lugar del volumen total V indicado anteriormente. El volumen libre se determina mediante la resta del volumen total del filtro menos el volumen ocupado por la esponja de hierro que se encuentra en el interior del filtro (V_e). Utilizando los caudales medios al inicio y durante la operación regular, se calcula el tiempo de residencia del biogás en el filtro. Se presentan los resultados en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Tiempo de residencia en el filtro de eliminación de H_2S

Parámetro	Símbolo	Reinicio de la operación de la planta piloto	Operación regular de la planta piloto	Unidades
Volumen del filtro	V	3.89		L
Volumen de las esponjas	V_e	1.20		L
Volumen libre	V_l	2.69		L
Flujo volumétrico del biogás (producción promedio)	\dot{V}	303	478	L/día
		0.21	0.33	L/min
Tiempo de residencia	τ	12.8	8.1	min

Entonces, durante la operación regular de la planta piloto, cada 8.1 min se trata en el filtro un volumen de biogás de 2.69 L.

Por otra parte, para estimar cuántos ppm de H_2S pueden ser removidos del biogás en el filtro, se realizan los cálculos en base a una de las reacciones estequiométricas de la sección 2.2.3:



Utilizando la relación estequiométrica de la ecuación anterior y suponiendo que se remueve un mínimo de 90 % de H_2S del biogás, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 3.2: Estimación de la remoción de H₂S

Parámetro	Símbolo		Unidades
Masa de Fe ₂ O ₃ (masa de esponjas de hierro)	m_{Fe2O3}	300	g
Masa molar de Fe ₂ O ₃	M_{Fe2O3}	159.6	g/mol
Moles de Fe ₂ O ₃ que reaccionan	n_{Fe2O3}	1.88	mol
Moles de H ₂ S que pueden ser removidas (100 %)	n'_{H2S}	5.64	mol
Moles de H ₂ S ser removidas (90 %)	n_{H2S}	5.08	mol
Masa molar de H ₂ S	M_{H2S}	34	g/mol
H ₂ S que puede ser removido con las esponjas	m_{H2S}	172.6	g
Flujo volumétrico del biogás (producción promedio durante la operación regular de la planta piloto)	\dot{V}	478	L/día
Concentración de H ₂ S en el biogás	C_{H2S}	100	mg/L
Flujo volumétrico de H ₂ S	\dot{V}_{H2S}	47.8	g/día
Tiempo duración del filtro de H ₂ S	t	3.6	día

Se observa que en tan sólo 3 días, el filtro se encuentra saturado y debe ser regenerado.

- *Reducción de olores y vapor de agua*

Para la reducción de olores presentes en el biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA se utiliza un filtro constituido por un cilindro de PVC de 41 cm de longitud y 11 cm de diámetro. En su interior el filtro contiene carbón activado granular (CAG) con una masa total de alrededor de 4 kg y se encuentra sellado por una tapa en cada uno de sus extremos. Mediante este filtro también se puede reducir pequeñas cantidades de H₂S que posee el biogás. El biogás atraviesa el filtro en forma ascendente [26]. A continuación en la Figura 3.15 se presenta una foto del filtro de reducción de olores.



Figura 3.15: Filtro de eliminación de olores y de vapor de agua

Además se calcula el tiempo de residencia del biogás en este filtro y se tienen los siguientes resultados:

Tabla 3.3: Tiempo de residencia en el filtro de eliminación de H₂S

Parámetro	Símbolo	Reinicio de la operación de la planta piloto	Operación regular de la planta piloto	Unidades
Volumen del filtro	V	3.89		L
Flujo volumétrico del biogás (producción máxima)	\dot{V}	485	733	L/día
		0.34	0.51	L/min
Tiempo de residencia	τ	11.5	7.64	min

Entonces, durante la operación regular de la planta piloto, cada 7.64 min se puede tratar en el filtro un volumen de biogás de 3.89 L, considerando el caudal máximo de producción de biogás.

- *Retención de condensados*

Para la retención de condensados, principalmente de vapor de agua, que provienen del filtro de esponjas de hierro y del filtro de carbón activado se utiliza una trampa de agua constituida por una “T” y por una botella plástica [26]. A continuación en la Figura 3.16 se presenta una foto de la trampa de agua.



Figura 3.16: Trampa de agua

3.2.3 *Diseño del sistema de acumulación del biogás*

- *Dimensionamiento del gasómetro*

Para el dimensionamiento del sistema de acumulación del biogás se considera la producción diaria de biogás de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA. Como

se menciona en la sección 3.1.3, la producción diaria máxima de biogás durante el reinicio de la operación es de 485 L/día, y la producción diaria máxima de biogás durante la operación regular es de 733 L/día. Además, se tiene un promedio de 303 L/día de producción de biogás durante el reinicio de la operación, y un promedio de 478 L/día de producción de biogás durante la operación regular. Considerando estos valores, se decide tener una capacidad de almacenamiento máximo del gasómetro de 200 L, con lo cual se tendrían hasta 4 ciclos de llenado del gasómetro por día para la producción máxima de 733 L/día. Como se dispone de recursos limitados, se decide trabajar con materiales que existen en el mercado. Por esta razón, se utilizan dos tanques de polietileno de 200 L de capacidad y dos bolsas de PVC para almacenar el gas. Este proceso de selección de materiales se realizó junto con la empresa Proarcos.

- *Diseño del gasómetro*

El gasómetro en donde se acumula el biogás a presión atmosférica consiste de dos tanques conectados por la parte superior y por la parte inferior. Cada tanque tiene un volumen de 200 L de capacidad. Dentro de cada tanque existe una bolsa de PVC, sumergida en agua, la cual al llenarse de biogás se infla y desplaza el nivel de agua que la rodea. Cada bolsa se infla hasta un nivel máximo en el que adquiere la mitad del volumen del tanque que lo contiene, y el nivel de agua sube hasta el nivel indicado como máximo del controlador automático de nivel. De esta forma la capacidad máxima del gasómetro es de 200 L. A continuación en la Figura 3.17 se presenta el esquema de las condiciones iniciales del gasómetro de biogás.

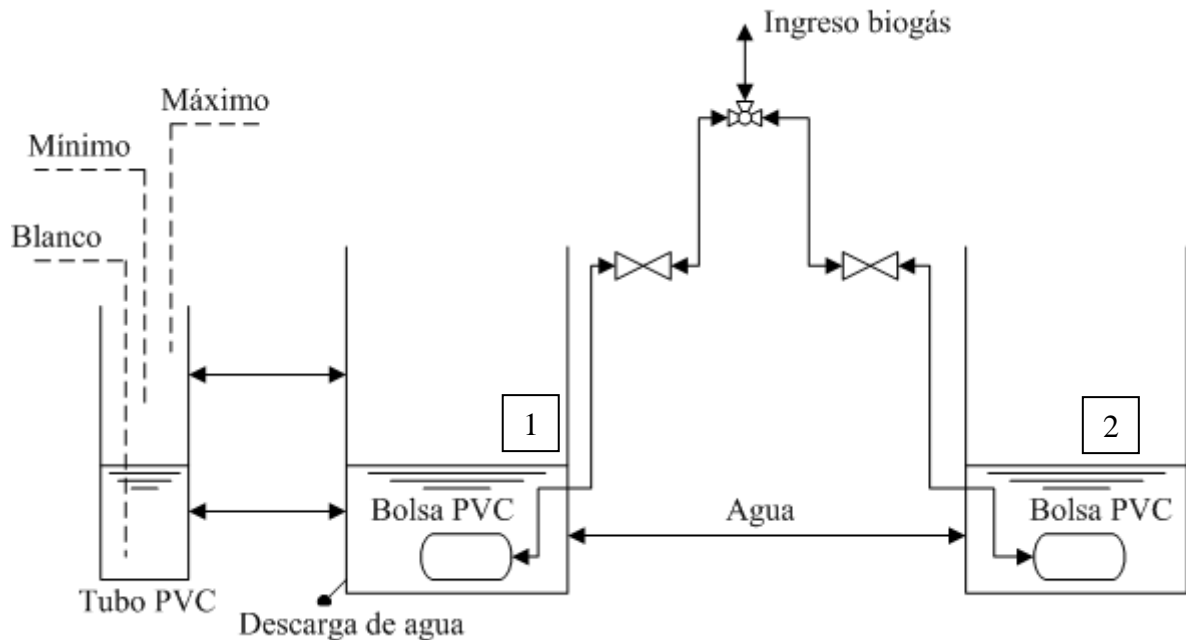


Figura 3.17: Esquema de las condiciones iniciales del gasómetro de biogás

Como se observa en Figura 3.17 los tanques # 1 y # 2 están conectados por la parte superior por donde ingresa el biogás hasta las bolsas de PVC. Por la parte inferior de los tanques está conectada el agua. El ingreso del biogás a las bolsas se controla con válvulas de bola. Los tanques contienen agua que se encuentra alrededor de las bolsas de PVC. El agua es desplazada conforme las bolsas se llenan de biogás. Este cambio de nivel del agua es detectado por los sensores de nivel del sistema de control automático, los cuales se encuentran adjuntos al tanque # 1 en un tubo de PVC. De esta forma la compresión está controlada automáticamente.

Inicialmente, los sensores blanco y mínimo se encuentran cubiertos por agua. La distancia entre el sensor de máximo y el sensor de mínimo es de aproximadamente 25 cm. El sensor blanco se encuentra en la parte inferior del tubo de PVC. El controlador de nivel detecta el mínimo cuando el sensor blanco y el de mínimo se encuentran cubiertos por agua, y detecta el máximo cuando los tres sensores se encuentra cubiertos por agua. La compresión inicia cuando se detecta el nivel máximo.

El agua contenida en el tanque # 1, el tanque # 2 y el tubo de PVC de la Figura 3.17 se encuentra expuesta a presión atmosférica. Por lo tanto, cuando las bolsas de PVC se llenan de biogás, el agua de estos recipientes es desplazada, haciendo que su nivel ascienda

hasta el nivel máximo del controlador y de esta forma empieza automáticamente la compresión del biogás. A continuación en la Figura 3.18 se muestra el esquema del gasómetro cuando inicia automáticamente la compresión.

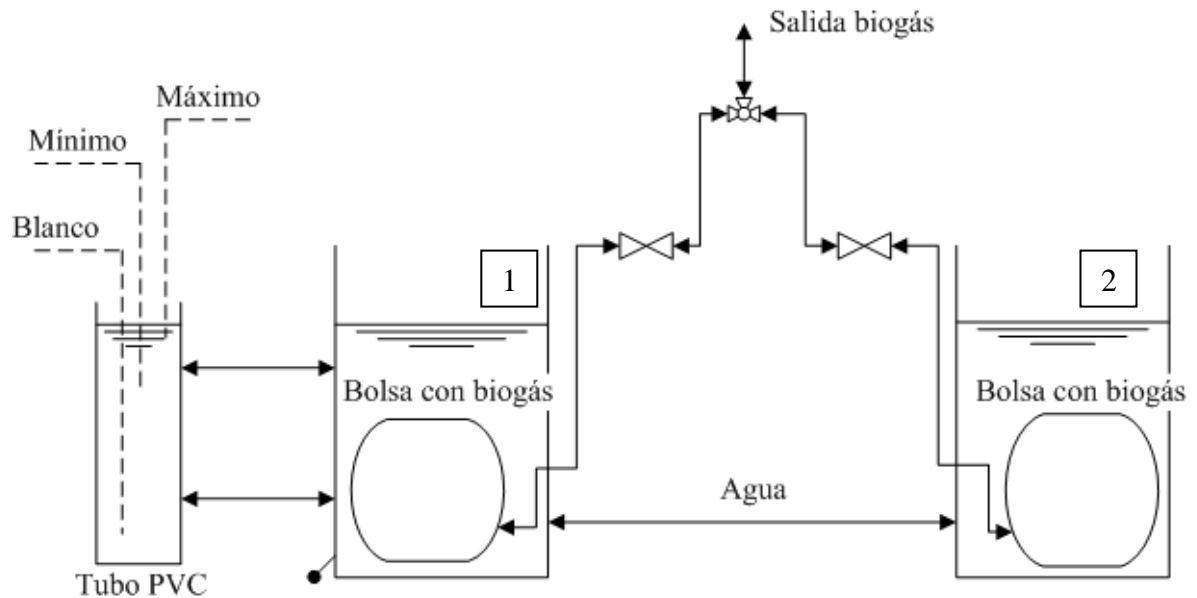


Figura 3.18: Esquema del gasómetro lleno con biogás

El vaciado del gasómetro, debido a la succión del biogás por medio del motor del compresor, termina automáticamente cuando el agua del tubo de PVC cubre a los sensores blanco y mínimo, es decir, cuando se llega a las condiciones iniciales mostradas en la Figura 3.17.

- Construcción del gasómetro

El gasómetro fue construido por la empresa Proarcos ya que poseen la tecnología necesaria para hacer las bolsas de PVC. En la Figura 3.19 se muestra una foto del exterior del gasómetro construido.



Figura 3.19: Gasómetro (vista exterior)

En la Figura 3.20 se muestra una foto del interior de uno de los tanques del gasómetro. La tubería que se observa es la que alimenta el biogás a la bolsa.

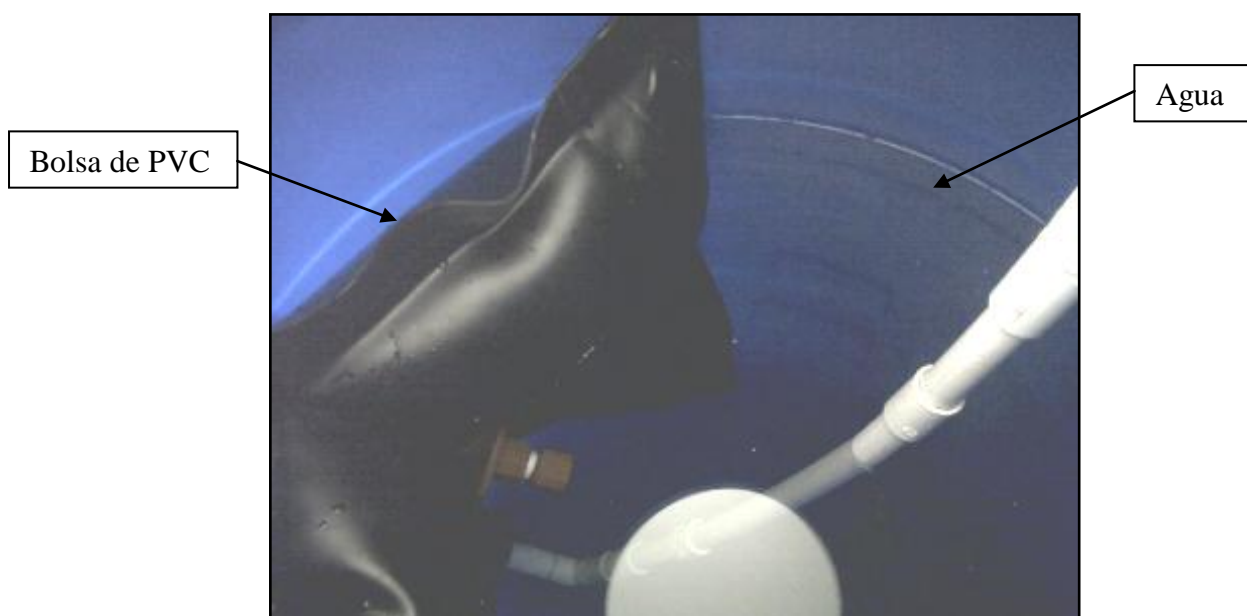


Figura 3.20: Gasómetro (vista interior)

En la Figura 3.21 se muestra una foto del sistema de control de nivel adjunto al tanque # 1 del gasómetro. Los sensores de nivel: mínimo, máximo y blanco se encuentran en su interior. El sistema de control de nivel fue construido por la empresa CEIN.



Figura 3.21: Nivel adjunto al tanque # 1 del gasómetro

En la Figura 3.22 se muestra una foto de los sensores de nivel del agua del gasómetro. Estos electrodos tipo péndulo, fabricados en acero inoxidable, son de marca COEL [39].



Figura 3.22: Sensor de nivel del agua del gasómetro [39]

Los electrodos miden la conductividad del agua. Para esto se toma como referencia uno de ellos, en este caso el blanco. Para detectar el nivel mínimo, el agua debe cubrir al electrodo blanco y al mínimo, de esta forma circula corriente entre estos sensores. Por otra parte, para detectar el nivel máximo, el agua debe cubrir a los tres electrodos, blanco, mínimo y máximo, de esta forma circula corriente entre estos sensores. Si es que el único electrodo cubierto por agua es el blanco, no existe circulación de corriente.

3.2.4 *Diseño del sistema de compresión de biogás*

- Criterios de selección de un compresor de biogás

Para el sistema de compresión de biogás se selecciona un compresor de pistón debido a las siguientes razones:

- tiene pocos componentes por lo que es relativamente simple
- es transportable
- el biogás entra directamente a la cámara de compresión y, por lo tanto, tiene contacto con pocos componentes del motor
- brinda una calidad de empacamiento mayor
- no necesita altos niveles de energía para su funcionamiento
- la presión de descarga producida no es extremadamente alta

- Descripción del compresor de biogás

El compresor adquirido es de aire marca TRUPER modelo COMP-25L con 2 HP de potencia nominal. El compresor consta de un motor lubricado. La presión máxima de compresión es de 116 psi (8 bar) y produce un flujo de aire de 125 L/min a 40 psi (2.8 bar), y de 96 L/min a 90 psi (6.2 bar). El motor incluye un ventilador para enfriamiento en su parte posterior. A continuación en la Figura 3.23 se muestra una foto del compresor.



Figura 3.23: Compresor de aire TRUPER [40]

El motor fue separado del tanque del compresor por medidas de seguridad. Esto se debe a que si se produce alguna chispa en el motor, esta no debe llegar al tanque. A continuación en la Figura 3.24 se muestra una foto del motor del compresor.



Figura 3.24: Motor del compresor

3.2.5 Diseño de los intercambiadores de calor

- Ecuaciones de diseño de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son necesarios para enfriar el biogás y eliminar el vapor de agua que contiene este gas antes y después de ser comprimido. Para poder diseñar un intercambiador de calor se debe considerar las propiedades tanto del fluido a enfriar o calentar como del fluido que se va a utilizar para recibir o dar energía en forma de calor. Además, se debe considerar las propiedades del material (tubería) que se encuentra entre los dos fluidos. Después de considerar estos aspectos, es necesario encontrar la cantidad de energía que se debe dar o retirar del sistema, el cual puede ser expresado en forma de flujo calórico [41].

El flujo calórico (Q) es uniforme en toda el área de la pared donde se realiza la transferencia de calor (A), y está definido por la siguiente fórmula [41]:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ML} \quad 3.3$$

donde, Q es el flujo calórico [W]

U es el coeficiente global de transferencia de calor del sistema [W/K·m²]

A es el área superficial de la pared donde se transfiere el calor [m²]

ΔT_{ML} es la diferencia de temperatura media logarítmica entre el fluido frío y el caliente a la entrada y a la salida del intercambiador [K]

En la ecuación 3.3, se utiliza ΔT_{ML} porque se toma en consideración las temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos. Esta diferencia de temperaturas se determina con la siguiente fórmula [41]:

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{2H} - T_{1H}) - (T_{1C} - T_{2C})}{\ln\left(\frac{T_{2H} - T_{1H}}{T_{1C} - T_{2C}}\right)} \quad 3.4$$

donde, el subíndice 1 se refiere a la entrada de fluido al intercambiador

el subíndice 2 se refiere a la salida de fluido del intercambiador

el subíndice H se refiere al fluido caliente que entrega calor

el subíndice C se refiere al fluido frío que absorbe calor [41]

El coeficiente U depende del material de la tubería que separa a los fluidos y de las propiedades de los fluidos que se utilicen en la transferencia de calor. Para determinar este coeficiente, se utiliza el modelo lineal unidimensional de fluidos equivalentes en forma de circuito térmico [41]. El modelo es considerado lineal, porque la diferencia de temperatura tiene carácter lineal. Esto se debe a que el flujo de calor tiene que sobrepasar distintas resistencias en serie para ser transferido de un fluido caliente hacia otro frío. Además, dicho modelo es análogo al de circuitos eléctricos donde la corriente está representada por el flujo calórico, y las resistencias, por los coeficientes de transferencia de calor de los fluidos y del material usado como barrera (tubería) [41].

La transferencia de calor a través del sólido depende del espesor de la tubería (s), ya que a mayor espesor, menor es el flujo calórico, y viceversa. Es por esto que el modelo lineal de fluidos indica que la pared de la tubería que separa los fluidos es una resistencia al flujo calórico. Además, existen dos resistencias más en los fluidos, las cuales se encuentran concentradas en películas adyacentes a la pared de la tubería. En el fluido que se encuentra en el interior de la tubería (fluido a ser enfriado o calentado), se forma una película “interna” que se asienta en la superficie interna de la tubería; al mismo tiempo se forma una película “externa” del fluido que recibe o da calor, la cual pasa por el exterior de la tubería y se asienta en su superficie externa. Es por esto que, la resistencia que tiene que pasar el flujo calórico es la suma de todas las resistencias, tanto en los fluidos interno y externo, como en la pared de la tubería [41].

Para calcular el coeficiente U , se debe considerar la película del interior de la pared, la del exterior y el espesor de la pared de la tubería. Luego, se utiliza la siguiente fórmula [41]:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} \quad 3.5$$

donde, h_o es el coeficiente de transferencia de calor del fluido que da o recibe calor (fluido exterior) [W/K·m²]

h_i es el coeficiente de transferencia de calor del fluido a ser enfriado o calentado (fluido interior) [W/K·m²]

s es el espesor de la tubería [m]

λ es el coeficiente de conductividad térmica de la tubería [W/K·m]

Ambos coeficientes de las películas dependen del número de Reynolds (Re), para el caso de convección natural y para flujo dentro de un cilindro, por lo que se considera el diámetro interior de la tubería a ser usada. Este número se determina con la siguiente fórmula [41]:

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad 3.6$$

donde, Re es el número de Reynolds [-]

D es el diámetro interior de la tubería [m]

ρ es la densidad del fluido [kg/m³]

v es la velocidad del fluido [m/s]

μ es la viscosidad del fluido [Pa*s]

La ecuación para determinar el coeficiente de transferencia de calor exterior, h_o , está dada por la ecuación 3.7 [41]:

$$h_o = 1.51 \left(\frac{k_o^3 \cdot \rho_o^2 \cdot g}{\mu_o^2} \right)^{\frac{1}{3}} Re_o^{-\frac{1}{3}} \quad 3.7$$

donde, k_o es la conductividad térmica del fluido exterior [W/K·m]

ρ_o es la densidad del fluido exterior [kg/m³]

g es la aceleración de la gravedad [m/s²]

μ_o es la viscosidad del fluido exterior [Pa*s]

Re_o es el número de Reynolds del fluido exterior [41]

Por otro lado, la ecuación para determinar el coeficiente de transferencia de calor interior, h_i , es [41]:

$$h_i = \frac{Nu \cdot k_i}{D} \quad 3.8$$

donde, Nu es el número de Nusselt [-]

k_i es la conductividad térmica del fluido interior [W/K·m]

El número Nu depende del número Re y del número de Prandtl (Pr) de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Nu = 0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \quad 3.9$$

y

$$Pr = \frac{C_{pi} \cdot \mu_i}{k_i} \quad 3.10$$

donde, Pr es el número de Prandtl [-]

C_{pi} es la capacidad calórica del fluido interior [J/kg·K]

μ_i es la viscosidad del fluido interior [Pa·s]

Además, Q de la ecuación 3.3 se calcula conociendo el flujo másico (m_i) del fluido interior y utilizando la siguiente fórmula ^[41]:

$$Q = \dot{m}_i \cdot C_{pi} \cdot \Delta T_i \quad 3.11$$

donde, \dot{m}_i es el flujo másico del fluido interior [kg/s]

C_{pi} es la capacidad calórica del fluido interior [J/kg·K]

ΔT_i es el cambio de temperatura en el fluido interior [K]

De esta forma, se puede calcular A despejando la ecuación 3.3, es decir ^[41]:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ML}} \quad 3.12$$

Debido a que generalmente se utilizan tubos para el intercambio de calor, se puede determinar la longitud de éstos mediante geometría por la siguiente ecuación ^[41]:

$$A = \pi \cdot D \cdot h$$

$$h = \frac{A}{\pi \cdot D} \quad 3.13$$

donde, h es la longitud del tubo [m]

Después de calcular el área superficial de la pared donde se transfiere el calor, se selecciona el tipo de intercambiador que se va a construir y los materiales que se van a utilizar para construirlo [41].

- *Cálculos*

Primero, se consideran las temperaturas de entrada y salida del biogás y del fluido que ganará calor (agua). Para determinar la temperatura del biogás después de la compresión se parte de la siguiente ecuación [42]:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad 3.14$$

donde, T_2 es la temperatura del biogás después de ser comprimido [K]

T_1 es la temperatura del biogás antes de ser comprimido [K]

P_2 es la presión del biogás después de ser comprimido [bar]

P_1 es la presión del biogás antes de ser comprimido [bar]

n es una constante igual a 1.2 [-]

Entonces se tiene:

Tabla 3.4: Presión y temperatura del biogás después de la compresión

Parámetro	Símbolo		Unidades
Temperatura del biogás antes de ser comprimido	T_1	20	°C
		293	K
Presión del biogás antes de ser comprimido	P_1	1.013	bar
Presión del biogás después de ser comprimido	P_2	8	bar
Temperatura del biogás después de ser comprimido	T_2	140	°C
		413	K

Para determinar la viscosidad y la conductividad del agua a la temperatura de entrada respectiva se hace una regresión de datos experimentales de la viscosidad y la

conductividad en función de la temperatura. Se grafican estos datos en función de la temperatura y se determina la ecuación que relaciona la viscosidad del agua con la temperatura y la conductividad del agua con la temperatura en el rango de 20 a 30 °C. A continuación en las figuras 3.25 y 3.26 se presentan: la relación entre la viscosidad del agua con la temperatura, y la relación entre la conductividad del agua con la temperatura, respectivamente.

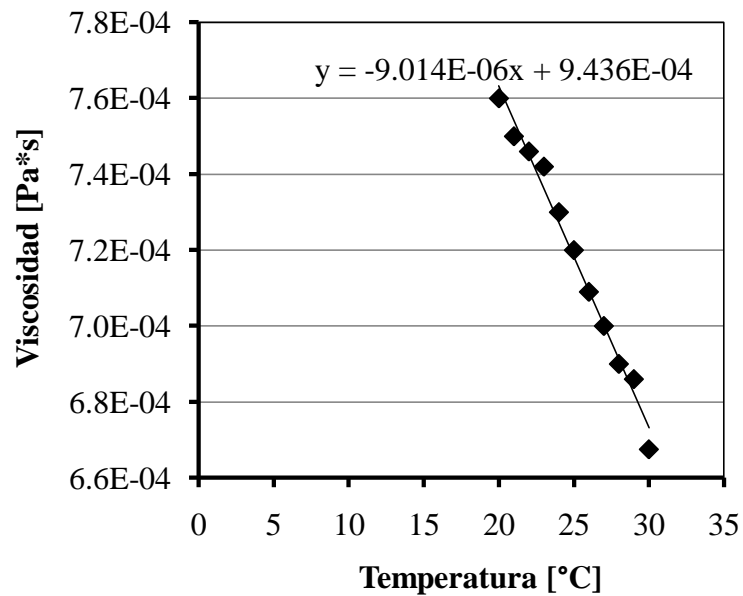


Figura 3.25: Viscosidad del agua

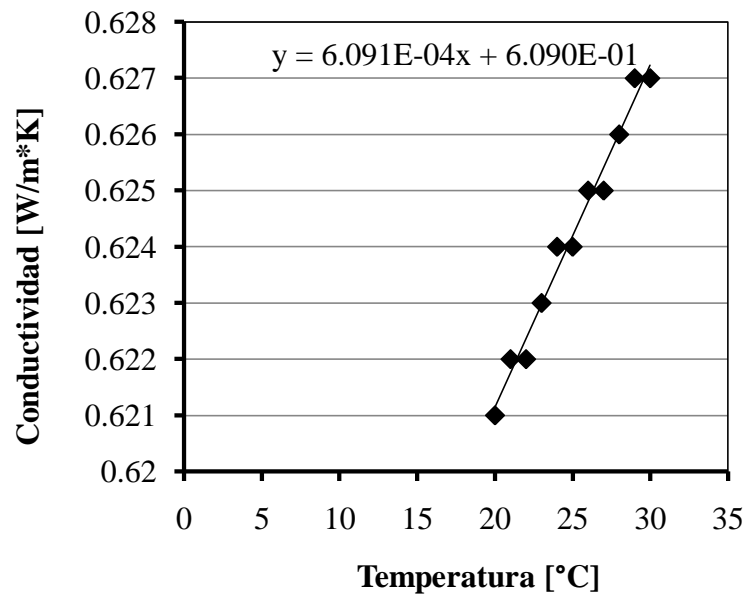


Figura 3.26: Conductividad del agua

En las tablas que se presentan a continuación se observan los resultados obtenidos del diseño del primer intercambiador de calor, en el cual se disminuye la temperatura del biogás antes de ser comprimido y se condensan las trazas de vapor de agua existente.

Tabla 3.5: Cálculo de h_o (intercambiador antes de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Diámetro interior de la tubería	D	0.00635	m
Temperatura a la que ingresa el agua	T_{IC}	16	°C
Viscosidad del agua	μ_o	0.0008	Pa*s
Conductividad térmica del agua	k_o	0.619	W/m*K
Densidad del agua	ρ_o	1000	kg/m ³
Velocidad del agua	v_o	0.164	m/s
Capacidad calórica del agua	Cp_o	4187	J/kg*K
Aceleración de la gravedad	g	9.8	m/s ²
Número de Reynolds del agua	Re_o	1306	-
Coefficiente de transferencia de calor del agua	h_o	2123	W/K*m²
Flujo másico del agua	\dot{m}_o	0.083	kg/s
Flujo volumétrico del agua	\dot{V}_o	5	L/min

Tabla 3.6: Cálculo de h_i (intercambiador antes de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Diámetro interior de la tubería	D	0.00635	m
		1/4	pulg
Temperatura a la que ingresa el biogás	T_{1H}	35	°C
Viscosidad del biogás	μ_i	0.000013	Pa*s
Conductividad térmica del biogás	k_i	0.03	W/m*K
Densidad del biogás	ρ_i	1.2	kg/m ³
Velocidad del biogás	v_i	4	m/s
Capacidad calórica del biogás	Cp_i	1391.3	J/kg*K
Número de Reynolds del biogás	Re_i	2350	-
Número de Prandtl del biogás	Pr	0.602	-
Número de Nusselt del biogás	Nu	9.8	-
Coefficiente de transferencia de calor del biogás	h_i	46.4	W/K*m²

Tabla 3.7: Cálculo de U (intercambiador antes de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Coefficiente de transferencia de calor del agua	h_o	2123	W/K*m ²
Coefficiente de transferencia de calor del biogás	h_i	46.4	W/K*m ²
Coefficiente de conductividad térmica de la tubería (aluminio)	λ	229	W/m*K
Espesor de la pared de la tubería para intercambio de calor	s	0.0018	m
Coefficiente global de transferencia de calor del sistema	U	45.4	W/K*m²

Tabla 3.8: Cálculo de ΔT_{ML} (intercambiador antes de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Temperatura a la que sale el biogás	T_{2H}	20	°C
Temperatura a la que ingresa el biogás	T_{1H}	35	°C
Temperatura a la que sale el agua	T_{2C}	20	°C
Temperatura a la que ingresa el agua	T_{1C}	16	°C
Diferencia de temperatura media logarítmica	ΔT_{ML}	-8.3	°C

Tabla 3.9: Cálculo de Q (intercambiador antes de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Flujo másico del biogás	\dot{m}_i	0.001	kg/s
Flujo volumétrico del biogás	\dot{V}_i	50	L/min
Capacidad calórica del biogás	C_{p_i}	1391	J/kg*K
Temperatura a la que sale el biogás	T_{2H}	20	°C
Temperatura a la que ingresa el biogás	T_{1H}	35	°C
Flujo calórico en el biogás	Q	-20.9	J/s

Tabla 3.10: Cálculo de A y h (intercambiador antes de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Flujo calórico en el biogás	Q	-20.9	J/s
Coefficiente global de transferencia de calor del sistema	U	45.4	W/K*m ²
Diferencia de temperatura media logarítmica	ΔT_{ML}	-8.3	°C
Área superficial de la pared donde se transfiere el calor	A	0.0552	m²
Longitud del tubo	h	2.77	m
Diámetro interior de la tubería	D	1/4	pulg

En la Tabla 3.10 se observa que el área de transferencia necesaria para enfriar el biogás desde 35 °C hasta 20 °C es de 0.0552 m² usando tubería de aluminio de 1/4 " de diámetro interior y 2.77 m de longitud.

En las tablas que se presentan a continuación se observan los resultados obtenidos del diseño del segundo intercambiador de calor, el cual disminuye la temperatura del biogás después de ser comprimido.

Tabla 3.11: Cálculo de h_o (intercambiador después de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Diámetro interior de la tubería	D	0.00635	M
Temperatura a la que ingresa el agua	T_{1C}	16	°C
Viscosidad del agua	μ_o	0.0008	Pa*s
Conductividad térmica del agua	k_o	0.619	W/m*K
Densidad del agua	ρ_o	1000	kg/m ³
Velocidad del agua	v_o	0.164	m/s
Capacidad calórica del agua	Cp_o	4187	J/kg*K
Aceleración de la gravedad	g	9.8	m/s ²
Número de Reynolds del agua	Re_o	1306	-
Coefficiente de transferencia de calor del agua	h_o	2123	W/K*m²
Flujo másico del agua	\dot{m}_o	0.083	kg/s
Flujo volumétrico del agua	\dot{V}_o	5	L/min

Tabla 3.12: Cálculo de h_i (intercambiador después de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Diámetro interior de la tubería	D	0.00635	m
Temperatura a la que ingresa el biogás	T_{1H}	140	°C
Viscosidad del biogás	μ_i	0.000013	Pa*s
Conductividad térmica del biogás	k_i	0.03	W/m*K
Densidad del biogás	ρ_i	1.2	kg/m ³
Velocidad del biogás	v_i	10	m/s
Capacidad calórica del biogás	Cp_i	1391.3	J/kg*K
Número de Reynolds del biogás	Re_i	5875	-
Número de Prandtl del biogás	Pr	0.602	-
Número de Nusselt del biogás	Nu	20.5	-
Coefficiente de transferencia de calor del biogás	h_i	96.6	W/K*m²

Tabla 3.13: Cálculo de U (intercambiador después de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Coeficiente de transferencia de calor del agua	h_o	2123	W/K*m ²
Coeficiente de transferencia de calor del biogás	h_i	96.6	W/K*m ²
Coeficiente de conductividad térmica de la tubería (hierro)	λ	68	W/m*K
Espesor de la pared de la tubería para intercambio de calor	s	0.0018	m
Coeficiente global de transferencia de calor del sistema	U	92.2	W/K*m²

Tabla 3.14: Cálculo de ΔT_{ML} (intercambiador después de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Temperatura a la que sale el biogás	T_{2H}	100	°C
Temperatura a la que ingresa el biogás	T_{1H}	140	°C
Temperatura a la que sale el agua	T_{2C}	28	°C
Temperatura a la que ingresa el agua	T_{1C}	16	°C
Diferencia de temperatura media logarítmica	ΔT_{ML}	-23.3	°C

Tabla 3.15: Cálculo de Q (intercambiador después de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Flujo másico del biogás	\dot{m}_i	0.002	kg/s
Flujo volumétrico del biogás	\dot{V}_i	100	L/min
Capacidad calórica del biogás	Cp_i	1391	J/kg*K
Temperatura a la que sale el biogás	T_{2H}	100	°C
Temperatura a la que ingresa el biogás	T_{1H}	140	°C
Flujo calórico en el biogás	Q	-111.3	J/s

Tabla 3.16: Cálculo de A y h (intercambiador después de la compresión)

Parámetro	Símbolo		Unidades
Flujo calórico en el biogás	Q	-111.3	J/s
Coefficiente global de transferencia de calor del sistema	U	92.2	W/K*m ²
Diferencia de temperatura media logarítmica	ΔT_{ML}	-23.3	°C
Área superficial de la pared donde se transfiere el calor	A	0.0519	m²
Longitud del tubo	h	2.6	m
Diámetro interior de la tubería	D	1/4	pulg

En la Tabla 3.16 se observa que el área de transferencia necesaria para enfriar el biogás desde 140 °C hasta 100 °C es de 0.0519 m² usando tubería de hierro galvanizado de 1/4 " de diámetro interior y 2.6 m de longitud.

- *Construcción de los intercambiadores de calor*

Se tienen dos intercambiadores de calor. Uno de ellos, construido con tubería de aluminio, es usado para enfriar el biogás almacenado en el gasómetro antes de ser comprimido. De esta forma, se disminuye y se condensa el vapor de agua del gas permitiendo una mejor compresión del biogás. El segundo intercambiador de calor, construido con tubería de hierro galvanizado, es usado para enfriar el biogás comprimido y de igual forma para eliminar residuos de vapor de agua contenido en el mismo. Ambos intercambiadores son del tipo carcasa y tubos como se muestra en la Figura 3.27.

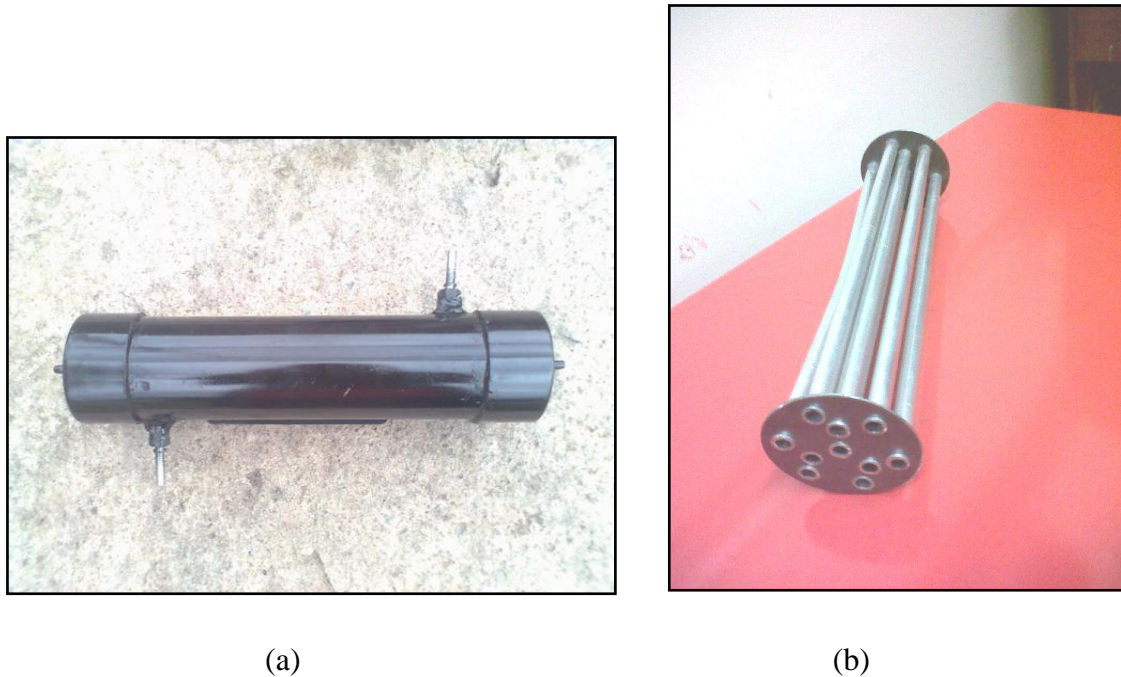


Figura 3.27: Intercambiador de calor. (a) vista exterior, (b) vista interior

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos son muy efectivos ya que el biogás pasa por los tubos del intercambiador y el agua que fluye por la parte externa de los tubos tiene turbulencia, lo que ayuda al intercambio de calor. Estos intercambiadores de calor tienen alta efectividad en el intercambio de calor. Además, se escoge este tipo de intercambiadores de calor porque la disposición de los tubos ahorra espacio y el biogás no pierde mucha presión al fluir por ellos. Por último, este tipo de intercambiadores de calor son de fácil construcción [41].

La carcasa de ambos intercambiadores es de hierro galvanizado y tiene un diámetro de 3". El intercambiador que enfría el biogás sin comprimir tiene los tubos de aluminio de 1/4" de diámetro interior. Por otra parte, el intercambiador que enfría el biogás comprimido tiene los tubos de hierro galvanizado de 1/4" de diámetro interior. Dentro de cada carcasa se encuentran 10 tubos por donde circula el biogás. La carcasa y cada tubo tienen una longitud de 30 cm, dando un área de transferencia de calor de 0.0598 m^2 . La carcasa posee una tapa de PVC en cada uno de sus extremos. En cada tapa se encuentra un pitón para permitir el flujo de biogás. Y además, en la carcasa se encuentran dos pitones para permitir la entrada y la salida de agua.

Inicialmente, se construyeron ambos intercambiadores con tubos de aluminio. Pero, debido a que uno de ellos poseía fugas, se lo reemplazó con uno nuevo de tubos de hierro galvanizado para poder soldar los tubos a la carcasa y de esta forma garantizar hermeticidad. Además, ambos intercambiadores de calor se construyeron con un área de transferencia de calor de 0.0598 m^2 , ligeramente mayor al área requerida en los cálculos con el objetivo de asegurar la eficiencia de la transferencia de calor.

Para el flujo de agua a través de los intercambiadores de calor se utiliza una bomba de 0.5 HP, la cual extrae el agua de un tanque reservorio de 200 L.

3.2.6 *Diseño del separador tipo sifón*

- *Características del separador tipo sifón*

Este separador tiene la función de recolectar el condensado del vapor de agua del biogás antes de ser comprimido. Como se observa en la Figura 3.28, el biogás fluye por la parte superior del equipo y se puede medir el nivel de agua que se encuentra acumulado. Este equipo debe ser hermético y poseer una abertura con tapón en la parte superior para introducir agua.

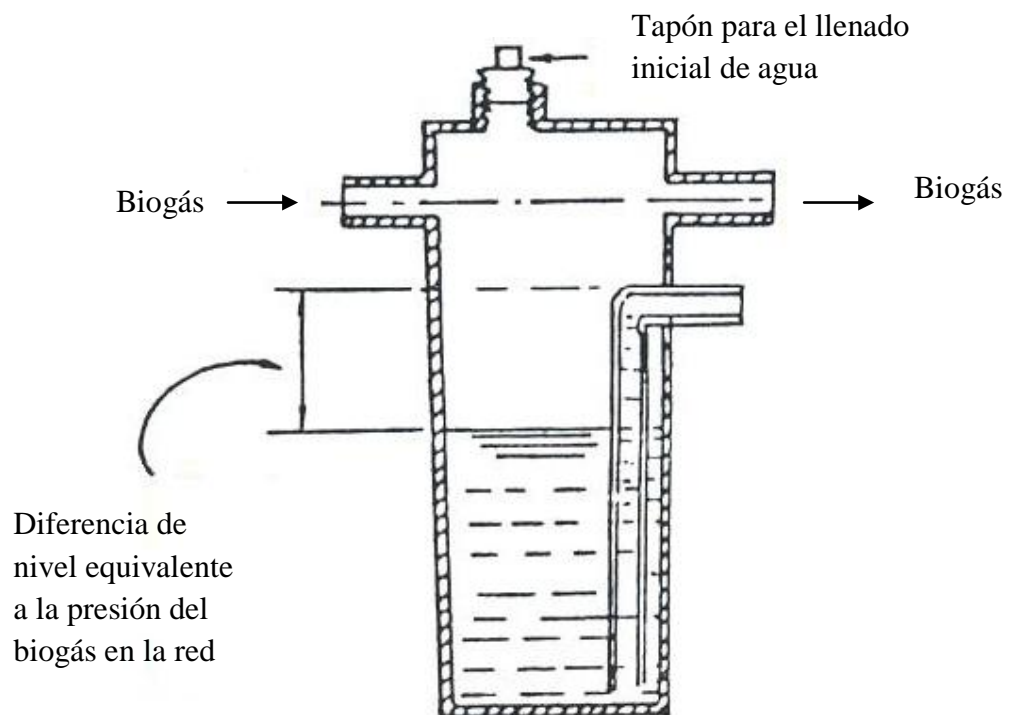


Figura 3.28: Esquema del separador tipo sifón [32]

- *Dimensionamiento del separador tipo sifón*

El separador tipo sifón está constituido por un cilindro de PVC de 50 cm de longitud y 15 cm de diámetro. En su interior el separador contiene una manguera de vinil con salida a un acople que se encuentra por debajo de los acoples que se conectan con la tubería del sistema de utilización energética del biogás. Cuando el separador se llena de vapor de agua condensado, éste fluye y se descarga automáticamente por la manguera de vinil. El cilindro de PVC del separador se encuentra sellado por una tapa en cada uno de sus extremos. El biogás atraviesa el separador en forma horizontal por acoples que se encuentran en la parte superior.

- *Construcción del separador tipo sifón*

En la Figura 3.29 se muestra una foto del separador tipo sifón construido.



Figura 3.29: Separador tipo sifón

Como se observa en la Figura 3.29, el biogás fluye por acoples ubicados en la parte superior del equipo y además se tiene un medidor de nivel a un costado del equipo. Este medidor indica el nivel de vapor de agua condensado que se encuentra adentro. Además, este equipo posee una abertura con tapón en la parte superior para introducir agua, y una en la parte inferior para desalojar el agua.

3.2.7 Tanque de almacenamiento de gas a presión

El tanque de almacenamiento (Figura 3.30) tiene una capacidad de 25 L y es parte del compresor de aire marca TRUPER de modelo COMP-25L con 2 HP de potencia nominal (Figura 3.23). Como medida de seguridad este tanque tiene incorporado un interruptor de presión que hace que el motor del compresor se apague cuando la presión interior alcanza una presión mayor a 8 bar. Luego, el controlador automático del sistema de utilización energética de biogás hace que el gas en exceso que ya no se puede comprimir se libere por medio de una llama piloto instalada en el sistema. Por otra parte, el biogás comprimido puede usarse para el funcionamiento del generador eléctrico o del calefón. Cuando la presión interior del tanque baja a un nivel menor a 5.5 bar, se puede comprimir nuevamente el biogás.



Figura 3.30: Tanque de almacenamiento de gas a presión

3.2.8 Generador eléctrico

- Características del generador

El generador empleado en la utilización eléctrica del biogás (Figura 3.31) es una generosa donación de Nicolás Soria. Es de marca BRIGGS & STRATTON modelo 09717-2, serie SV4200, con voltaje de 120/240 V y 4200 watts. Este equipo fue modificado adecuadamente para que pueda funcionar con gasolina y con biogás.



Figura 3.31: Generador

Con respecto al consumo del generador, este equipo consume alrededor de 1 galón de gasolina o 14 kg de GLP para prender un foco de 100 W durante 3 horas.

- Funcionamiento del generador

El motor del generador funciona con una mezcla de aire/combustible. El combustible utilizado puede ser gasolina o biogás. Para obtener la mezcla se combina el aire con el vapor del combustible o con el biogás. La relación ideal o estequiométrica aire/combustible en peso es de 14.7:1. Si la relación disminuye, significa que existe demasiado combustible para la cantidad de aire en la mezcla, y consecuentemente no se quema todo el combustible.

El generador posee un carburador que utiliza una bomba de alimentación para hacer que el combustible ingrese al motor. La bomba de alimentación utiliza el vacío como medio de succión del combustible desde el tanque en donde se encuentra el combustible hasta el carburador. Por otra parte, los pistones del motor del generador crean un vacío, lo cual hace que el combustible pase desde el carburador hacia el interior del motor. La cantidad de combustible que ingresa al motor es controlada mediante el flujo de aire que pasa a través del carburador y que arrastra consigo al combustible.

Para la utilización energética del biogás mediante el generador es necesario modificar al generador para realizar la conversión de combustibles. Se debe cambiar el ingreso de la gasolina al motor por el ingreso del biogás para su funcionamiento. Para esto, se arranca inicialmente el generador con gasolina permitiendo que se eleve la temperatura en el motor de combustión interna. Luego de esto se realiza el cambio de combustibles cerrando manualmente la válvula por donde ingresa la gasolina y abriendo la válvula por donde ingresa el biogás.

- *Adaptaciones realizadas al generador*

Para el funcionamiento del generador con biogás es necesario realizar las siguientes adaptaciones, las cuales fueron hechas por el Ing. Jorge Ron del Taller Automotriz Ron:

- adaptar el interior del carburador para permitir la conversión de combustibles. Para esto se modificó el venturi del carburador, el cual es un difusor de la mezcla aire/combustible
- modificar el tubo de escape para la salida de los gases de salida
- usar una válvula reguladora de presión para reducir la presión del biogás comprimido a la presión requerida por el generador

A continuación en la Figura 3.32 se presentan fotos de una de las modificaciones realizadas al generador eléctrico.

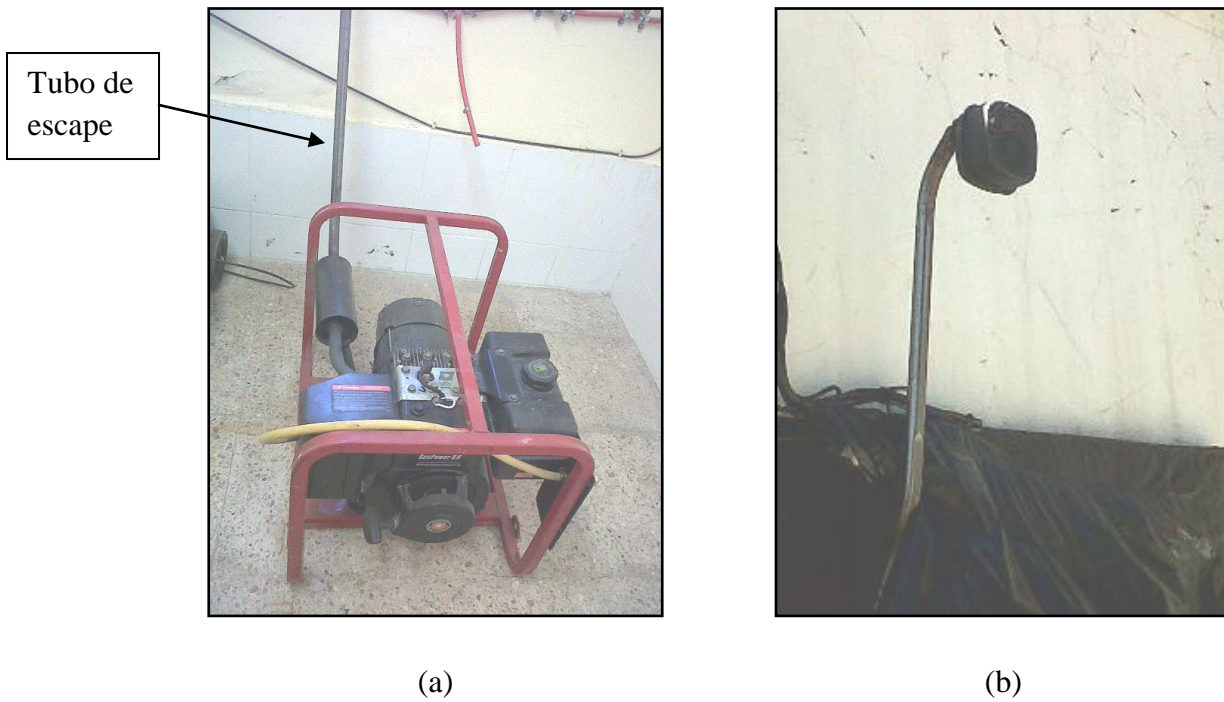


Figura 3.32: Modificación del tubo de escape del generador eléctrico. (a) alargue del tubo de escape, (b) salida del tubo de escape en el exterior del LaDEA

3.2.9 Calefón

El calefón empleado para la utilización térmica del biogás es de marca BOSCH, modelo GWH13 B31. A continuación en la Figura 3.33 se muestra una foto del calefón.



Figura 3.33: Calefón

A continuación, en la Tabla 3.17 se muestran las especificaciones técnicas del calefón.

Tabla 3.17: Especificaciones técnicas del calefón

Consumo calorífico nominal (kW)	29
Rango de presión de agua (bar)	0.3 – 10
Rango de presión de gas natural (mbar)	18 – 20
Rango de presión de GLP (mbar)	28 – 30
Conexiones de agua (pulg)	½
Conexión de gas (pulg)	½
Sistema de encendido	Automático

La entrada de gas del calefón se conecta a la tubería del sistema de utilización energética de biogás después del tanque de almacenamiento de biogás comprimido. Antes de la entrada de biogás al calefón, se coloca una válvula reguladora de presión para reducir la presión del biogás comprimido a la presión requerida por el calefón. La entrada de agua del calefón se conecta con la tubería del agua potable que se suministra al LaDEA. Y la salida de agua caliente del calefón se conecta a la llave de uno de los lavabos del LaDEA.

3.2.10 Accesorios

Los accesorios son necesarios para modificar, bloquear o permitir el flujo del biogás a través de las tuberías y equipos. Para la construcción del sistema de utilización energética de biogás se ocupan los accesorios descritos a continuación.

- Arrestallama

Los arrestallamas son dispositivos de protección de instalaciones potencialmente explosivas expuestas a los efectos de las explosiones de mezclas peligrosas de gases. Mediante el uso de bandas de acero enrolladas, un arrestallama es capaz de detener, con una pérdida mínima de presión, los procesos de combustión de carácter detonante en tuberías [43]. A continuación en la Figura 3.34 se presenta el esquema de un arrestallama.

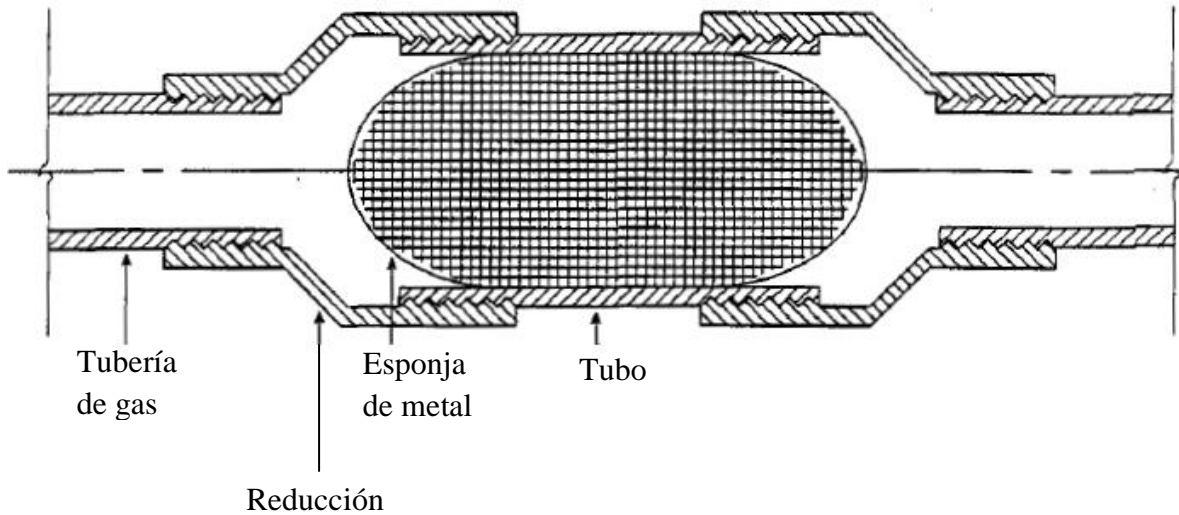


Figura 3.34: Esquema de un arrestallamas [32]

El arrestallama se construye a partir de un tubo de hierro galvanizado, de 4 pulgadas de longitud y 1/2 pulgada de diámetro, en su interior contiene esponjas de acero inoxidable, y en los extremos se encuentran pitones para facilitar las conexiones a la manguera por donde fluye el biogás (Figura 3.35). Las esponjas de acero inoxidable permiten el flujo del biogás, pero impiden el paso de cualquier llama que se produzca en la línea de biogás.



Figura 3.35: Arrestallama

- *Llama piloto*

El biogás comprimido que esté en exceso en el tanque de almacenamiento a presión es liberado a través de un acople de llama piloto. El flujo de salida del gas por el acople es regulado mediante un tornillo que éste posee. El gas que se libera a través del acople puede ser quemado. A continuación en la Figura 3.36 se presenta una foto de este accesorio.



Figura 3.36: Acople de llama piloto [⁴⁴]

- *Válvula de bola para gas de acero inoxidable*

Esta válvula se utiliza para permitir o bloquear el flujo de biogás. Tiene la función de abierto/cerrado, es decir, no es regulable. Las válvulas de bola tienen fuerzas de accionamiento bajas, así como también pérdidas de presión bajas. La dirección del fluido en la válvula es variable. En el sistema de utilización energética de biogás, se encuentran instaladas válvulas de bola antes y después de todos los equipos para poder dar mantenimiento a los mismos sin tener que desactivar todo el sistema. Se escogieron válvulas de acero inoxidable, debido a que resisten la corrosión que se podría dar, ya que el biogás contiene trazas de ácido sulfhídrico. A continuación en la Figura 3.37 se presenta una foto de este accesorio.



Figura 3.37: Válvula de bola de acero inoxidable

- *Válvula check para gas*

Esta válvula permite que el biogás fluya en una sola dirección. De esta forma se asegura que el gas siga por el sistema de compresión instalado y no regrese al digester. Con respecto a su funcionamiento, el check de la válvula se mantiene normalmente cerrado por medio de un resorte. Cuando el flujo de gas atraviesa la válvula, la presión del gas vence a la fuerza del resorte para abrir el check. Y cuando el flujo de gas regresa o para, el check se cierra nuevamente. En caso de que exista una ruptura de las tuberías o de otros accesorios, las válvulas check restringen el escape del gas [45]. A continuación en la Figura 3.38 se presenta el dibujo de un corte interior de la válvula check.

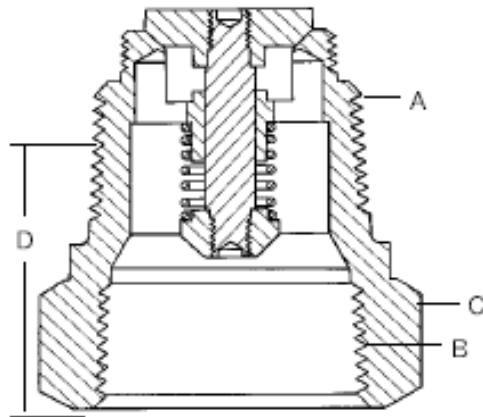


Figura 3.38: Corte interior de la válvula check. A-conexión de entrada, B-conexión de salida, C-hexágono para llave, D-longitud efectiva [45]

En la siguiente tabla se muestran las características de las válvulas check utilizadas.

Tabla 3.18: Características de la válvula check [45]

Material	A (pulg)	B (pulg)	C (pulg)	D (pulg)
Bronce	3/4	3/4	1 3/8	1 15/16

A continuación en la Figura 3.39 se presenta una foto de la válvula check.



Figura 3.39: Válvula check [45]

- *Válvulas electromecánicas de acero inoxidable*

Las válvulas electromecánicas se utilizan junto con el sistema de control automático para permitir o bloquear el flujo de biogás en ciertos trayectos del sistema de utilización energética de biogás. Se encuentran normalmente cerradas. Para explicar el funcionamiento de este tipo de válvulas se muestra la Figura 3.40:

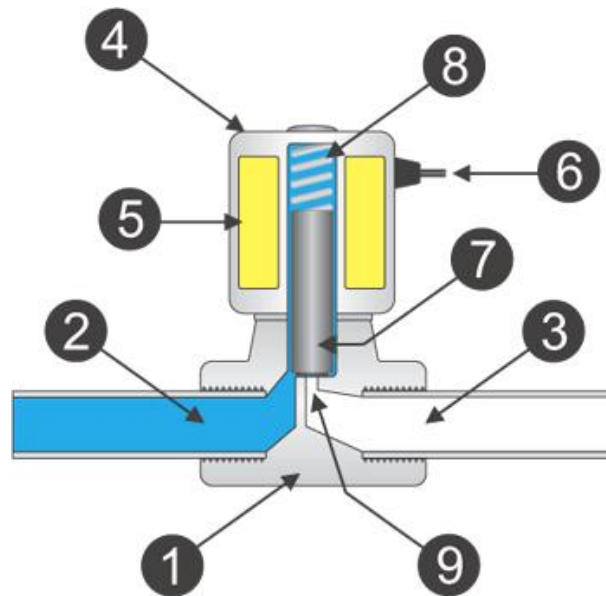


Figura 3.40: Esquema de una válvula electromecánica normalmente cerrada [⁴⁶]

donde, 1-cuerpo de la válvula

6-cable conductor

2-conexión de entrada

7-émbolo

3-conexión de salida

8-resorte

4-bobina/solenoides

9-orificio [⁴⁶]

5-embobinado

El flujo de gas es controlado por el solenoide (4): el gas ingresa a la válvula por la conexión de entrada (2), luego debe atravesar por el orificio (9) y continuar por la conexión de salida (3). El orificio (9) es abierto o cerrado por el émbolo (7), el cual es levantado o

presionado por el resorte (8) que se acciona por un campo electromagnético creado por el solenoide (4) [46].

A continuación en la Figura 3.41 se presenta una foto de la válvula electromecánica.

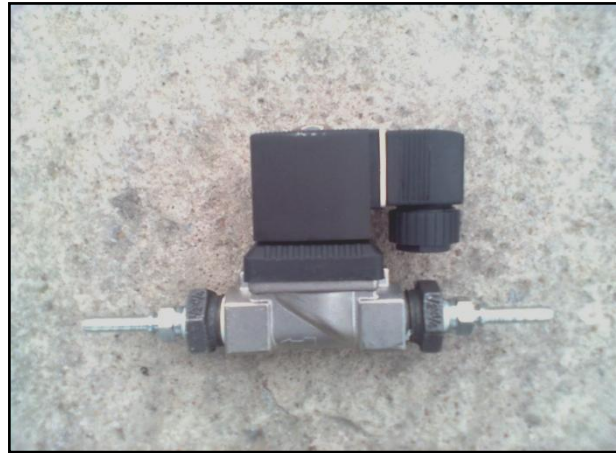


Figura 3.41: Válvula electromecánica

- *Válvula de seguridad*

La válvula de seguridad se instala como medida de seguridad. Si es que la presión que se tiene en el sistema de compresión de biogás es demasiado alta, esta válvula libera el exceso de gas para disminuir la presión. El valor de la presión máxima calibrada en la válvula se conoce con el nombre de presión de “comienzo-a-descarga”. Si en el sistema se alcanza la presión de “comienzo-a-descarga”, el sello de la válvula se abrirá levemente. Pero, si la presión continúa subiendo después de la descarga inicial de la válvula, el sello de la misma se moverá a una posición completamente abierta. Conforme disminuye la presión, la válvula se va cerrando, hasta que el sello regresa nuevamente a la posición original cuando la presión disminuye lo suficiente [47]. A continuación en la Figura 3.42 se presenta el dibujo de un corte interior de la válvula de seguridad.

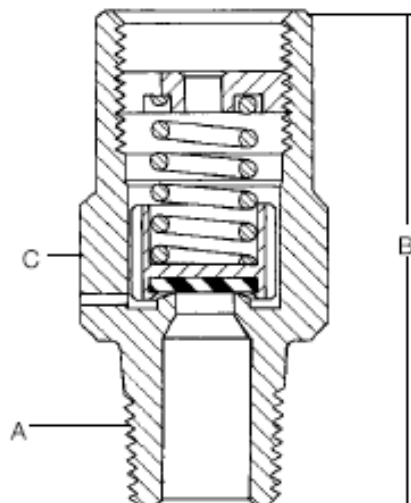


Figura 3.42: Corte interior de la válvula de seguridad. A-conexión, B-altura, C-hexágono para llave [45]

En la siguiente tabla se muestran las características de las válvulas de seguridad utilizadas.

Tabla 3.19: Características de la válvula de seguridad [45]

Material	A (pulg)	B (pulg)	C (pulg)
Bronce	1/2	2 19/32	1 1/8

A continuación en la Figura 3.43 se presenta una foto de la válvula de seguridad.



Figura 3.43: Válvula de seguridad [45]

3.2.11 Instrumentación

Para la construcción del sistema de utilización energética de biogás se ocupa el sistema de control descrito a continuación y presentado en la Figura 3.44.



Figura 3.44: Sistema eléctrico de control automático

- *Control del volumen de biogás acumulado en el gasómetro*

El volumen de biogás acumulado a presión atmosférica en el gasómetro se controla mediante el desplazamiento de agua en el tubo de PVC del gasómetro (Figura 3.17). Si el nivel de agua se encuentra en el mínimo significa que no hay biogás acumulado, mientras que cuando el nivel está al máximo significa que se ha acumulado la máxima cantidad de biogás. A continuación, en la Tabla 3.20 se presenta la lógica del controlador de nivel de agua en el tubo de PVC, donde “0” significa que el sensor no está rodeado por agua y por lo tanto no hay señal, y “1” significa que el sensor está rodeado por agua y por lo tanto si hay señal.

Tabla 3.20: Lógica del controlador de nivel de agua en el tubo de PVC

Nivel de agua	Sensor blanco	Sensor mínimo	Sensor máximo	Operación
Mínimo	1	0	0	Apagar compresor
Medio	1	1	0	Llenado gasómetro: apagar compresor
				Vaciado gasómetro: encender compresor
Máximo	1	1	1	Encender compresor
Mínimo – Mínimo	0	0	0	Aumentar agua

Es importante mencionar que cuando se tiene el nivel de agua Mínimo – Mínimo como se indica en la Tabla 3.20, se debe verificar el estado del gasómetro ya que este nivel indica una posible escasez de agua en los tanques del equipo.

La lógica del sistema de control para la compresión del biogás, basándose en el Anexo 2, se presenta a continuación en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21: Lógica del sistema de control automático

	Electroválvula alimentación gasómetro	Electroválvula salida gasómetro	Electroválvula alimentación tanque presurizado	Electroválvula salida llama piloto	Compresor
Nomenclatura	VEG-01	VEG-02	VEGP-01	VEGP-02	E-1
Condiciones iniciales	cerrado	cerrado	cerrado	cerrado	apagado
Acumulación del biogás en el gasómetro	abierto	cerrado	cerrado	cerrado	apagado
Inicio de la compresión del biogás	cerrado	abierto	abierto	cerrado	se prende
Terminación de la compresión del biogás	abierto	cerrado	cerrado	cerrado	apagado

Inicialmente, todas las válvulas electromecánicas y el motor del compresor se encuentran apagados. Para dar paso a la acumulación de biogás en el gasómetro, se enciende el tablero del controlador y de esta forma la válvula VEG-01 se abre automáticamente. Cuando el controlador de nivel detecta el máximo en el gasómetro, la compresión inicia. De forma automática, se cierra la válvula VEG-01, se abre la válvula VEG-02, se abre la válvula VEGP-01 y se enciende el motor del compresor. Una vez que el controlador de nivel detecta nuevamente el mínimo en el gasómetro, la compresión termina, y automáticamente se abre la válvula VEG-01, se cierra la válvula VEG-02, se cierra la válvula VEGP-01 y se apaga el motor del compresor.

- *Control de la presión en el tanque presurizado*

Cuando la presión interior del tanque de almacenamiento (Figura 3.30) alcanza una presión mayor a 8 bar, el controlador automático actúa junto con el interruptor de presión y se tiene:

Tabla 3.22: Efectos de la acción del controlador automático del tanque presurizado

	Electroválvula alimentación gasómetro	Electroválvula salida gasómetro	Electroválvula alimentación tanque presurizado	Electroválvula salida llama piloto	Compresor
Nomenclatura	VEG-01	VEG-02	VEGP-01	VEGP-02	E-1
Presión < 8 bar (durante la compresión)	cerrado	abierto	abierto	cerrado	prendido
Presión ≥ 8 bar	cerrado	abierto	se cierra	se abre	se apaga

Es importante tener en cuenta lo siguiente: si es que la presión del tanque de almacenamiento es mayor que 8 bar y si el controlador de nivel detecta el máximo en el gasómetro, la señal del interruptor de presión tiene prioridad sobre la señal del controlador de nivel. Es decir, en este caso a pesar de que el gasómetro esté lleno con biogás al máximo de su capacidad, no se iniciará la compresión como medida de seguridad para que el tanque de almacenamiento no supere los 8 bar de presión que puede soportar. Por el contrario, el biogás del gasómetro será liberado a través de la llama piloto, y se podrá continuar comprimiendo más biogás sólo si la presión del tanque de almacenamiento es menor a 5.5 bar.

3.2.12 Diagrama de flujo

El proceso de recolección del biogás empieza con la producción de biogás por medio de la planta piloto del LaDEA. El biogás sale del digestor a 35 °C y es purificado mediante filtros de esponjas de hierro y de carbón activado para reducir su contenido de H₂S, vapor de agua y olores. A continuación, el biogás es cuantificado mediante un contador de gas y posteriormente se acumula a presión atmosférica en un gasómetro de PVC. En este gasómetro se puede almacenar aproximadamente 200 L de biogás. Cuando se llena el gasómetro, un sistema de control automático inicia la compresión del biogás.

Para facilitar la compresión del biogás, este gas es tratado antes de ingresar al motor del compresor. Antes de ser comprimido, el biogás se enfría a aproximadamente

20 °C mediante un condensador y luego el vapor de agua condensado se elimina mediante un desagüe tipo sifón. Por otra parte, como medida de seguridad, se tiene una tubería de compensación de presión para el motor del compresor. Esta tubería permite aliviar cualquier sobrepresión que se tenga en el trayecto desde el motor del compresor hasta el tanque de almacenamiento.

La temperatura del biogás aumenta al ser comprimido a aproximadamente 140 °C. Es por esto que después de que el gas es comprimido por el motor del compresor, el biogás debe ser enfriado antes de ser almacenado en el tanque de presión. Para este enfriamiento se utiliza otro condensador y nuevamente después de que el gas se enfría a aproximadamente 100 °C, parte del vapor de agua condensado se elimina mediante un drenaje manual en forma de “T”.

El tanque de almacenamiento a presión de biogás comprimido está diseñado para soportar hasta 8 bar de presión. Como medida de seguridad se tiene una conexión al controlador automático mencionado inicialmente, para que se libere el gas del tanque de almacenamiento en caso de que se supere el límite de presión. Este gas se libera hacia una llama piloto instalada. También se instalaron válvulas de seguridad de alivio de presión para el tanque de almacenamiento y en la tubería de compensación de presión para el motor del compresor.

Para permitir o bloquear el flujo de biogás de acuerdo al sistema de control automático, se usan válvulas electromecánicas. El controlador automático que inicia la compresión del biogás almacenado en el gasómetro, se activa con sensores de nivel de agua. El agua se desplaza cuando las bolsas de PVC del gasómetro se llenan de biogás. Conforme se llenan las bolsas de PVC, el nivel del agua asciende, y mediante los sensores se detecta el nivel máximo, lo cual permite el inicio automático de la compresión del biogás hasta alcanzar el nivel mínimo.

Finalmente, se tiene una conexión después del tanque de almacenamiento, la cual permite el flujo de biogás comprimido hacia el generador eléctrico adaptado para el funcionamiento con biogás y gasolina, o hacia el calefón para su utilización como energía térmica. Además, por medidas de seguridad se tienen arrestallamas, antes de la entrada y salida del motor del compresor y antes de la entrada del generador eléctrico, para contener cualquier chispa que se produzca y de esta forma evitar alguna explosión.

En el Anexo 2 se muestra el diagrama de flujo del sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto del LaDEA. A continuación se presenta la nomenclatura y descripción del Anexo 2.

Tabla 3.23: Nomenclatura de equipos

Nomenclatura	Equipo
CN-00	Condensador
K-1	Calefón
E-1	Motor del compresor
FAG-00	Arrestallama para biogás a presión atmosférica
FAGP-00	Arrestallama para biogás comprimido
G-1	Filtro de reducción de ácido sulfhídrico
G-2	Filtro de reducción de olores y vapor de agua
C-1	Gasómetro
U-1	Generador
VI	Contador de gas (indicador de volumen)
S-1	Separador tipo sifón
TA-1	Trampa de agua
C-2	Tanque de almacenamiento de biogás comprimido

Tabla 3.24: Nomenclatura de accesorios

Nomenclatura	Tipo de válvula
LP-1	Llama piloto
T-00	Unión "T"
VBA-1	Válvula de bola para vapor de agua condensado
VBG-00	Válvula de bola para biogás a presión atmosférica
VBGP-00	Válvula de bola para biogás comprimido
VCG-1	Válvula check para biogás a presión atmosférica
VCGP-1	Válvula check para biogás comprimido
VEG-00	Válvula electromecánica para biogás a presión atmosférica
VEGP-00	Válvula electromecánica para biogás comprimido
VRPG-00	Válvula reguladora de presión para biogás comprimido
VSG-00	Válvula de seguridad para biogás comprimido

Tabla 3.25: Nomenclatura de tipo de control

Nomenclatura	Tipo de control
LC	Control automático de nivel
PC	Control automático de presión

Tabla 3.26: Descripción de flujos del sistema de utilización energética de biogás

Nomenclatura	Flujo
F-01	Biogás a 35 °C
F-02	Biogás con reducción de H ₂ S
F-03	Biogás con reducción de condensados
F-04	Biogás con reducción de olores y vapor de agua
F-05	Biogás almacenado a presión atmosférica
F-06	Biogás enfriado a 20 °C
F-07	Biogás con reducción de condensados
F-08	Biogás comprimido
F-09	Biogás enfriado a 100 °C
F-10	Biogás con reducción de condensados
F-11	Biogás comprimido a 8 bar
F-12	Biogás regulado para uso en calefón y generador

3.3 Pérdidas de presión

Para calcular las pérdidas de presión en la tubería del trayecto de biogás desde el gasómetro hasta el motor del compresor, se utilizan las distancias medidas del sistema de utilización energética de biogás, obtenidas del layout del Anexo 3 y se calculan las distancias equivalentes de los accesorios utilizados en el sistema. A continuación, en la Figura 3.45 se muestran las distancias de tubería.

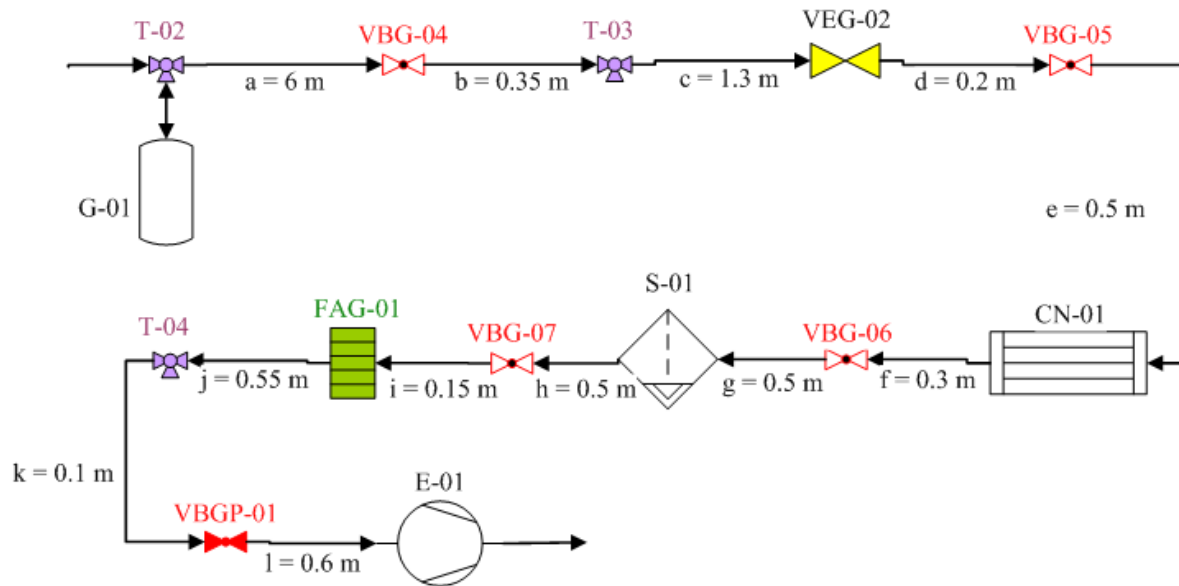


Figura 3.45: Distancias medidas en un trayecto del sistema de utilización energética de biogás

Para calcular las pérdidas de presión en la tubería se utiliza la siguiente ecuación [48]:

$$\Delta p = 2f_f \cdot \rho \left(\frac{L}{D}\right) v^2 \quad 3.15$$

donde, Δp es la pérdida de presión [N/m²]

f_f es el factor de fricción de Fanning [-]

ρ es la densidad del fluido [kg/m³]

L es la longitud del tramo [m]

D es el diámetro interior de la tubería [m]

v es la velocidad del fluido [m/s]

Para flujo laminar en una tubería circular ($Re < 2300$) se tiene que [48]:

$$f_f = \frac{16}{Re} \quad 3.16$$

De acuerdo a la Tabla 3.6 se tiene que para el trayecto indicado en la Figura 3.45, $Re = 2350$. Debido a simplicidad en los cálculos se considera que sí existe flujo laminar en este trayecto. Entonces se tienen los siguientes resultados, con $L =$ suma de cada tramo de la Figura 3.45 ($L = a + b + c + d + e + f + g + h + i + j + k + l$):

Tabla 3.27: Pérdidas de presión en la tubería del trayecto de la Figura 3.45

Parámetro	Símbolo		Unidades
Diámetro interior de la tubería	D	0.00635	m
Densidad del biogás	ρ	1.2	kg/m ³
Velocidad del biogás	v	4	m/s
Número de Reynolds del biogás	Re	2350	-
Factor de fricción de Fanning	f_f	0.0068	-
Longitud del tramo	L	11.05	m
Pérdida de presión en tubería	Δp_l	455.0	N/m²
		0.00455	bar

Por otra parte, para determinar las pérdidas de presión debidas a accesorios, se utiliza la siguiente ecuación [⁴⁸]:

$$\Delta p = 2f_f \cdot \rho \left(\frac{L_{eq}}{D} \right) v^2 \quad 3.17$$

donde, L_{eq} es la distancia equivalente de cada accesorio [m]

A continuación, se presentan los valores de las distancias equivalentes para los accesorios de la Figura 3.45 [⁴⁸].

Tabla 3.28: Distancias equivalentes de accesorios

Accesorio	L_{eq}/D	Cantidad
“T”	67	3
Válvula de bola	7	5

Tabla 3.29: Pérdidas de presión en los accesorios del trayecto de la Figura 3.45

Parámetro	Símbolo		Unidades
Diámetro interior de la tubería	D	0.00635	m
Densidad del biogás	ρ	1.2	kg/m ³
Velocidad del biogás	v	4	m/s
Número de Reynolds del biogás	Re	2350	-
Factor de fricción de Fanning	f_f	0.0068	-
Pérdida de presión de 3 "T"	Δp_T	52.5	N/m ²
Pérdida de presión de 5 válvulas de bola	Δp_V	9.1	N/m ²
Pérdida de presión total de accesorios	Δp_2	61.6	N/m²
		0.000616	bar

A continuación se presentan los resultados de la pérdida de presión total en el trayecto de la Figura 3.45.

Tabla 3.30: Pérdidas de presión total del trayecto de la Figura 3.45

Parámetro	Símbolo		Unidades
Pérdida de presión en tubería	Δp_1	0.004550	bar
Pérdida de presión total de accesorios	Δp_2	0.000616	bar
Pérdida de presión total	Δp	0.005166	bar

3.4 Implementación del sistema de utilización energética de biogás

Para la implementación del sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA se realizó un layout del laboratorio. El layout que muestra la implementación se presenta en el Anexo 3. Se observa que los filtros, el contador de gas y el gasómetro se encuentran cerca del digestor. Por otra parte, los intercambiadores de calor, el separador tipo sifón, el motor del compresor, el tanque de almacenamiento y el generador se encuentran en el cuarto de máquinas. Se decidió ubicar estos equipos en el cuarto de máquinas para aislar el ruido producido por el motor del compresor y por el generador. El calefón está instalado por fuera del laboratorio debido a que este equipo no debe estar ubicado en lugares cerrados donde no exista ventilación.

4 Análisis económico del sistema de utilización energética de biogás

Concluida la construcción e instalación se determina el costo del sistema de utilización energética de biogás. A continuación en la Tabla 4.1 se muestra la lista de precios de los equipos y accesorios utilizados para la construcción del sistema y para su instalación en la línea de biogás de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA.

Tabla 4.1: Lista de precios para la construcción e instalación del sistema de utilización energética de biogás

Cantidad	Descripción	Proveedor	Costo (\$)
4	Válvulas electromecánicas (acero inoxidable) ½ "	Tecno Equipos	417.85
2	Válvulas de seguridad (bronce) ½ "	Promigpart	95.63
2	Válvulas check (bronce) ¾ "	Promigpart	103.42
16	Válvulas de bola (acero inoxidable) ¼ "	Almacén "Ing. Jácome"	101.82
1	Compresor 2 HP + tanque a presión 25 L	Kywi	237.05
1	Gasómetro	Proarcos	291.20
2	Intercambiadores de calor	Fabián Morales	30.00
1	Tanque reservorio de agua 200 L	Dipor	29.09
1	Separador tipo sifón	Proarcos	91.60
1	Bomba de agua 0.5 HP	Kywi	38.48
	Tubería, "T"s, reducciones, pitones, accesorios	Promigpart	765.33
	Instrumentación y control	CEIN	866.79
	Modificación del generador eléctrico	Taller Automotriz Ron	900.00
		Total (\$)	3968.26

5 Puesta en marcha en frío

La puesta en marcha en frío consiste en verificar el funcionamiento y operación de cada uno de los componentes que forman parte del sistema de utilización energética de biogás. Para esto se verifican los siguientes componentes:

- funcionamiento de válvulas electromecánicas, compresor, generador
- sellado de tuberías para biogás
- hermeticidad de: gasómetro, intercambiadores de calor, separador tipo sifón
- ciclo de llenado del tanque de almacenamiento

A continuación se detallan las pruebas realizadas en la puesta en marcha en frío de cada componente.

5.1 Funcionamiento de las válvulas electromecánicas

El funcionamiento de las válvulas electromecánicas se verifica con la activación del controlador automático y comprobación de que las conexiones eléctricas estén correctamente instaladas. Se enciende el tablero de control y se verifica, topando la parte superior de válvulas, que exista vibración del solenoide, la cual se genera debido al campo electromagnético creado por la bobina y abre la válvula.

5.2 Funcionamiento del compresor

De igual forma, el funcionamiento del compresor se verifica con la activación del controlador automático y comprobación de que las conexiones eléctricas estén correctamente instaladas. Se lleva a cabo la compresión de aire.

Para la comprobación del sistema de control de compresión de biogás, se llena el gasómetro y se verifica que los tres sensores de nivel se encuentren en contacto con el agua, es decir, el controlador debe detectar el nivel máximo como se indica en la Figura 3.18. De esta forma el compresor arranca su funcionamiento y se observa el aumento de presión en los manómetros del tanque de almacenamiento, debido al aire comprimido que ingresa al

tanque. El compresor se apaga cuando el nivel del control de nivel del gasómetro llega al mínimo.

5.3 Funcionamiento del generador

Se verifica el funcionamiento del generador con las mezclas de alimentación aire/gasolina y aire/GLP. Previamente se chequea que el tanque de gasolina del generador no se encuentre vacío y se conecta un tanque de GLP, con válvula reguladora, al acople de entrada de biogás al generador. Luego, se arranca el generador con la mezcla aire/gasolina. Se procede a cerrar la entrada de gasolina al motor y al momento en que el motor empieza a ahogarse, se procede a permitir el flujo de alimentación de la mezcla aire/GLP. Se verifica el correcto funcionamiento del generador al observar que el motor no desmaya después de ingresar la segunda mezcla de alimentación. Además, se comprueba el correcto funcionamiento del generador al conectar un taladro a uno de los enchufes que posee el generador y observar que el taladro funciona normalmente.

5.4 Funcionamiento del calefón

El funcionamiento del calefón se verifica usando un tanque de GLP. En primer lugar, se conecta a la entrada de gas del calefón, la manguera proveniente del tanque de GLP con su respectiva válvula. Luego se abre la válvula de salida de gas del tanque. También se abre la válvula de entrada de gas del calefón, y la válvula de entrada de agua del calefón. Se colocan las pilas necesarias para el funcionamiento del calefón y en el calefón se regula la temperatura a la que saldrá el agua. Se enciende el calefón, se abre la llave del lavabo a la que está conectada la tubería de salida de agua del calefón, y se comprueba que se obtiene agua caliente.

5.5 Sellado de tuberías para biogás

La conexión de las tuberías con los accesorios y equipos está realizada por acoples de rosca y abrazaderas en cada conexión para evitar fugas. La prueba se realiza haciendo

fluir aire a través del interior de las tuberías, ya sea por succión o por descarga, mediante el uso del compresor, y detectando las fugas en cada unión con agua jabonosa.

5.6 Hermeticidad del gasómetro

La prueba de hermeticidad del gasómetro se realiza llenando con agua el tanque # 1 y el tanque # 2 de la Figura 3.17, cada uno hasta una altura de agua en la que los sensores de nivel blanco y mínimo, del tubo de PVC adjunto al tanque # 1, se encuentren cubiertos por agua. También se acumula biogás dentro del digestor hasta que su presión llegue hasta aproximadamente 0.5 bar. Luego se deja fluir el biogás desde el digestor hasta las bolsas de PVC del gasómetro. Después de que se inflan las bolsas, de tal manera que se genera una presión interna, se cierra la válvula de entrada de biogás del gasómetro y se chequea que no existan fugas en las conexiones de las bolsas con la tubería.

También se verifica la hermeticidad de las bolsas de PVC. Para esto se vacía el biogás que se encuentra en las bolsas y se procede a desconectarlas de las tuberías de los tanques # 1 y # 2. Se puede verificar la hermeticidad de las bolsas al observar que no contienen agua.

5.7 Hermeticidad del separador tipo sifón

Para verificar la hermeticidad del separador tipo sifón se utiliza agua. Se llena el separador con agua y se observa que ésta no escape por ninguna de las uniones o tapones. Esta prueba también se realiza girando el separador 180° para verificar que no existan fugas en los acoples de la parte superior del separador.

5.8 Hermeticidad de los intercambiadores de calor

La prueba de hermeticidad de los intercambiadores de calor se lleva a cabo mediante el funcionamiento del compresor. Se procede a comprimir aire en el sistema de utilización energética de biogás. Luego, ambos intercambiadores conectados respectivamente en el trayecto de entrada al compresor y en el trayecto de descarga

comprimida del compresor se presurizan con aire y se chequea que no existan fugas en las conexiones de ingreso y salida de agua, y así mismo, en las conexiones de ingreso y salida de biogás.

5.9 Ciclo de llenado del tanque de almacenamiento

Considerando que el volumen total del gasómetro es de 200 L y que la producción diaria promedio de biogás durante la operación regular de la planta piloto es de 478 L/día (según la sección 3.1.3), existe un ciclo de llenado del gasómetro y compresión del biogás. Para conocer la cantidad de biogás, a presión atmosférica de 1.013 bar, que puede ser comprimido a 8 bar se usa la ley de Boyle:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad 5.1$$

donde, P_2 es la presión del biogás después de ser comprimido [bar]

P_1 es la presión del biogás antes de ser comprimido [bar]

V_2 es el volumen del biogás después de ser comprimido [L]

V_1 es el volumen del biogás antes de ser comprimido [L]

Entonces se tiene:

Tabla 5.1: Variación de volumen en la compresión del biogás

Parámetro	Símbolo		Unidades
Presión del biogás después de ser comprimido	P_2	8	bar
Volumen del biogás después de ser comprimido	V_2	25	L
Presión del biogás antes de ser comprimido	P_1	1.013	bar
Volumen del biogás antes de ser comprimido	V_1	197.4 ≈ 200	L

Suponiendo que:

- se producen 478 L/día de biogás

- 200 L de biogás a 1.013 bar (presión en las bolsas de PVC) van a ser comprimidos en un tanque de 25 L a 8 bar en cada ciclo de compresión
- la compresión inicia cuando se llena totalmente el gasómetro con 200 L de biogás
- después de que el biogás sea comprimido en el tanque de 25 L, es necesario utilizar este gas comprimido y vaciar el tanque de almacenamiento para poder realizar más ciclos de compresión

A continuación en la Tabla 5.2 se presentan los resultados del ciclo de llenado del gasómetro y compresión del biogás.

Tabla 5.2: Ciclo de llenado del gasómetro y compresión del biogás

Día	Volumen inicial de biogás en el gasómetro [L]	Biogás producido [L]					# ciclos	# total ciclos
		1er ciclo	2do ciclo	3er ciclo	Sobrante	Total		
1	0	200	200	-	78	478	2	2
2	78	122	200	-	156	478	2	4
3	156	44	200	200	34	478	3	7
4	34	166	200	-	112	478	2	9
5	112	88	200	-	190	478	2	11
6	190	10	200	200	68	478	3	14
7	68	132	200	-	146	478	2	16

En la Tabla 5.2 es necesario considerar los siguientes aspectos:

- el volumen de biogás necesario para llevar a cabo el primer ciclo de compresión (200 L) es igual a la suma del volumen inicial de biogás en el gasómetro más el biogás producido para el primer ciclo
- el volumen de biogás producido diariamente (478 L/día) es igual a la suma del biogás del primer ciclo de compresión, más el biogás del segundo ciclo, más el biogás del tercer ciclo, y más el biogás sobrante
- el volumen de biogás sobrante en un día es igual al volumen inicial de biogás en el gasómetro del siguiente día

- el número total de ciclos es igual a la suma de todos los ciclos de cada día de operación del sistema de utilización energética de biogás

Por ejemplo, en el día 4 se tienen dos ciclos, el primero se lleva a cabo con (34 + 166) L biogás; el segundo se lleva a cabo con 200 L, se tienen 112 L de biogás sobrante en el gasómetro, y en los cuatro días de operación se han llevado a cabo 9 ciclos de compresión. En conclusión, se tienen dos ciclos de compresión de biogás por día durante la operación del sistema de utilización energética de biogás, excepto en los días que son múltiplos de 3, en donde se tienen 3 ciclos de compresión del gas.

6 Conclusión y Recomendaciones

En este estudio se diseña y construye un sistema de utilización energética del biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA – USFQ con el fin de obtener energía eléctrica a partir del funcionamiento de un generador eléctrico, y también obtener energía térmica mediante el uso de un calefón. Además, en el diseño se incluye un sistema de control automático para optimizar el uso del biogás como fuente alternativa de energía. Para llevar a cabo este estudio, se reinicia la operación regular de la planta piloto para poder cuantificar y caracterizar el biogás producido y en base a este análisis se diseña el sistema de almacenamiento y compresión del gas.

El biogás obtenido de la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA – USFQ presenta en todo momento la capacidad de combustionarse sin llama extensa, presenta una coloración azul en la llama, y se combustiona sin la necesidad de usar llama piloto, por lo que su utilización energética es factible. El porcentaje promedio de metano en el biogás analizado durante la operación regular de la planta piloto se encuentra en 62 %, con un mínimo de 56 % y un máximo de 68 %.

Durante el reinicio de la operación de la planta piloto se observaron pocos casos de una producción alta de biogás (> 400 L/día). Una de las razones para la producción diaria baja de biogás es debido al largo periodo que el digestor permaneció sin alimentación y degradando el material orgánico residual. Durante este periodo se tiene una producción diaria promedio de biogás de 303 L/día. Por el contrario, durante la operación regular de la planta piloto se observa que en la mayoría de casos se tiene una producción alta de biogás (> 400 L/día). Durante este periodo se tiene una producción diaria promedio de biogás de 478 L/día.

Antes de utilizar energéticamente el biogás es necesario purificarlo. Para la reducción de las trazas de H_2S presentes en el biogás producido en la planta piloto de digestión anaerobia del LaDEA. Para esto se utiliza un filtro que contiene esponjas de hierro. Para la reducción de vapor de agua y H_2S presentes en el biogás se utiliza un filtro que contiene carbón activado granular (CAG). Para la retención de condensados, principalmente agua, que provienen del filtro de esponjas de hierro y del filtro de carbón activado se utiliza una trampa de agua constituida por una T y por una botella plástica.

Para el dimensionamiento del sistema de acumulación del biogás en un gasómetro se considera la producción promedio de biogás durante la operación regular de la planta piloto, la cual es de 478 L/día. Se decide tener una capacidad de almacenamiento máximo del gasómetro de 200 L. Además, se instala un control de nivel en el gasómetro para que cuando este equipo se llene de biogás, la compresión de este gas se lleve a cabo de forma automática.

Se investiga sobre el tipo de compresor necesario para comprimir el biogás. Se selecciona un compresor de pistón con 2 HP de potencia nominal, el cual comprime el biogás desde una presión inicial de 1 bar hasta 8 bar. Para almacenar el biogás comprimido, se escogió un tanque de 25 L de capacidad que incluye un interruptor de presión. El tanque de almacenamiento de biogás está diseñado para soportar hasta 8 bar de presión. Como medida de seguridad se tiene una conexión al interruptor de presión, para que se libere el gas del tanque de almacenamiento y se apague el motor del compresor en caso de que se supere el límite de presión. Este gas se libera hacia una llama piloto instalada. El flujo de salida del gas por este acople es regulado mediante un tornillo. El gas que se libera a través del acople, puede ser quemado.

Para la eliminación del vapor de agua contenido en el biogás, se diseñaron dos intercambiadores de calor de tipo carcasa y tubos, cada uno con tubo de 1/4" de diámetro interior y 3 m de longitud, para condensar el vapor de agua. También, se diseña un separador tipo sifón para la eliminación del condensado.

Se instalaron arrestallamas, los cuales son dispositivos de protección capaces de detener, con una pérdida mínima de presión, los procesos de combustión de carácter detonante en tuberías.

Se instalaron válvulas de bola para permitir o bloquear el flujo de biogás. En el sistema de utilización energética de biogás, también se encuentran instaladas antes y después de los equipos para poder dar mantenimiento a los mismos sin tener que desactivar todo el sistema. También se instalaron válvulas check para permitir que el biogás fluya en una sola dirección. De esta forma se asegura que el gas siga por el sistema de compresión instalado y no regrese al digestor.

Se instalaron válvulas electromecánicas junto con el sistema de control automático para permitir o bloquear el flujo de biogás en ciertos trayectos del sistema de utilización

energética de biogás. Estas válvulas se encuentran normalmente cerradas. Además, se instalaron válvulas de seguridad. En caso de que la presión en el sistema de compresión de biogás sea demasiado alta, el gas se libera por esta válvula para disminuir la presión.

En base a la experiencia adquirida durante este estudio es posible realizar las siguientes recomendaciones para el diseño y construcción del sistema de utilización energética de biogás. El control de fugas es indispensable y debe ser riguroso con el fin de evitar pérdidas de biogás y de presión en los equipos de almacenamiento del gas. Grandes pérdidas de biogás pueden llegar a ser peligrosas, ya que si el biogás se encuentra en contacto con el motor del compresor y si existe alguna chispa, se produciría una explosión. Para esto se debe llevar a cabo la puesta en marcha en frío para detectar las fugas y posibles fallas en los equipos y accesorios instalados.

El uso de válvulas de bola en las tuberías es muy útil en todo el sistema de utilización energética de biogás, debido a que con ellas se puede controlar flujos, comprobar hermeticidad y hacer cambios o reparaciones de algunos equipos como el gasómetro, compresor, intercambiadores de calor, etc. sin interferir en el proceso. Los equipos y accesorios utilizados deberían ser compuestos por materiales que proporcionen buena resistencia a la corrosión como acero inoxidable, aluminio, hierro dúctil, o acero alto en carbono, con el objetivo de garantizar la vida útil del sistema y no comprometer la seguridad personal.

Es importante remover el H_2S antes de la compresión ya que este contaminante forma ácido sulfúrico, el cual puede corroer las partes del compresor y producir una falla temprana del equipo. Además, se recomienda eliminar el CO_2 y el vapor de agua para mejorar el valor energético del biogás comprimido. Los condensados pueden llegar a ser un problema en la salida del compresor o en otras partes de la tubería del sistema de utilización energética de biogás provocando una caída de presión excesiva. Es por esto que se deben utilizar intercambiadores de calor y proporcionar trampas de agua para eliminar los condensados.

Antes de proceder con la construcción del sistema de utilización energética de biogás es necesario considerar el espacio en donde será colocado cada equipo y accesorio, para de esta forma minimizar las pérdidas de presión que se pueden producir por largos trayectos de tubería.

7 Bibliografía

- [¹] Weiland, Peter. "Biogas production: current state and perspectives". Appl Microbiol Biotechnol. Germany. (2010) 85: 849-860.
- [²] IEA (2006) World Energy Outlook. International Energy Agency, Paris.
- [³] Cushion, Elizabeth, Adrian Whiteman y Gerhard Dieterle. Bioenergy Development. Issues and Impacts for Poverty and Natural Resource Management. Washington, D.C.: The World Bank, 2010. Pág.: 10.
- [⁴] Armijo, Carolina *et al.* "Biogas generation in the landfill of Ensenada, Baja California, Mexico". Journal of Solid Waste Technology & Management. Agosto de 2010. Vol. 36. Págs.: 100-109.
- [⁵] Cornejo, Camilo y Ann C. Wilkie. "Greenhouse gas emissions and biogas potential from livestock in Ecuador". Energy for Sustainable Development. USA. (2010). Págs.: 256-266.
- [⁶] Navickas, Kestutis *et al.* "Environmental and Energetic Evaluation of Biogas Production from Plant Biomass". Rural Development 2011. Engineering and Environmental of Biosystems. Aleksandras Stulginskis University, Lithuania.
- [⁷] Periódico Digital del Gobierno de la Revolución Ciudadana. "Ecuador recibe asistencia técnica de Cuba sobre diseño y construcción de biodigestores". 12 de abril de 2009.
- [⁸] Nagy, Valeria y Emese Szabó. "Biogas from organic wastes". Vasile Goldis University Press, Hungary. Vol. 21, issue 4, 2011, Págs.: 887-891.
- [⁹] Johansson, Nina. Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology -Description of systems and evaluations of energy balances. Master thesis. Lunds Universitet. Suecia. Diciembre, 2008.
- [¹⁰] A. Demirbas. "Hydrogen Production from Carbonaceous Solid Wastes by Steam Reforming". Energy Sources, Part A. Turkey. 30: 924-931, 2008.
- [¹¹] Wilkie, Ann C. y Jason M. Evans. "Aquatic plants: an opportunity feedstock in the age of bioenergy". Biofuels. Future Science Group. USA. (2010). Págs.: 311-321.
- [¹²] Al Seadi, Teodorita *et al.* Biogas Handbook. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs. Denmark. October 2008.
- [¹³] Altamirano, Gerardo, Antonio Freire y Danny Gallegos. Producción de electricidad mediante la captura y aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Agosto 2010.
- [¹⁴] Vivekanandan, S. y G. Kamaraj. "Effect of co-digestion of cow dung with rice chaff, rice straw and rice husk in biogas production using anaerobic digestion". International Research Journal of Biotechnology. India. Vol. 2(5). Mayo 2011. Págs.: 114-118.

- [¹⁵] Nagy, Valeria y Attila Meggyes. "Methane getting from different kind of organic materials under the experimental circumstances". Vasile Goldis University Press, Hungary. Vol. 21, issue 4, 2011, Págs.: 883-886.
- [¹⁶] Bagge, E., M. Persson y K.-E. Johansson. "Diversity of spore-forming bacteria in cattle manure, slaughterhouse waste and samples from biogas plants". Journal of Applied Microbiology. Sweden. 2010. Págs.:1549-1565.
- [¹⁷] L. M. Frare *et al.* "Hydrogen Sulfide Removal from Biogas Using Fe/EDTA Solution: Gas/Liquid Contacting and Sulfur Formation". Environmental Progress & Sustainable Energy. Brazil. (Vol.29, No.1) Abril 2010. Págs.: 34-41.
- [¹⁸] Asaduzzaman, M., Douglas F. Barnes y Shahidur R. Khandker. Restoring Balance. Bangladesh's Rural Energy Realities. Washington, D.C.: The World Bank, 2010. Pág.: 70.
- [¹⁹] Robalino Fernández, Hugo. "Estudio comparativo y aplicación de materia prima alternativa en biodegestores unifamiliares de flujo continuo en la Zona de Intag, Cotacachi – Imbabura". Universidad Técnica del Norte, Escuela de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. n.f. 14 de mayo de 2011.
<<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/131/4/03%20REC%20110%20TEXTO%20Y%20BIBLIOGRAFIA.pdf>>
- [²⁰] Ray, Rajasree. "Adaptation Activities In India". Development Outreach. Special report. World Bank Institute. India. Abril 2008. Págs.: 18-21.
- [²¹] Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur y Wladyslaw Nowak. "Increasing of electricity generation capacity of biogas power generator by application of sub- and supercritical modules of Organic Rankine Cycle". Archives of thermodynamics. Poland. Vol. 30 (2009), No. 4, 175-188.
- [²²] Felix W Ntengwe *et al.* "Biogas production in cone-closed floating-dome batch digester under tropical conditions". International Journal of ChemTech Research. Zambia. Enero-Marzo 2010, Vol. 2, No.1, pp. 483-492.
- [²³] Bekkering, Jan, Ton A. Broekhuis y Wim J. T. van Gemert. "Operational modeling of a sustainable gas supply chain". Eng. Life Sci. The Netherlands. 2010, 10, No. 6, 585-594.
- [²⁴] Chun, Kim, Song and Chae. "SynGas Production from Organic Waste Using Non-Thermal-Pulsed Discharge". Journal of the Air & Waste Management Association. Korea. Volumen 55. Abril 2005. pp. 430-436.
- [²⁵] Salamanca, Jairo. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Químico. Universidad San Francisco de Quito. Noviembre 2009.
- [²⁶] Proaño, Gabriel. Optimización en la operación de un biodigestor a escala piloto y caracterización de productos y materia prima. Tesis para la obtención del título

- de Ingeniero Químico. Universidad San Francisco de Quito. Enero 2011. Págs.: 26-27.
- [²⁷] Cevallos, A. y Rómulo Ramos. Diseño y construcción de un biodigestor de campana flotante a partir de desechos orgánicos de ganado porcino con capacidad de 12 m³ para la obtención de biogás el cual va a ser utilizado en la cocción de alimentos y climatización de la graja el Descanzo. Escuela Politécnica del Ejercito. 2009.
- [²⁸] S.S. Kapdi *et al.* "Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context". Renewable Energy. India. (2004) 1-8.
- [²⁹] Baron, Dave *et al.* "Biogas Compressor Project". Department of Mechanical Engineering, University of Michigan. USA. 15 de abril de 2008.
- [³⁰] Bueno, Antonio. "Unidad didáctica: Neumática e hidráulica". n.f. 24 de mayo de 2012. <http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_neumatica/neumatica_indice.html>
- [³¹] Emerson. Climate Technologies. "La tecnología del compresor scroll y sus aplicaciones en aire acondicionado, bombas térmicas y refrigeración". n.f. 30 de mayo de 2012. <<http://spanish.emersonclimate.com/espanol/art-sp-reporte-scroll.pdf>>
- [³²] Walsh, James L. *et al.* Biogas Utilization Handbook. Georgia Institute of Technology. Atlanta, USA. Febrero 1988.
- [³³] Porras y Soriano. "Ciclo teórico de funcionamiento". Universidad de Castilla-La Mancha. n.f. 3 de junio de 2012. <http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/motores/temas/ciclo_teorico.pdf>
- [³⁴] Kruse Technology. "Otto 4-Stroke Cycle Operation". 2003. 3 de junio de 2012. <http://www.kruse-ltc.com/Otto/otto_cycle.php#>
- [³⁵] Sittiboon Siripornakarachai y Thawan Sucharitakul. "Modification and tuning of diesel bus engine for biogas electricity production". Maejo University, Thailand. 2007.
- [³⁶] Kruse Technology. "Diesel Cycle Operation". 2003. 5 de junio de 2012. <http://www.kruse-ltc.com/Diesel/diesel_cycle.php#>
- [³⁷] Dräger Safety AG & Co. KGaA. "Dräger accuro". 2012. 6 de junio de 2012. <http://www.draeger.com/ES/es/products/gas_detection/tubes/cms/pumps/cin_accuro.jsp>
- [³⁸] Fogler, H. Scott. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. Cuarta edición. Pearson educación, México, 2008.
- [³⁹] COEL. "Nivel - Electrodo". n.f. 10 de Junio de 2012. <<http://www.coel.com.br/pt-br/product/category/eletrodos-ab>>

- [⁴⁰] Truper. “Catálogo Vigente 2012”. 27 de abril de 2012.
<<http://www.truper.com/CatVigente/58.php>>
- [⁴¹] Montesinos, Juan José. Diseño y construcción de un intercambiador de calor para el biodigestor a escala piloto y control de las condiciones de temperatura. Tesis para la obtención del título de Ingeniero Químico. Universidad San Francisco de Quito. Noviembre 2009. Págs.: 17-22.
- [⁴²] Singbua, Piyapong y Ratchaphon Suntivarakorn. “Development of Biogas Compression System for Using in Household”. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering. Khon Kaen University, Thailand. 20-22 Octubre, 2010.
- [⁴³] PROTEGO. Tecnología PROTEGO. Catálogo 2009.
- [⁴⁴] BrassFasteners. “BrassFlareFitting”. 2011. 24 de mayo de 2012.
<<http://brassfasteners.co.in/brass-flare-fittings/flare-male-connector/flare-male-connector.html>>
- [⁴⁵] REGO. L-500 Catalog. USA.
- [⁴⁶] N.A. “Solenoid-Valve-Info.com”. n.f. 24 de mayo de 2012. <<http://www.solenoid-valve-info.com/solenoid-valve-basics.html>>
- [⁴⁷] REGO. Catálogo L-102-SV. USA. 2011.
- [⁴⁸] Welty *et al.* Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc. USA. 2008.
- [⁴⁹] Dräger Safety AG & Co. KGaA. “Manual Dräger accuro”. 8va edición. Diciembre 2005. 5 de junio de 2012.
<<http://www.draeger.com/ifu/ifuDownload.action?id=1168&view=true>>

8 Anexos

Anexo 1

Determinación de H₂S

Procedimiento para la determinación de H₂S

Método Dräger [49]

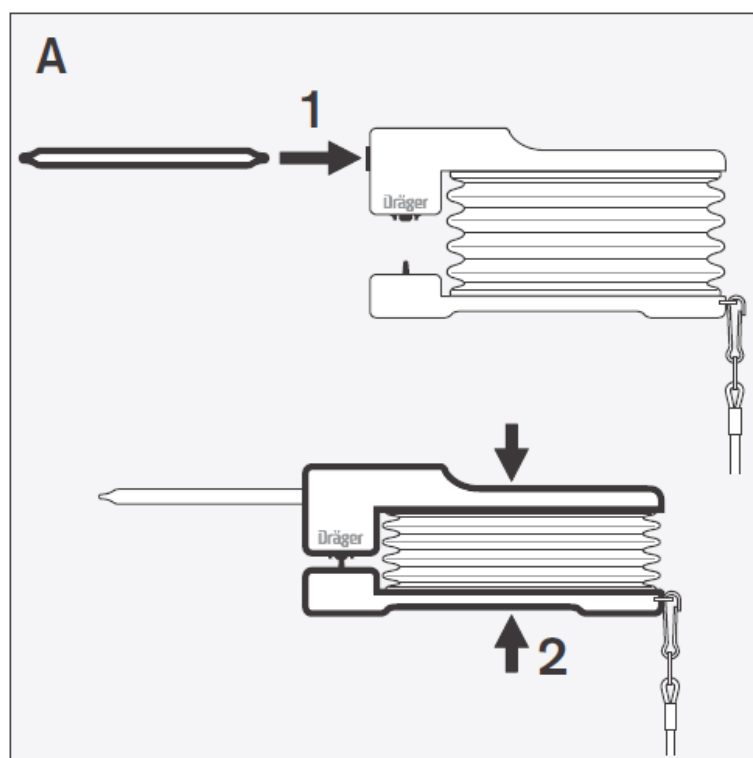
PRECAUCIONES Y MEDIDAS DE SEGURIDAD

- Manipular el equipo después de haber leído este manual
- Proceder con cuidado al abrir el tubo de Dräger, ya que pueden saltar astillas de vidrio
- Mantener la bomba con el lazo hacia abajo, ya que de lo contrario pueden entrar astillas de vidrio en la bomba
- Las puntas de los tubos pueden estar afiladas y ser peligrosas

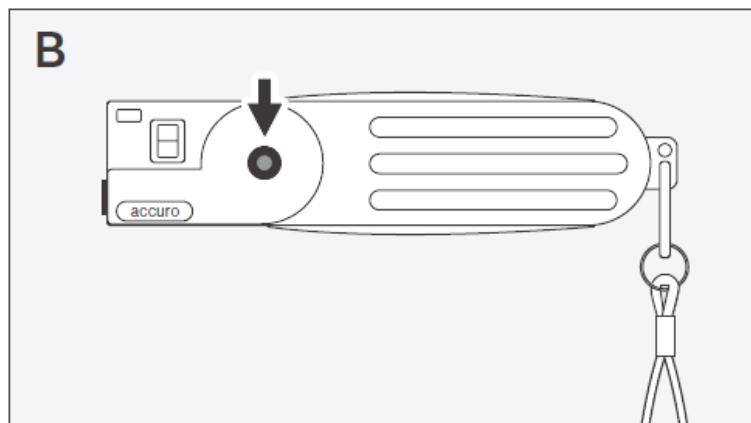
PREPARACIÓN

Comprobación de la hermeticidad de la bomba

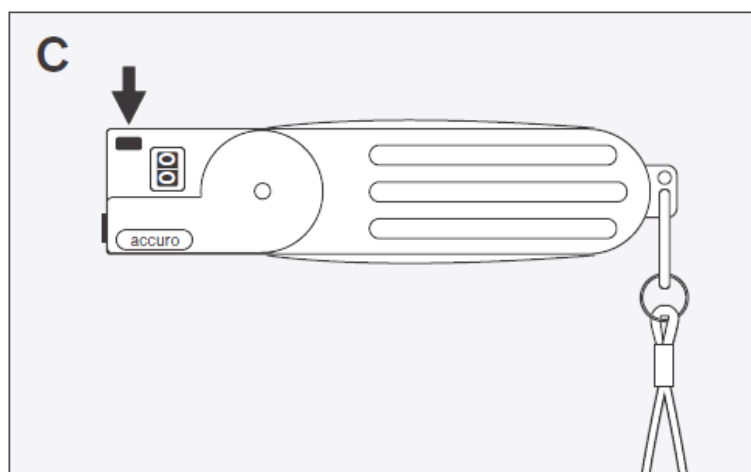
1. Colocar un tubo sin abrir en el portatubo de la bomba (A1)
2. Comprimir la bomba hasta el tope (A2)



3. La hermeticidad de la bomba es adecuada cuando después de que transcurren 15 minutos, todavía no alcanza a verse el punto indicador (B)



4. Retirar el tubo sin abrir del cabezal de la bomba
5. Presionar el botón “reset” con la punta del tubo, para poner a cero el contador de compresiones (C)

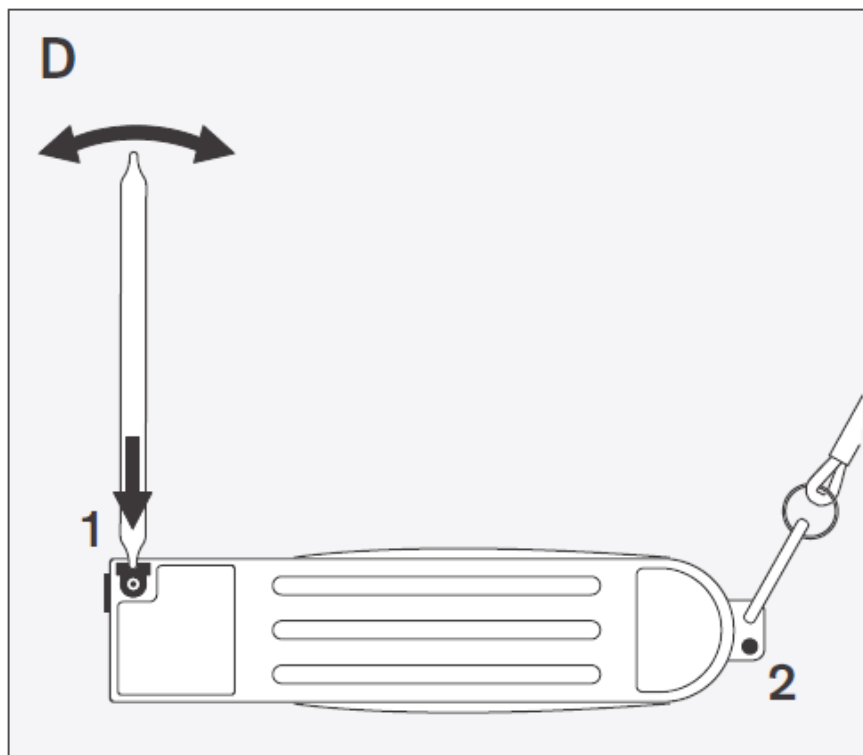


Preparación de tubos

1. Seleccionar un tubo
2. Abrir el tubo por la punta utilizando el cortador Dräger

O:

- Introducir la punta del tubo en el orificio de la parte inferior de la bomba (D1), presionarlo contra el cortador de cerámica; cuando se gira, el vidrio se rayará

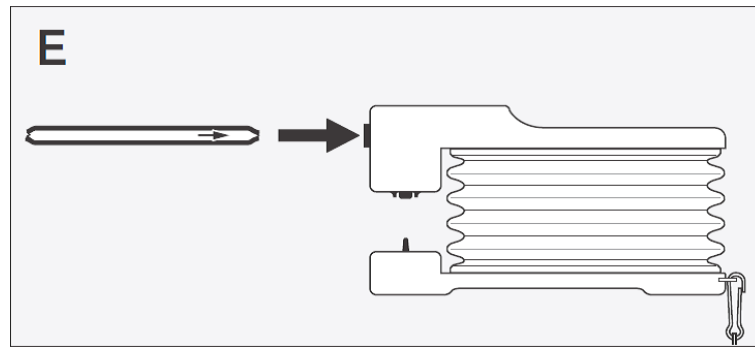


- Mover el tubo hacia los lados hasta que se rompa su punta
- Desechar la punta rota

O:

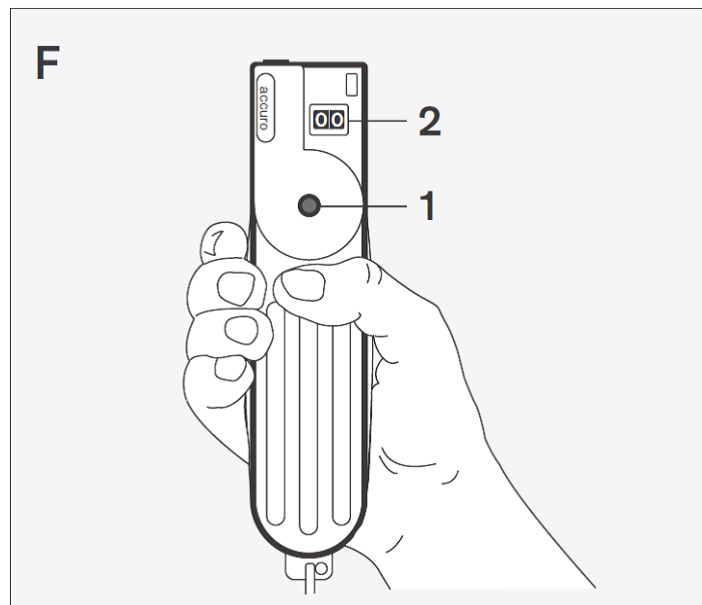
- Girar la bomba con el lazo hacia abajo y meter la punta del tubo en el orificio libre de la chapa (D2)
- Presionar el tubo hacia un lado hasta que se rompa la punta

3. Abrir el otro extremo del tubo siguiendo el mismo procedimiento
4. Colocar en la bomba el tubo con sus dos extremos abiertos, con la flecha señalando hacia la bomba (E)



MEDICIÓN

1. Leer el número de compresiones, n , en las instrucciones de uso del tubo Dräger ($n = 1$ para H_2S)
2. Coger la bomba entre el pulgar y el índice, de manera que el punto indicador y el contador de compresiones estén en dirección hacia el usuario (F)

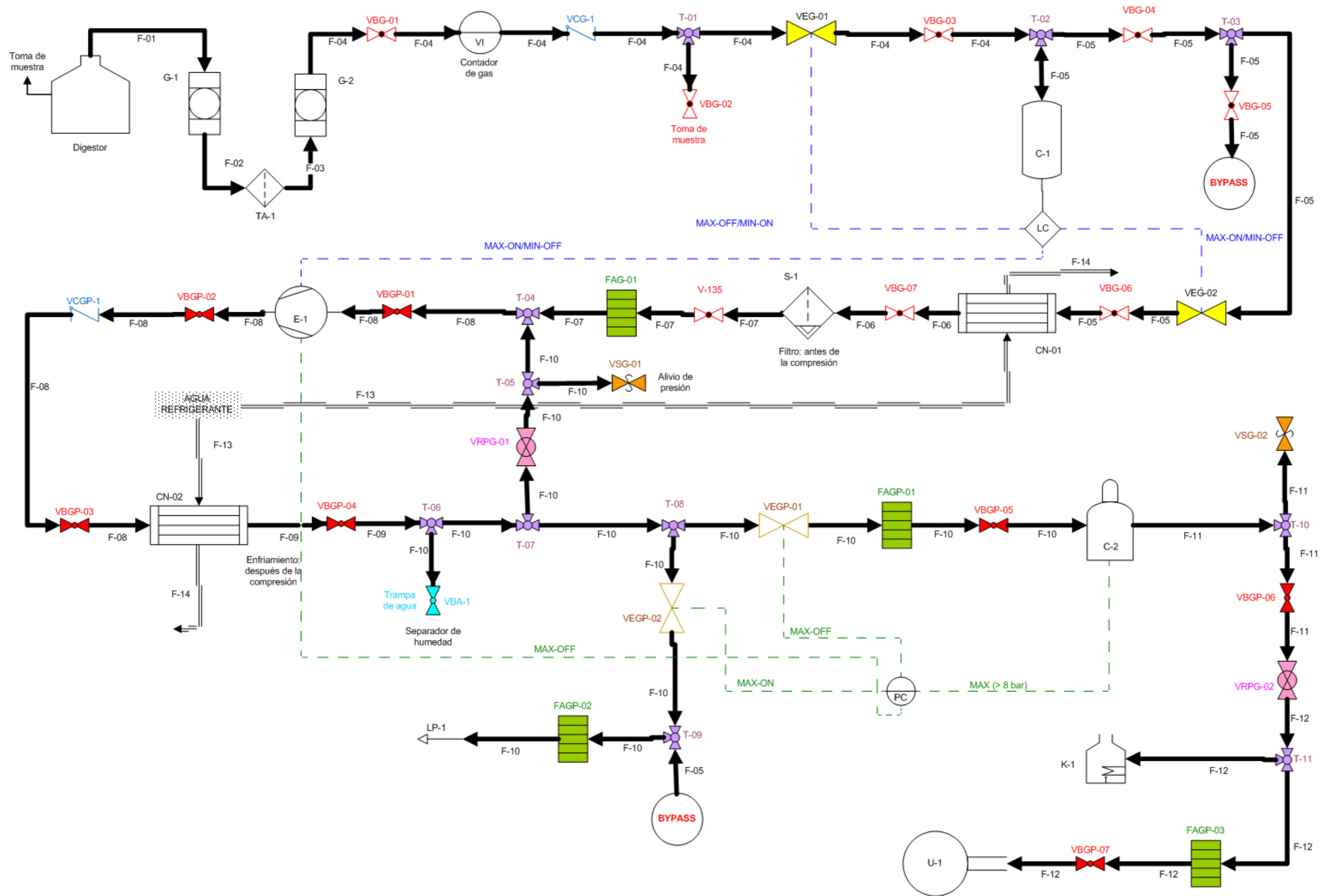


3. Comprimir la bomba hasta el tope (aproximadamente por 30 segundos)
4. Soltar la compresión de la bomba, hasta que el fuelle de la bomba haya adquirido su forma original
5. Comprimir de nuevo la bomba cuando pueda verse el punto indicador (F1)
6. Repetir esta operación hasta que el número leído en el contador de compresiones coincida con el número nominal de compresiones (F2)

7. Directamente después de ello, leer la indicación de la longitud total de la coloración (los tubos Dräger sin abrir, sirven con referencia). El viraje de la coloración es de blanco a marrón.
8. Retirar el tubo usado del cabezal
9. Limpiar la bomba practicando algunas compresiones con aire ambiental limpio

Anexo 2

Diagrama de flujo del sistema de utilización energética de biogás



Anexo 3

Implementación del sistema de utilización energética de biogás

