

Artículo Científico

Sistema de cogeneración a partir del biogás producido en la unidad experimental de producción de biogás de la Universidad Privada del Valle (campus Tiquipaya)

Cogeneration system from biogas produced at the biogas experimental production unit of Universidad Privada del Valle (Tiquipaya campus)

Diego Zabalaga Lobo 1. Carla Apaza Rojas 2. Tomás Peredo Rocabado 3.

1. Estudiante de la Carrera de Ingeniería de Petróleo Gas y Energías, Universidad Privada del Valle, Cochabamba. dzabalagalobo@gmail.com
2. Ingeniera Química. Coordinadora de Laboratorios de Petróleo Gas y Energías, Universidad Privada del Valle, Cochabamba. capazar@univalle.edu
3. Ingeniero Químico. Docente del Departamento de Petróleo, Gas y Energías, Universidad Privada del Valle, Cochabamba. tomas_peredo@hotmail.com

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo proponer una alternativa para aprovechar el biogás producido en la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB) de la Universidad Privada del Valle, por medio de un sistema de cogeneración, el cual producirá energía eléctrica que podrá ser empleado en diferentes áreas dentro el campus universitario. La propuesta inició evaluando, estructurando y sistematizando la producción de biogás, para garantizar un flujo ajustado y apto del sistema de cogeneración, se caracterizó el mismo permitiendo conocer su composición que contiene 70% de Metano, 30% de Dióxido de Carbono y 0 ppm de Sulfuro de Hidrógeno.

En el diseño propuesto se requirió utilizar 10494 m³/año de biogás, que ingresarán a un compresor de 3 Hp con el fin de incrementar la presión. Posteriormente, se almacenó en dos cilindros de 90 Litros, para después obtener biogás presurizado, que ingresó al equipo electrógeno, el cual generará 20.988 kW/año de energía eléctrica.

Palabras clave: Biodigestor. Biogás. Cogeneración. Energía Eléctrica. UEPB.

ABSTRACT

The objective of this study was to propose an alternative to take advantage of the biogas produced in the Experimental Biogas Production Unit (EBPU) of the Universidad Privada del Valle, through a cogeneration system, which will produce electrical energy that can be used in different areas within the university campus. The proposal began by evaluating, structuring and systematizing the biogas production, in order to guarantee an adjusted and suitable flow of the cogeneration system, it was characterized by allowing to know its composition containing 70% Methane, 30% Carbon Dioxide and 0 ppm of Hydrogen sulfide.

In the proposed design it was required to use 10494 m³/year of biogas, which will enter a 3 Hp compressor in order to increase the pressure. Subsequently, it was stored in two 90-liter cylinders, to then obtain pressurized biogas, which entered the generator set, which will generate 20,988 kW/year of electrical energy.

Keywords: Biodigester. Biogas. Cogeneration. Electric Power. EBPU.

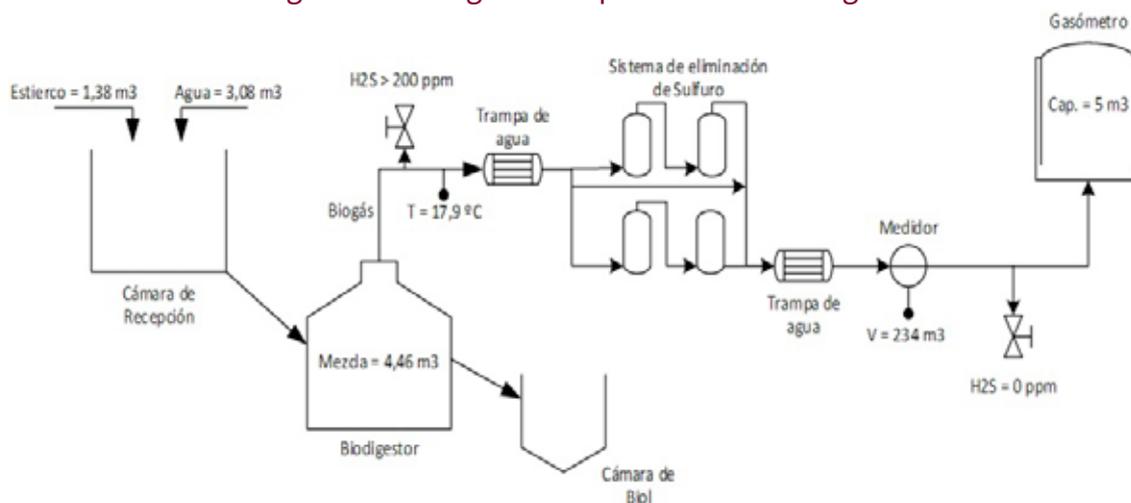
INTRODUCCIÓN

El efecto invernadero es una de las consecuencias de la emisión continua de gases de efecto invernadero, entre estos gases figuran principalmente el dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) (Núñez, 2006). La actividad agropecuaria y el manejo adecuado de residuos rurales pueden contribuir significativamente a la producción y conversión de residuos animales y vegetales (biomasa) en distintas formas de energía (Moreno, 2011). Mediante la digestión anaeróbica de esta biomasa se genera el Biogás. Este puede ser almacenado y usado como combustible y/o electricidad. La Universidad Privada del Valle, en los laboratorios de Ingeniería en Petróleo, Gas y Energías (IPG), cuenta con una Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPG), la cual fue implementada el año 2006 (Laboratorio Petróleo, 2008). El biogás se produce a una baja presión por lo que se dificulta su transporte y se limita su aplicación en algún equipo.

Las condiciones operacionales de la UEPB no se encontraban sistematizadas, por lo que se comenzó estudiando el proceso de producción de biogás en base a 4 lotes de producción realizados experimentalmente en la gestión II-2018, los cuales tienen la denominación L-1801, L-1802, L-1803 y L1804, con el fin de determinar variables como: temperatura ambiente, tiempo de retención, caracterización de materia prima y caracterización de biogás.

Este proceso inicia con la carga y mezcla simultánea de estiércol de cerdo con agua en la cámara de recepción, la mezcla pasa al biodigester de tipo chino donde es degradada por bacterias y microorganismos en un tiempo determinado obteniendo como resultado biogás. A continuación, el biogás producido entra a una etapa de tratamiento en la que se eliminan trazas de agua y gases contaminantes (H₂S); una vez acondicionado el biogás pasa a por un medidor que contabiliza la producción y finalmente es almacenado. La Figura N°1 presenta el diagrama de producción de biogás descrito.

Figura N° 1. Diagrama de producción de Biogás



Fuente: Elaboración propia, 2019.

DESARROLLO DEL ESTUDIO/PROYECTO

Proceso de producción de biogás

Entre la materia prima con mejor rendimiento en cuanto a la producción de biogás, se encuentra el estiércol porcino con una producción de biogás teórica de 0,135 m³/día (Moreno, 2011), por lo que la universidad hace uso de este estiércol para el funcionamiento de la UEPB, mismo que es adquirido de la granja de cerdos “ESCOBAR” ubicado en la zona de Apote (Figura N°2).

Figura N° 2. Granja Porcina “ESCOBAR”



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se tomó una muestra de estiércol representativa, en la cual se pudo observar que tenía una textura, color y olor característico, esta muestra fue analizada por el Centro de Investigación Química “CIQ”, ubicado en la ciudad de Quillacollo, presentando en la Tabla N°1 los resultados obtenidos:

Tabla N° 1. Caracterización fisicoquímica estiércol de cerdo

Parámetros	Unidad	Método de Ensayo	Límite de Detección	Resultado
Nitrógeno	%	Kjeldahl	0,01	0,63
Carbohidratos	%	Cálculo indirecto	0,1	31,1
Cenizas	%	Gravimétrico	0,02	4,40
Humedad	%	Gravimétrico	0,02	39,97

Fuente: Centro de Investigación Química, 2018.

Cabe recalcar que el resultado de los parámetros analizados del estiércol de cerdo depende de las proporciones de los distintos ingredientes de la dieta y de su contenido respectivo de nutrientes, el procesamiento del alimento y la cantidad de alimento consumido, además del peso y edad de los cerdos (García, 2000).

Para la producción de biogás se basa en una relación de mezcla teórica agua-estiércol de 3:1 para dar la proporción adecuada de sólidos totales, que no debe ser mayor al 12%, para así garantizar la movilidad de las bacterias dentro la materia orgánica y de esta manera asegurar que el proceso de producción de biogás sea satisfactorio (Moreno, 2011).

El agua empleada en el proceso proviene de un pozo subterráneo; se analizó diferentes parámetros fisicoquímicos para determinar la calidad del agua en el laboratorio del Centro de Investigación Química “CIQ” de Quillacollo. Los resultados de análisis se muestran en la Tabla N° 2:

Tabla N° 2. Parámetros fisicoquímicos del agua

Parámetros	Unidad	Método de Ensayo	Límite de Detección	Resultado	Norma Boliviana NB 512
pH	Adimensional	Potenciométrico	0,01	6,75	6,5 – 9,0
Conductividad	μS/cm	Electroquímico	1	241	1500 μS/cm
Cloro Residual	mg/l	Titulométrico	0,1	<LD	0,2 – 1,0 mg/l
Manganeso	mg/l	Absorción atómica	0,002	<LD	0,1 mg/l
Alcalinidad	mg/l	Titulométrico	0,1	134	370,0 mg/l
Dureza Total	mg/l	Titulométrico	0,1	104	500 mg/l
Hierro Total	mg/l	Absorción atómica	0,005	<LD	0,3 mg/l

Fuente: Centro de Investigación Química, 2018.

Haciendo una comparación de los parámetros fisicoquímicos obtenidos del agua y los valores que se encuentran en la norma NB 512 (IBNORCA, 2004), correspondiente al “Reglamento para el control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”, podemos concluir que el agua que se emplea no afecta negativamente al proceso de producción de biogás.

La temperatura ambiente es una variable determinante en el proceso de producción de biogás debido a que de esta dependerá otro factor muy importante: el tiempo de retención. A lo largo de todo el periodo de producción se hizo un monitoreo diario de la temperatura ambiente en inmediaciones de la UEPB, este control fue realizado por la estación meteorológica de la Universidad a cargo del departamento de Ingeniería Civil.

El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir la mezcla de estiércol con agua y producir biogás (Martí, 2008). Se hizo el monitoreo del tiempo de retención de los lotes para así conocer, de forma experimental, el comportamiento de la producción de biogás bajo estas dos variables importantes para la producción de biogás.

El tiempo de producción de los 4 lotes de producción estudiados, observados en la Figura N° 3, varían entre los 15 y 50 días de retención, que afectó directamente en la cantidad de biogás producido. Se puede observar que el primer lote L-1801, señalado con verde, inicia el 23 de junio y finaliza el 11 de julio, que fue el inicio del segundo lote. Teniendo un total de 50 días como tiempo de retención. El segundo lote L-1802, marcado con azul, inicia el 11 de agosto y concluye el 29 de septiembre, fecha en la que se carga el tercer lote. Este lote tiene un tiempo de retención de 50 días. El tercer lote L-1803, marcado con naranja, inicia el 29 de septiembre y termina el 13 de octubre. Teniendo un tiempo de retención de 15 días. Por último, está el lote L-1804, señalado con color amarillo, inicia el 13 de octubre y finaliza el 13 de noviembre. Teniendo 32 días de retención.

Figura N° 3. Tiempo de retención experimental

2018	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D							
enero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31											
febrero				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28											
marzo				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31								
abril							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
mayo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31										
junio					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30								
julio						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31						
agosto			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31									
septiembre						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
octubre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31											
noviembre			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30										
diciembre					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31							

Fuente: Elaboración propia, 2018.

La producción de biogás se realizó bajo un sistema semi continuo, teniendo como variables la cantidad de estiércol, la cantidad de agua, el tiempo de producción, la temperatura, y el volumen de biogás producido, según se muestra en Tabla N°3.

Considerando la relación teórica estiércol-agua de 3:1, experimentalmente se establecieron valores medidos para esta relación en cada lote de producción.

Tabla N° 3. Variables en la producción de biogás

Lote	Fecha de Carga	Materia Orgánica	Vol. Estiércol	Vol. Agua	Tiempo de Producción (días)	Temp. Prom. °C	Volumen de biogás Producido (m³)
1801	23/06/2018	Seco	1,40 m³	2,0 m³	25	15,2	33,467
1802	11/08/2018	Seco	1,00 m³	2,0 m³	31	16,9	84,328
1803	29/09/2018	Seco	1,00 m³	3,4 m³	15	19,8	64,648
1804	13/10/2018	Húmedo	1,38 m³	3,0 m³	32	19,6	234,363

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Entre los gases que componen el biogás producido se encuentra el sulfuro de hidrógeno que es un gas muy contaminante el cual deteriora los equipos y toda superficie metálica por su naturaleza corrosiva, además de otorga al biogás un olor desagradable. Debido a que la eliminación del sulfuro de hidrógeno es fundamental, se ha propuesto sistema de filtrado, el cual consiste en 4 filtros que tienen un funcionamiento en serie, cuando el caudal de biogás producido es alto, y en paralelo, cuando es necesario el cambio de algún filtro por la saturación del mismo.

Figura N° 4. Sistema de remoción



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Se realizó el análisis cualitativo del biogás para determinar la presencia de sulfuro de hidrógeno en el biogás, el cual consiste en humedecer un papel de ensayo con una solución de acetato de plomo al 1% w/w. Posteriormente, se debe abrir la válvula de muestreo e impregnar este papel con el biogás evitando el contacto del papel con la manguera, esta prueba se debe realizar antes y después del sistema de filtrado (NTE, 1982). Si el papel presenta una coloración oscura existe presencia de sulfuro de hidrógeno, y si el papel no presenta ninguna coloración no existe presencia de sulfuro de hidrogeno (NTE, 1982).

En la Figura N° 5 se muestra un ejemplo del resultado de la prueba anteriormente descrita, la cual se encuentra en los registros de producción.

Figura N° 5. Prueba cualitativa en registro de producción

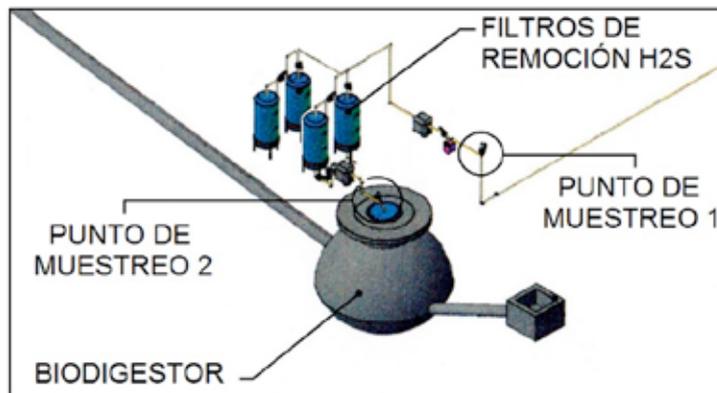
UNIVERSIDAD DE SILEY BOLIVIA		LABORATORIO DE PETRÓLEO GAS Y ENERGÍAS		Registro:	REG-LPGE-UPBG02
		UNIDAD DE PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE BIOGÁS		Fecha:	22/08/2017
		REGISTRO DE PRODUCCIÓN		Versión:	04
FECHA DE CARGA:	23-06-2018	LOTE:	L-1801	$V_T = 3,66435 \cdot \left(\frac{0,15}{3} + H \right)$ $H [m]$	
VOLUMEN DE CARGA DE ESTIÉRCOL:	1,4 [m ³]	GESTIÓN:	11-2018		
VOLUMEN DE CARGA DE AGUA:	2000 L agua				
CARACTERÍSTICAS MATERIA ORGÁNICA:					

N°	FECHA	HORA	LECTURA MEDIDOR [m ³]	VOLUMEN BIOGÁS PRODUCIDO [m ³]	ALTURA GASÓMETRO [m]	VOLUMEN* BIOGÁS ACUMULADO [m ³]	OPERADOR	PRUEBA DE GAS SULFIDRICO- FILTRO		OBSERVACIONES
								ENTRADA	SALIDA	
19	02-07-18	16:36	506,995	19,305	0,0925	0,5221	E. Arendu	[Color]	[Color]	Zancho de llave rojoso Gasómetro
20	03-07-18	04:15	507,289	19,599	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	Amoroso la Pared Blanca en la salida de gasómetro después de 10 minutos de prueba se ve un puntito blanco en el filtro
21	03-07-18	12:00	507,455	19,765	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	
22	03-07-18	15:00	507,507	19,817	0,097	0,5386	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	
23	04-07-18	08:32	507,747	20,057	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	En la salida del gasómetro se ve un puntito blanco
24	04-07-18	12:51	507,913	20,123	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	Quitar el gasómetro y limpiarlo
25	04-07-18	16:19	508,003	20,313	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	
26	05-07-18	08:30	508,084	20,394	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	
27	05-07-18	13:41	508,910	21,22	0,10	0,5496	D. Zabalaga	[Color]	[Color]	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Posteriormente se realizó el análisis cuantitativo del biogás por la empresa QUEBRACHO S.R.L., la cual efectuó la medición in situ de los primeros tres lotes de producción en dos puntos de muestreo: el punto de muestreo 1 fue después del medidor y de los filtros de remoción, y el punto de muestreo 2 está ubicado a la salida del biodigestor antes del sistema de filtrado como se puede observar en la Figura N° 6.

Figura N° 6. Puntos de muestreo



Fuente: Elaboración propia, 2018.

La empresa QUEBRACHO S.R.L. reportó los resultados de los análisis realizados a los tres primeros lotes de producción, los cuales se observan en la Tabla N° 4:

Tabla N° 4. Análisis Cuantitativo del biogás

Compuesto	L-1801		L-1802		L-1803		Unidad
	Punto 2	Punto 1	Punto 2	Punto 1	Punto 2	Punto 1	
Metano (CH ₃)	57,1	55,8	71,2	71,4	68,2	69,6	%
Dióxido de carbono (CO ₂)	54	54,1	36	36,4	35,8	37	%
Oxígeno (O ₂)	0	0,1	0,1	0	0	0	%
Sulfuro de hidrogeno (H ₂ S)	>200	0	>200	0	>200	0	ppm
Monóxido de carbono (CO)	100	60	152	14	40	15	ppm

Fuente: Elaboración propia, 2018.

El bajo contenido de metano en el lote L-1801 se debe al funcionamiento del biodigestor después de un largo periodo de tiempo inactivo. Entre otros resultados podemos ver que la cantidad de sulfuro de hidrógeno tiene una reducción considerable del biogás analizado antes del sistema de filtrado, con más de 200 ppm, al biogás analizado después del sistema de filtrado donde el resultado es 0 ppm en los tres lotes. Esto indica que el arreglo de filtros implementados en la UEPB tiene un buen rendimiento, eliminando cualquier traza de contaminante y acondicionando el biogás dentro de los rangos especificados (IDAE, 2007), para que este biocombustible sea apto para su uso en cualquier equipo o proceso posterior.

Pruebas de combustión

Se hizo pruebas de combustión con el biogás que se produjo en la primera prueba; se conectó una válvula con manguera a una de las salidas del biogás y con la ayuda de un encendedor se pudo quemar el biogás como se observa en la Figura N° 7. Esta llama era transparente, casi imperceptible, por lo que se tuvo que acercar una hoja de papel para poder visualizar la combustión.

Figura N° 7. Primera prueba de combustión



Fuente: Elaboración propia, 2018.

La segunda prueba consistió en hacer hervir un vaso con 480,5 g de agua, y controlando la temperatura, el flujo del biogás y el tiempo cada 5 minutos. Una vez pesado el vaso con agua, se procedió a conectar una manguera a una de las salidas del biogás, y esta, a un quemador construido en laboratorio, el cual fue adaptado a una especie de camisa para evitar las pérdidas de calor, como se puede ver en la Figura N° 8. El agua en este paso logró la ebullición en 30 min de una temperatura inicial de 22 °C a 90 °C consumiendo un total de 0,038 m³ de biogás, ver tabla N°5.

Figura N° 8. Segunda prueba de combustión



Fuente: Elaboración Propia, 2018.

Tabla N° 5. Pruebas de combustión

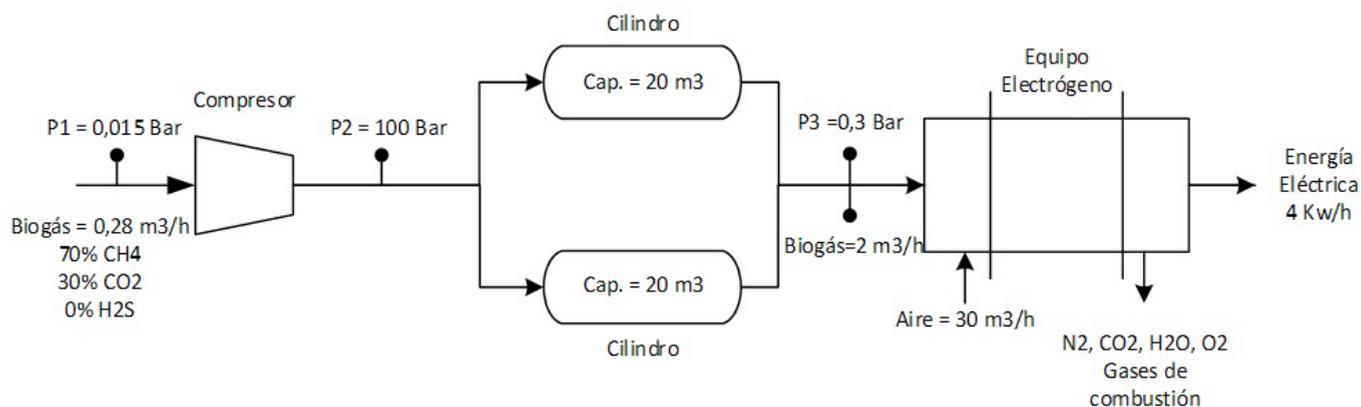
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Flujo Biogás (m ³)
0	22	904,689
5	41	904,695
10	54	904,700
15	69	904,706
20	79	904,711
25	85	904,716
30*	90	904,721
35	91	904,727

Fuente: Elaboración propia, 2018.

SISTEMA DE COGENERACIÓN

La cogeneración se inicia con el biogás almacenado en la campana, la presión en este punto es de 750 mbar, lo cual no es adecuado para el ingreso al equipo electrógeno, por lo que es necesario que el biogás ingrese a un compresor y posterior sea almacenado en cilindros para lograr la alimentación al equipo electrógeno bajo condiciones adecuadas y controladas de temperatura y presión, la Figura N° 9 muestra una descripción general del proceso de cogeneración propuesto.

Figura N° 9. Diagrama de producción del Sistema de Cogeneración



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los equipos necesarios para cumplir con los requerimientos del proceso de cogeneración son:

a. Compresor

El biogás que se almacena en la campana se encuentra a 15 mbar de presión, lo cual no es adecuado para el ingreso al equipo electrógeno, por lo que es necesario que el biogás ingrese a un compresor, detallado en la Tabla N°6:

Tabla N° 6. Compresor

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Potencia:	3 hp, 2,25 kW 2 polos/1.200 rpm
Alimentación:	220 volts; 50 Hz; 1 fase
Presión máxima operación:	140 psi / 9,7 bar
Presión mínima operación:	100 psi / 6,9 bar
Capacidad estanque:	200 litros
Cabezal	1 etapa 2 cilindros en línea/volumen de aceite 520 ml
Desplazamiento	15 pies cúbicos/min - 425 l/min-14,9 cfm
Dimensiones:	450 x 850 x 1300 mm
Peso:	183,1 kg

Fuente: Schuitz, 2019.

b. Cilindros de almacenamiento

Una vez que se tiene el biogás comprimido hasta aproximadamente 100 Bar, este será almacenado en cilindros los cuales tienen una capacidad de almacenamiento de gas de 20 m³, para tener condiciones adecuadas para el ingreso al equipo electrógeno. La Tabla N°7 presenta las especificaciones técnicas del cilindro de almacenamiento.

Tabla N° 7. Cilindro de almacenamiento

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Marca	Improcil
Capacidad	90 Litros
Material	Acero cromo molibdeno
Accesorio	Válvula de cilindro
Tipo de costura	Sin costura
Características	Producto terminado de bajo peso

c. **Equipo electrógeno**

El equipo electrógeno es el encargado de generar energía eléctrica a partir del biogás producido, a este ingresa el biogás a una presión de 300 mbar. En la Tabla N°8 se detallan las especificaciones técnicas del equipo electrógeno mencionado:

Tabla 8. Equipo electrógeno

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Lugar de origen	Shandong, China (continental)
Nombre de la marca	TMTC
Número de modelo	TG70GF
Potencia nominal	70 kW – 93,8 HP
Presión de alimentación	300 mbar
Tipo de salida	AC trifásico
Tensión nominal	110 / 220V o 220 / 380V
Corriente nomina	126 ^a
Tipo de Motor	Ciclo Otto 4 tiempos
Velocidad	1500 / 1800rpm
Frecuencia	50 / 60HZ
Tipo de gas	Biogás
Relación de compresión	12:1
Sistema de control	Weichai
Sistema de encendido	Marca Bosch
Marca mezcladora	Marca impco USA
Reductor de presión de gas	Marca de Italia Madas
Bloqueador de fuego	Clase industrial
Alternador	Stamford / Marathon / Mecc alte
Opciones	Caldera CHP
Garantía	1 año o 3000 horas de funcionamiento

Los cálculos realizados fueron basados funcionamiento del tipo de motor que tiene el equipo electrógeno, el cual es de ciclo Otto de 4 tiempos (Cengel & Boles, 2012).

Composición del biogás

La composición del biogás se detalla en la Tabla N°9:

Tabla 9. Composición del biogás

Componente	% Vol	X_i	PM (Kg/Kmol)	PCi (Kcal/Kg)	PCi * X_i
CH ₄	70	0,7	16	11954,4	8367,8
CO ₂	30	0,3	44	-	-

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Peso moléculas

El peso de las moléculas se calcula con la ecuación 1:

$$\overline{PM} = \sum X_i * PM_i \quad (1)$$

$$\overline{PM} = (0,7 * 16) + (0,3 * 44)$$

$$\overline{PM} = 24,4 \left[\frac{g}{mol} \right]$$

Poder calorífico

El poder calorífico se calcula con la ecuación 2:

$$PC_i = \sum X_i * PC_i \quad (2)$$

$$PC_i = X_{CH_4} * PC_{i_{CH_4}} + X_{CO_2} * PC_{i_{CO_2}}$$

$$PC_i = 8367,8 \left[\frac{kcal}{kg} \right] * \frac{4,1868 \text{ kj}}{1 \text{ kcal}}$$

$$PC_i = 35034,30 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Energía eléctrica producida por 1 m³ de biogás

La energía eléctrica producida por 1 m³ de biogás es calculada mediante la ecuación 3:

$$\dot{W}_N = \dot{Q}_H - |\dot{Q}_L| \quad (3)$$

$$\dot{W}_N = 190,17 - 70,85$$

$$\dot{W}_N = 119,32 \left[\frac{KJ}{min} \right]$$

$$\dot{W} = 119,17 \frac{KJ}{min} * \frac{1[min]}{60[s]}$$

$$Pot = W = 1,98 \left[\frac{KJ}{s} \right] = 2[KW]$$

Tabla N° 11. Coloración según tiempo de retención

Coloración	Promedio de Temperatura (°C)	Tiempo de Retención (días)
	20	30
	18	35
	15-16	40

Fuente: Elaboración propia, 2019.

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ANUAL

Con el cálculo que 1 m³ de biogás produce 2 kW de energía eléctrica, se estima la producción para un total de nueve lotes correspondientes a un año de funcionamiento, como se muestra en la Tabla N° 12:

Tabla N° 12 Estimación de la producción

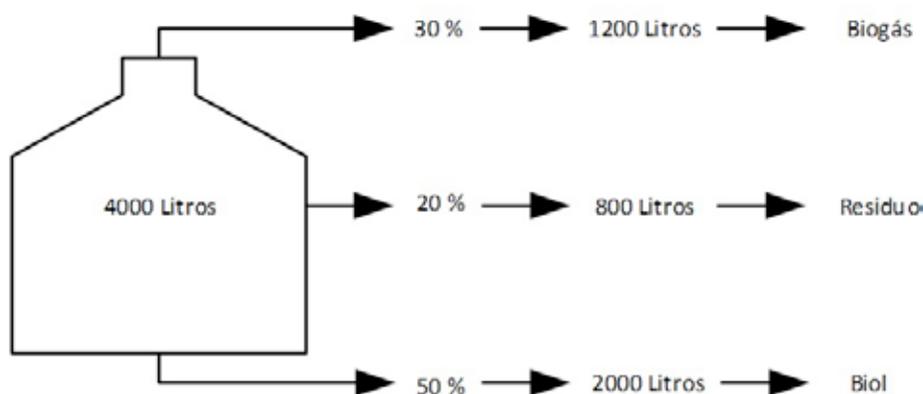
Lote	Biogás (m ³)	TR (días)	Energía Eléctrica (kW)
L-1901	33,514	35	67,028
L-1902	81,607	30	163,214
L-1903	175,767	35	351,534
L-1904	292,953	40	585,906
L-1905	385,03	40	770,06
L-1906	477,107	40	954,214
L-1907	498,036	35	996,072
L-1908	495,946	30	991,892
L-1909	565,004	30	1130,008
TOTAL	3004,964		6009,928

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Durante la digestión, aproximadamente entre el 25 y el 30% del total de la materia seca (el contenido total de sólidos en estiércol fresco) del estiércol animal/humano se convierte en gas combustible y los residuos de entre 70 y 75% del contenido total de sólido del estiércol fresco es un residuo conocido como biol digerido o biol de biogás (Warnars & Oppenoorth, 2014).

Para fines de cálculo, se asumió una nueva relación de producción, en la que se considera un 20% de pérdidas o residuo, el cual puede ser materia que queda en el reactor y no logra salir como biol como se ve en la Figura 11:

Figura N° 11. Relación de producción asumida



Fuente: Elaboración propia, 2019.

Teniendo la relación de producción teórica, se puede determinar la cantidad de biogás que se llegaría a producir a partir de 1200 litros de estiércol tras una producción constante, basado en los cálculos realizados por Jiménez (2018), una vez que el biodigestor llegue a estabilizar su funcionamiento, ecuación 4:

$$\begin{aligned}
 \text{Biogás producido} &= \text{Materia prima} * \rho_{\text{estiércol}} * \frac{1}{\rho_{\text{biogás}}} \quad (4) \\
 \text{Biogás producido} &= 1,2[\text{m}^3]_{\text{MP}} * 1166 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] * \frac{1}{1,2 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]} \\
 \text{Biogás producido} &= 1166 [\text{m}^3]
 \end{aligned}$$

De esta manera se puede concluir que el biodigestor se estabilizará aproximadamente en el lote 18, cuando se llegue a una producción de biogás de 1166 m³ como se aprecia en la Tabla N° 13:

Tabla N° 13. Estabilización de la producción

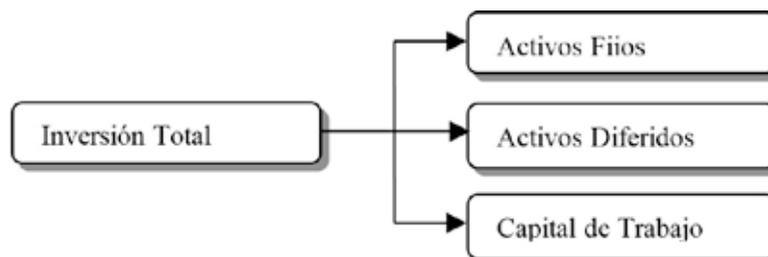
Lote	Volumen de Producción (m ³)
Lote-1909	565,00
Lote 1910	683,69
Lote 1911	753,65
Lote 1912	823,61
Lote 1913	893,57
Lote 1914	963,54
Lote 1915	1033,50
Lote 1916	1103,46
Lote 1917	1173,42
Lote 1918	1166,00
Lote 1919	1166,00

Fuente: Elaboración propia, 2019.

ANÁLISIS ECONÓMICO

En la Figura N° 12 se muestra la estructura que el proyecto emplea con el fin de sistematizar y organizar la información económica basado en lo que indica Jiménez (2004).

Figura N° 12. Estructura del proyecto



Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la Tabla N°14 se muestra la inversión total del proyecto.

Tabla N° 14. Inversión total

Concepto	Valor (Bs.)	Valor (\$us).	Porcentaje
Inversión Fija	216.721,88	31.093,53	92%
Inversión Diferida	8.564,00	1.228,69	4%
Inversión Capital de Trabajo	9.757,50	1.399,93	4%
TOTAL	235.043,38	33.722	100%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Costos de producción de biogás y energía eléctrica

En las tablas N°15 y 16 se presentan los costos de producción de biogás y energía eléctrica respectivamente:

Tabla N° 15 Producción de biogás

PERIODO	Año 0	Año 1	Año estándar
Costo de producción biogás (Bs.)	9.757,50	9.757,50	9.757,50
Cantidad producida del biogás (m³)	3.004,96	8.593,79	1.0494
Precio de costo unitario (Bs.)	3,25	1,14	0,93

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla N° 16 Producción de energía eléctrica

PERIODO	Año 0	Año1	Año estándar
Costo de producción energía eléctrica (Bs.)	9.757,50	9.757,50	9.757,50
Cantidad producida de energía eléctrica (kW)	6.009,93	17.187,58	20.988,00
Precio de costo unitario (Bs.)	1,62	0,57	0,46

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Consumo de energía eléctrica UNIVALLE

La Tabla N°17 presenta el consumo de energía eléctrica de la gestión 2018, que se demuestra con consumo promedio mensual de 49,950 kW.

Tabla N° 17 Consumo eléctrico en UNIVALLE

Mes	Consumo (kW)	Precio (Bs)
Enero	35.400	43.188
Febrero	38.300	46.726
Marzo	55.400	67.588
Abril	56.600	69.052
Mayo	55.600	67.832
Junio	55.500	67.710
Julio	46.500	56.730
Agosto	54.000	65.880
Septiembre	49.400	60.268
Octubre	55.100	67.485
Noviembre	56.400	68.808
Diciembre	41.200	50.264
PROMEDIO	49.950	60.961

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Producción de energía eléctrica del sistema de cogeneración

En la Tabla N°18 muestra ganancias considerando la producción de energía eléctrica por el sistema de cogeneración, tomando en cuenta el costo que la entidad paga por el consumo de energía eléctrica.

Tabla N° 18 Ingresos por kW generado por el sistema de cogeneración

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO ESTANDAR
Energía eléctrica (kW)	6009,93	17187,58	20988,00
P.U. por kW de energía eléctrica (Bs.)	1,22	1,22	1,22
INGRESO por energía eléctrica	7332,11	20968,85	25605,36

Fuente: Elaboración propia, 2019.

DISCUSIÓN

Las variables operacionales más importantes son la temperatura y tiempo de retención, las cuales influyeron de gran manera en la producción, puesto que las cargas de los lotes se realizaron en época de invierno donde se tuvo un promedio de temperatura de 17,9 °C en inmediaciones de la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB), también se asumieron tiempos de retención cortos en relación a estas temperaturas registradas, por esta razón se plantea un cronograma de carga con el fin de optimizar el funcionamiento del biodigestor.

En la producción de los cuatro lotes se logró obtener 416,806 m³ de biogás, pero como se puede observar en los resultados, el lote L-1803 tuvo una baja producción debido al corto tiempo de retención a lo cual se propone los tiempos de retención de acuerdo con estación y temperatura de la zona. Es necesario tomar en cuenta el biol como subproducto del proceso de producción de biogás, ya que se obtiene cantidades importantes de este biofertilizante en cada lote de producción, por esta razón se debe considerar su comercialización con el objetivo de lograr la rentabilidad económica del proyecto.

Es importante tener en cuenta que el funcionamiento del biodigestor se estandarizará una vez que el 70 % y 30% de la materia orgánica que se introduce se convierta en biol y biogás respectivamente, esto incide de manera directa en la economía del proyecto, ya que se tendrá un periodo de arranque en el cual se tendrá un bajo retorno.

Conclusiones

El biogás producido en la UEPB tiene un contenido de metano (CH₄) de 70% y dióxido de carbono (CO₂) de 30%, además de eliminar el Sulfuro de hidrogeno a 0 ppm presente en el biogás.

El sistema de cogeneración comprende un compresor de 3HP de potencia, cilindros de almacenamiento sin costura y el equipo electrógeno marca TIGER el cual tiene una potencia de 93,8 HP.

Se propuso un cronograma de funcionamiento semi continuo para la UEPB, que consta de nueve lotes de carga, estimando una producción de 3004,96 (m³) de biogás el primer año, 8593,79 (m³) el siguiente año y 10494 (m³) a partir del año estándar del cual se generarán 20.988,00 kW/año.

El proyecto tiene una inversión total de \$us. 33.722. La universidad gasta un promedio anual por energía eléctrica de Bs. 60.961. El sistema de cogeneración genera un ingreso de Bs. 25.605. Teniendo así un ahorro de Bs. 35.356 anualmente en energía eléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cengel, Y., & Boles, M. (2014). Termodinámica (Octava ed.). Mexico D.F.: McGraw-Hill.
- Centro de Investigación Química "CIQ" (2019)
- Compresores del Perú. (16 de Marzo de 2019). Obtenido de Compresores del Perú: <https://www.lacasadelcompresor.com.pe/productos/compresores-schulz/>
- Garcia, A. (2000). Calidad alimentaria de la mezcla estiercol de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol, para bovinos de engorda. Colima: Universidad de Colima.
- IDAE. (2007). Biomasa: Digestores Anaerobios. Madrid: BASEL.
- Jiménez, G. (2018). Diseño de un Biodigestor para la obtención de Biogás y Biol a partir de los residuos orgánicos del Botadero Municipal de Cliza-Cochabamba. Cochabamba.
- Jiménez, J. (2004). Manual de Proyectos de Inversión. Santa Cruz: UPSA.
- Laboratorio Ambiental "QUEBRACHO S.R.L." (2019)
- Laboratorio Petróleo, G. y. (2008). Manual de Funcionamiento Unidad de Producción Experimental de Biogás Univalle. Cochabamba: Univalle.
- Marti, J. (2008). Biodigestores Familiares. Guía de Diseño y Manual de Instalación. La Paz: Creative Commons.
- Norma Boliviana NB – 512. (2005). Control de calidad del agua para el consumo humano.
- Norma Técnica Ecuatoria, NTE INEN 679 (1982). “Gas licuado de petróleo determinación del sulfato de hidrogeno, método acetato de plomo”.

Moreno, M. T. (2011). Manual de Biogás. Santiago: FAO.
Tiger. (16 de Abril de 2019). Tiger. Obtenido de Tiger: <http://www.tigermg.com/>
Warnars, L., & Oppenoorth, H. (2014). El biol: El fertilizante supremo. Hivos.

Derechos de Autor (c) 2019 Diego Zabalaga Lobo. Carla Apaza Rojas. Tomás Peredo Rocabado.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)