

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ciencias

Escuela Académico Profesional de Física Aplicada

“Evaluación de la producción de biogás, bioabono y biol
en un Biodigestor Chino Mejorado, en zonas andinas”

TESIS

Presentada por:

Bach. Cristian Amusquivar Coaquira

Para optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

TACNA-PERÚ

2015

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA
FACULTAD DE CIENCIAS**

TESIS N° 236

**TÍTULO PROFESIONAL DE:
"Licenciado en Física aplicada"**

El Secretario Académico Administrativo de la Facultad de Ciencias certifica que con Resolución de Facultad N° 7974-2014-FACI-UN/JBG ha designado como jurados para la sustentación de tesis:

"Evaluación de la producción de biogás, bioabono y biol en un Biodigestor Chino Mejorado, en zonas andinas" el mismo que está conformada por:

PRESIDENTE : DR. SEGUNDO MANUEL ALVARADO CONTRERAS
SECRETARIO : MSc. CARLOS ARMANDO POLO BRAVO
VOCAL : MSc. HUGO ALFREDO TORRES MURO

Para examinar y calificar el trabajo de Tesis sustentado en acto público el día **11 de diciembre del 2014**.

Presentado por el señor Bachiller: **CRISTIAN AMUSQUIVAR COAQUIRA**, de la Escuela Académica Profesional de **FÍSICA APLICADA**.

El jurado calificador, en forma secreta e individual se pronuncio sobre el calificativo del trabajo expuesto y procedió a emitir el siguiente resultado:

Aprobado por unanimidad con tres votos a favor y promedio de Bueno.

Para ratificar lo detallado firman:



Dr. Segundo Manuel Alvarado Contreras
Presidente



MSc. Carlos Armando Polo Bravo
Secretario



MSc. Hugo Alfredo Torres Muro
Vocal

*A dios y a mis queridos padres:
Ynocencio Amusquivar Colque y Yolanda
Coaquira Mamani con mucho cariño y
gratitud por su apoyo condicional*

AGRADECIMIENTO

A MSc. Cesar E. Rivasplata Cabanillas por haberme guiado en este largo viaje de aprendizaje y formación académica.

Reconocimiento especial al Lic. Pedro F. Zanabria Pacheco por la confianza que tuvo en mí y todos los conocimientos que aportó conmigo; por su paciencia y por el tiempo dedicado.

A los profesores de la Escuela Académica Profesional de Física Aplicada

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1	4
DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivos generales.....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Hipótesis	7
1.4 Operación de las variables de estudio	7
CAPÍTULO 2	9
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	9
2.1 Panorama de las energías renovables en el Perú	9
2.1.1 Energía solar en la región del cusco	13
2.1.2 Energía de la biomasa.....	17
2.2 Antecedentes	20

2.3	Tipos de biodigestores	26
2.3.1	Biodigestor Olade Guatemala.....	27
2.3.2	Biodigestor tipo chino	28
2.3.3	Biodigestor tipo hindú	29
2.3.4	Biodigestor tipo tubular	30
2.4	Biodigestor Modelo Chino Mejorado	32
2.4.1	Dimensiones del Biodigestor Modelo Chino Mejorado	35
2.4.2	Sistema de distribución del biogás	36
2.5	Proceso de la digestión.....	39
2.5.1	Digestión aeróbica.....	39
2.5.2	Digestión anaeróbica.....	43
2.6	Parámetros de una digestión anaeróbica.....	46
2.6.1	Temperatura.....	46
2.6.2	Humedad relativa	48
2.6.3	Nivel de pH.....	48
2.6.4	Concentración de carbón / nitrógeno.....	49
2.7	Producto de una digestión anaeróbica.....	51

2.7.1	Biogás	51
2.7.2	Bioabono	52
2.7.3	Biol	55
2.8	Transferencia de calor en plantas de biogás	56
2.8.1	Biodigestor sin aislamiento e invernadero	60
2.8.2	Biodigestor con aislamiento e invernadero	68
2.9	Poder calorífico del biogás.....	77
CAPÍTULO 3		79
METODOLOGÍA Y RECURSOS EMPLEADOS.....		79
3.1	Tipo de investigación	79
3.2	Diseño de la investigación	79
3.3	Población	80
3.3.1	Muestra	80
3.4	Descripción del trabajo realizado	80
3.3.2	Proceso de carga al biodigestor	80
3.3.3	Evaluación del Biodigestor Chino Mejorado	81
3.5	Asignación de recursos.....	82

3.3.1	Recursos humanos.....	82
3.3.2	Recursos materiales.....	82
CAPÍTULO 4	83
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
4.1	Procesode carga de lodo al biodigestor.....	83
4.2	Análisis de transferencia de calor.....	84
4.2.1	Evaluación del calentamiento del lodo.....	85
4.2.2	Evaluación del sistema de aislamiento	87
4.2.3	Evaluación del aporte térmico del invernadero al biodigestor.....	88
4.2.4	Evaluación de la eficiencia térmica del biodigestor.....	91
4.3	Evolución de la temperatura durante la evaluación del biodigestor.....	92
4.3.1.	Primera carga.....	92
4.3.2.	Segunda carga	98
4.4	Evolución de la radiación solar.....	104
4.5	Producción de biogás, biol y bioabono.....	106
4.4.1	Producción de biogás.....	106
4.4.2	Producción de biol	108

4.4.3	Producción de bioabono.....	110
4.4.4	Análisis económico.....	111
4.6	Discusión de los resultados.....	113
CAPÍTULO 5		116
5.1	Conclusiones.....	116
5.2	Recomendaciones	118
BIBLIOGRAFÍA		119
1.	Referencia bibliográficas.....	119
2.	Referencia electrónicas.....	123
ANEXOS.....		126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°01: Rangos de temperatura y tiempo de retención.....	47
Tabla N°02. Características de los residuos orgánicos en la fermentación anaeróbica existentes en el medio rural.....	50
Tabla N°03. Parámetros de los coeficientes de transferencia de calor por conducción, convección y evaporación	67
Tabla N°04. Medidas para el cálculo de la transferencia de calor.....	68
Tabla N°05. Valores para la primera carga.....	83
Tabla N°06. Valores para la segunda carga	84
Tabla N°07. Parámetros ambientales para la primera carga	92
Tabla N°08. Parámetros en el biodigestor para la primera carga	93
Tabla N°09. Parámetros ambientales en un día para la primera carga.....	95
Tabla N°10. Parámetros en el biodigestor en un día para la primera carga	96
Tabla N°11. Parámetros ambientales para la segunda carga	98
Tabla N°12. Parámetros en el biodigestor para la segunda carga	99

Tabla N°13. Parámetros ambientales en un día para la segunda carga	101
Tabla N°14. Parámetros en el biodigestor en un día para la segunda carga.....	102
Tabla N°15. Radiación solar diaria	104
Tabla N°16. Producción de biogás 1 carga	106
Tabla N°17. Producción de biogás 2 carga	107
Tabla N°18. Poder calorífico del biogás	107
Tabla N°19 Producción de biol para la primera carga	108
Tabla N°20. Producción de biol para la segunda carga	109
Tabla N°21. Análisis del biol	109
Tabla N°22. Análisis del bioabono	110
Tabla N°23. Inversión para el primer año	111
Tabla N°24. Beneficio económico por año	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°01: Mapa de radiación solar del departamento del Cusco promedio diario.....	15
Figura N°02: Mapa de radiación solar incidente diaria promedio anual del Perú	16
Figura N°03: Mapa de generación de recursos energéticos renovables en el Perú.	19
Figura N°04: Tipos de biodigestores	26
Figura N°05: Biodigestor Olade Guatemala	28
Figura N°06: Biodigestor tipo chino	29
Figura N°07: Biodigestor tipo hindú	30
Figura N°08: Biodigestor tipo tubular	31
Figura N°09: Partes del Biodigestor Modelo Chino Mejorado	33
Figura N°10: Biodigestor Modelo Chino Mejorado	34
Figura N°11: Dimensiones del Biodigestor Modelo Chino Mejorado	35
Figura N°12: Sistema de distribución del biogás	36
Figura N°13: Trampa de vapor de agua	37
Figura N°14: Manómetro en forma de U	38
Figura N°15: Quemador de biogás	38
Figura N°16: Proceso de digestión anaeróbica	45
Figura N°17: Nivel de pH adecuados para la fermentación.....	49
Figura N°18: Ubicación de los sensores de temperatura	56

Figura N°19: Red de resistencias térmicas con aislamiento (perdidas).....	60
Figura N°21: Red de resistencias térmicas (ganancia)	73
Figura N°22: Poder calorífico de combustibles	78
Figura N°23: Ubicación de los sensores de temperatura	82
Figura N°24: Variación de la temperatura de mezcla respecto a la temperatura del lodo (sin aislamiento)	85
Figura N°25: Variación de la temperatura de mezcla respecto a la temperatura del lodo (con aislamiento)	86
Figura N°26: Variación de la temperatura del lodo respecto a la temperatura del invernadero.	89
Figura N°27: Evolución de temperaturas promedios diarios 1 carga	93
Figura N°28: Evolución de temperaturas promedios semanales 1 carga	94
Figura N°29: Promedios de temperaturas 1 carga	95
Figura N°30: Evolución de temperaturas para un día 1 carga	96
Figura N°31: Evolución de temperaturas y humedad relativa promedio diario1 carga.	97
Figura N°32: Evolución de temperaturas promedios diarios 2 carga	99
Figura N°33: Evolución de temperaturas promedios semanales 2 carga	100
Figura N°34: Promedios de temperaturas 2 carga	101
Figura N°35: Evolución de temperaturas para un día2 carga	102
Figura 36: Evolución de temperaturas y humedad relativa promedio diario 2 carga	103

Figura N°37: Evolución de la radiación solar	104
Figura N°38: Evolución de la radiación solar en comparación a las temperaturas...	105
Figura N°39: Conductividad térmica de los materiales	126
Figura N°40: Coeficiente de transferencia de calor por convección	127
Figura N°41: Equivalencias de la presión atmosférica	128
Figura N°42: Propiedades del agua liquido saturado	129
Figura N°43: Emisividad de diversos materiales	130
Figura N°44: Análisis del biol	131
Figura N°45: Análisis del bioabono	132
Figura N°46: Dimensiones del biodigestor - vista superior	133
Figura N°47: Vista del biodigestor	134
Figura N°48: Producción de biogás	134
Figura N°49: Quemado del biogás	135
Figura N°50: Biol y bioabono	135

RESUMEN

Este trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Capacitación para el Desarrollo (CECADE) Qosqo Yachay Wasi, ubicada en el distrito de Yaurisque, provincia de Paruro, departamento del Cusco, a 3 300 m.s.n.m. Se utilizó el Biodigestor Modelo Chino Mejorado para la evaluación de la producción de biogás, biol y bioabono usando dos tipos de cargas de una mezcla de residuos orgánicos con agua caliente a una temperatura promedio de 25°C.

Se evaluó el comportamiento térmico del biodigestor relacionado con el sistema de aislamiento e implementación de un invernadero, para optimizar su producción.

Los resultados obtenidos nos muestran una eficiencia térmica del biodigestor del 29,89% para una temperatura media en el lodo de 18°C, temperatura dentro del invernadero de 22°C y temperatura media del ambiente a 14°C, produciendo entre 0,13m³ y 0,35 m³ de biogás por día.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo evaluar la producción de biogás, bioabono y biol empleando un Biodigestor Chino Mejorado, en conexión con el uso adecuado de la biomasa como materia orgánica existente en las zonas alto andinas.

En el capítulo 1 se desarrolló la parte descriptiva de la investigación, en donde se plantea lo difícil que es producir biogás a temperaturas promedio entre 8°C a 12°C (Senamhi, 2003), poniéndose como hipótesis que es necesario aislar térmicamente el biodigestor, construir un invernadero sobre el biodigestor y realizar la mezcla del sustrato con agua caliente, todo esto para acelerar la producción de biogás, bioabono y biol.

En el capítulo 2 se muestra el desarrollo del fundamento teórico, donde se han considerado temas como: la energía solar, la energía de la biomasa, tipos de biodigestores, Biodigestor Chino Mejorado, proceso de la digestión, parámetros y producto final de una digestión anaeróbica y ecuaciones de transferencia de calor.

En el capítulo 3 se describe la parte metodológica de la investigación, el tipo de investigación, la asignación de recursos y el trabajo realizado, desde la elección de la materia orgánica, hasta el proceso de carga al biodigestor;

evaluando el comportamiento térmico del biodigestor, con la toma de temperaturas.

En el capítulo 4 se ofrecen los resultados obtenidos, el comportamiento térmico, la eficiencia térmica, la producción de biogás, bioabono y biol, y su debido análisis y discusión.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta tesis.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Sabiendo que en la actualidad el tema de energías renovables es un tema que ha retomado vigencia e importancia en el contexto global debido a la sobre explotación y el agotamiento de los combustibles fósiles, y el alto nivel de contaminación e impacto ambiental que producen; el hombre se ha visto en la necesidad de buscar fuentes energéticas renovables y el desarrollo de tecnologías limpias que permitan la preservación del equilibrio de los ecosistemas.

Un claro ejemplo de tecnología limpia es la construcción de biodigestores para aprovechar la energía producida por la biomasa, término con el que se refiere a toda la materia orgánica.

Un biodigestor es un sistema que bajo condiciones adecuadas de: temperatura, nivel de pH, proporciones de mezcla (residuos orgánicos y agua), relación de carbón y nitrógeno C/N, etc. facilitan el crecimiento y la proliferación de un grupo de bacterias anaerobias metanogénicas de

fermentación, que descomponen en ausencia del aire la materia orgánica obteniéndose en este proceso lo siguiente:

- Una mezcla de gases (metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2) conocido genéricamente como biogás.
- Efluentes: Denominados biol y bioabono, que son los residuos de la fermentación.

En zonas alto andinas entre los 3000 a 4000 m.s.n.m., caracterizadas por tener bajas temperaturas diarias medias anuales entre 8°C a 12°C (Senamhi, 2003), la producción de biogás es deficiente y en algunas ocasiones nula esto debido a la temperatura y al tiempo de retención de la materia orgánica a descomponer en el biodigestor (por más de 4 meses), la cual requiere temperaturas mayores a las indicadas (OEKOTOP, 1987).

Por lo tanto nos planteamos el siguiente problema de investigación:

¿Cómo se puede disminuir el tiempo de retención para aumentar la producción de biogás, bioabono y biol, con el uso de un Biodigestor Chino Mejorado en zonas andinas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

- Evaluar la producción de biogás, bioabono y biol empleando un Biodigestor Chino Mejorado de uso en zonas andinas

1.2.2 Objetivos específicos

- Optimizar la relación de mezcla de los insumos orgánicos para el proceso de biodigestión.
- Evaluar el comportamiento térmico del biodigestor en relación con la temperatura del lodo de carga, al sistema de aislamiento y al aporte térmico del invernadero sobre la temperatura del lodo dentro del biodigestor.
- Determinar el perfil de temperaturas desde el inicio de carga y durante el tiempo de retención, hasta la producción de biogás, biol y bioabono, utilizando dos tipos de mezclas.
- Cuantificar la producción del biogás, biol y bioabono, en cada ciclo de carga y descarga.

1.3 Hipótesis

Para disminuir el tiempo de retención y aumentar la producción de biogás, bioabono y biol de un Biodigestor Chino Mejorado en zonas andinas, se debe mezclar la materia orgánica con agua caliente a la más alta temperatura, aislar el piso y paredes del biodigestor y construir un invernadero encima del sistema.

1.4 Operación de las variables de estudio

1.4.1. Variables independientes

- Temperatura ambiental de la zona
- Composición del sustrato: Es el porcentaje de diferentes residuos sólidos que contiene una mezcla con una relación adecuada de carbono/nitrógeno (de 20/1 a 30/1) y humedad relativa (85% a 95%).

1.4.2. Variables dependientes

- Temperatura dentro del invernadero
- Temperatura del lodo dentro del biodigestor
- Temperatura del biogás
- Temperatura del lodo a echar

1.4.3. Variables intervinientes

- Radiación solar de la zona
- Nivel de pH del lodo (mezcla de excretas con agua) a echar:
Indica si el lodo esta ácido, básico o neutro, lo óptimo es un nivel de pH neutro

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Panorama de las energías renovables en el Perú

En el Perú se habla desde muchos años de la importancia de las energías renovables. Se han realizado, y siguen realizándose, estudios y diagnósticos del potencial de las diferentes energías renovables como de su uso.

A pesar de todo este esfuerzo, los resultados son todavía bastante limitados y, generalmente, distan mucho de lo esperado al iniciarse las diferentes actividades en ese campo. Como ejemplo mencionamos que el Ministerio de Energías y Minas (MINEM), en sus planes de electrificación rural, indica desde muchos años metas a más de 6000 Sistemas Fotovoltaicos Domiciliarios (SFD), instalados por año, sin embargo, en su principal proyecto, iniciado en 1999 con co-financiación del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) se habían logrado instalar 4500 SFD. Recién en los inicios del 2013 se está tomando una mayor iniciativa por parte del gobierno, lográndose instalar 1600 SFD. Pero la intención es hacerlo masivo, con una meta de 500 mil paneles solares

entre el 2014 y 2015, lo que beneficiará a más de dos millones de peruanos. (MINEM, 2013).

A parte de lo indicado, es bueno resaltar los siguientes puntos de vista:

- Si hay disponibilidad de energía hidráulica en un lugar, la electricidad producida con ella por una mini o pico turbina es más barata que la electricidad producida con aerogeneradores, y si hay vientos regulares con velocidades mayores de 4 a 5 m/s en un lugar, la electricidad producida con pequeños aerogeneradores es más barata que la electricidad generada con paneles fotovoltaicas. (MINEM, 2013).
- Sin embargo, en muchos lugares no existe ni energía hidráulica ni energía eólica en forma regular, pero en la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante uniforme durante todo el año, estando casi siempre dentro de un margen de +/- 20 % del promedio anual. En términos generales, este promedio anual es de 4 a 5 kWh/m²día en la costa y selva y de 5 a 7kWh/m²día, aumentando de norte a sur.(MINEM, 2013).
- Para la electrificación rural de zonas alejadas de la red, donde vive todavía el 25% de la población del Perú, en muchas regiones la electrificación fotovoltaica es a corto y mediano plazo la solución más

viable. A pesar de que esta situación es ampliamente reconocida, relativamente poco se ha hecho hasta la fecha en este campo. Esto se explica por varias razones, principalmente porque es más costoso electrificar regiones remotas y aisladas que regiones que pueden incorporarse a la red interconectada.(Horn Manfred, 2007).

- Existen últimamente grandes debates, de un lado sobre la producción de biocombustibles y, por otro lado, la generación de energía eléctrica con energía renovable y conectada a la red. En relación al primer punto hay que mencionar que es un tema todavía muy controversial, por su cuestionada eficiencia energética (en muchos casos se requiere más energía para producir el biocombustible que ese después genera) y por el requerimiento de tierras yagua, eventualmente necesarios para la producción de alimentos. En relación al segundo punto hay que anotar que el Perú tiene todavía un enorme potencial no utilizado para la construcción de hidroeléctricas grandes (situación muy diferente en los países industrializados que promueven la energía eólica y solar conectado a la red eléctrica) y que pueden probablemente producir electricidad más barata que la que es producida por otras fuentes. (Horn Manfred, 2007).

- El uso de la energía solar no es limitada a su conversión en electricidad con paneles fotovoltaicos. Al contrario, un gran potencial tiene su uso térmico, en invernaderos, calentadores de agua, secadores solares y el calentamiento de ambientes. Hay diferentes experiencias exitosas en el Perú, pero que requieren mayor diseminación. Un ejemplo particularmente importante en las regiones altas andinas del sur del Perú, son los trabajos realizados por el Centro de los misioneros de Belén en Espinar, Cusco sobre calentamiento de casas, usando cocinas de leña mejoradas y técnicas de arquitectura solar pasiva. (Ré, Luciano & Morales, Vladimir; 2011).
- En Perú, como en muchos otros países en desarrollo, el aspecto ecológico es sin duda importante para considerar el uso de las energías renovables. Sin embargo, a corto plazo es más importante el aspecto de desarrollo de regiones rurales apartadas de las redes energéticas. Para su desarrollo estas regiones necesitan energía, siendo la mejor opción a corto plazo, y muchas veces la única, la generación local de esta energía en base a la energía solar y la biomasa, y en menor escala, la energía hidráulica y eólica.

“No es posible suministrar energía a regiones rurales alejadas con costos similares a los en regiones urbanas, pero más caro es no

suministrar energía a esas regiones. La energía más cara es la energía que uno no tiene” (Horn Manfred, 2007).

2.1.1 Energía solar en la región del Cusco

La energía solar es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio peruano. En la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante grande y bastante uniforme durante todo el año, comparado con otros países, lo que hace atractivo su uso.

Existen mapas del potencial solar en el Perú, y como del departamento del Cusco, tal como se ven en las Figuras N°01 y N°02 respectivamente, mostrando un gran potencial de este recurso en todo el territorio nacional, con valores medios diarios anuales que oscilan entre los 4 a 5 kWh/m²día en la costa y selva, y de 5 a 7 kWh/m²día, en la zona andina. Esto implica que la energía solar incidente en pocos metros cuadrados es, en principio, suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una familia. El problema es transformar esta energía solar en energía útil y con un costo aceptable. (Senamhi, 2003)

Una de las formas más usadas en la conversión foto térmica, donde la energía solar se transforma en calor, empleando fundamentalmente el principio del cuerpo negro, es decir una superficie negra, por la cual se absorbe la energía solar para transformarla en calor, la cual puede ser usada para calentar ambientes, agua (termas solares), aire, secar diversos productos, cocinar, etc.

Otra forma de utilización es la conversión fotovoltaica, que emplea paneles solares (conformada por celdas de silicio) que transforman la energía solar en eléctrica, para ser usada en iluminación, radio, televisión, centro de salud, etc.

No cabe duda de que las opciones de uso de la energía solar son grandes. Lamentablemente, aún existe desconocimiento de aquellos sectores que pueden aprovecharlo más intensamente. Desarrollar este subsector energético sería crucial ya que es una de las mejores opciones para cambiar la actual matriz energética mundial intensiva en gases de efecto invernadero. (Senamhi, 2003)

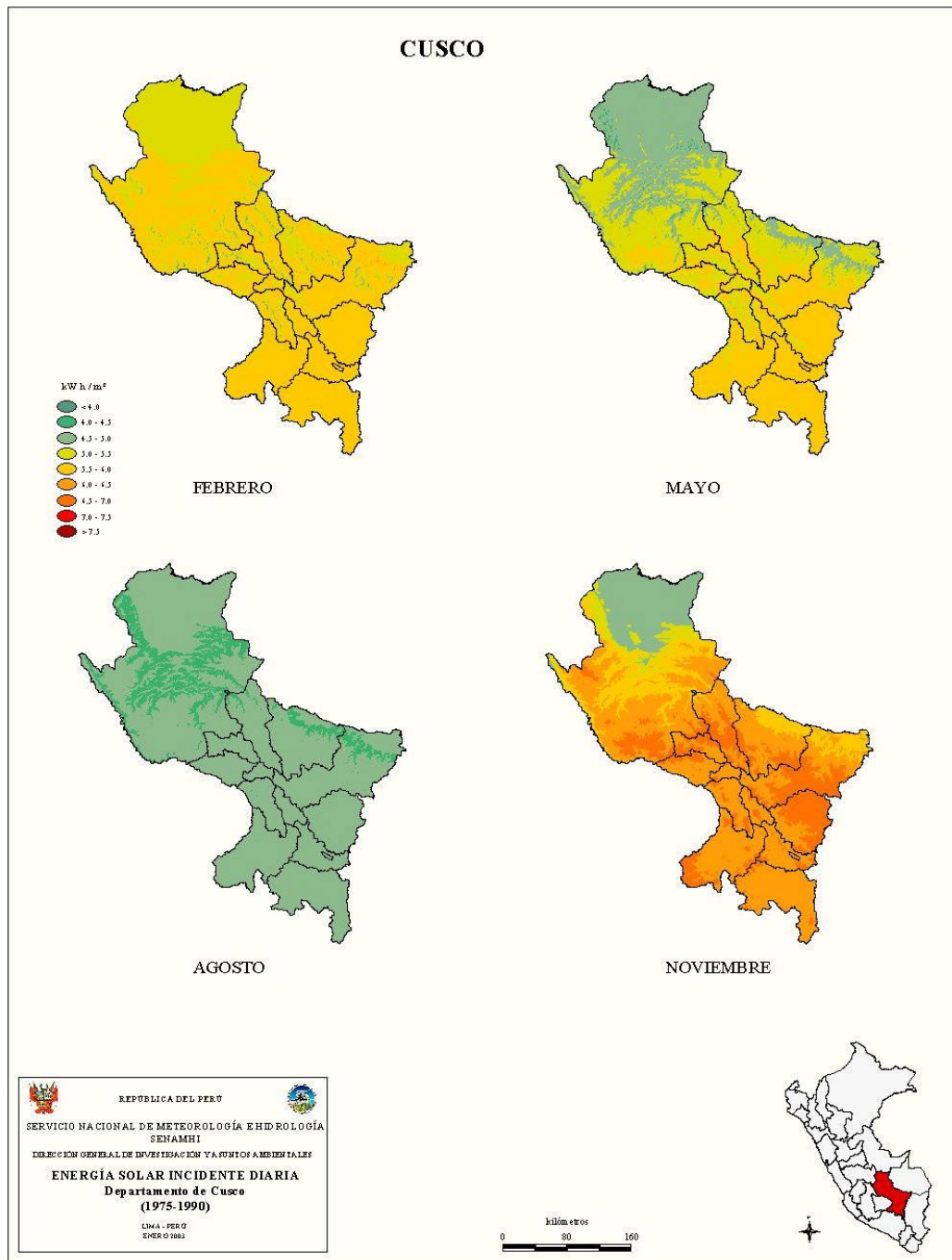


Figura N°01 : Mapa de radiación solar del departamento del Cusco promedio diario
Fuente : Senamhi (2003)

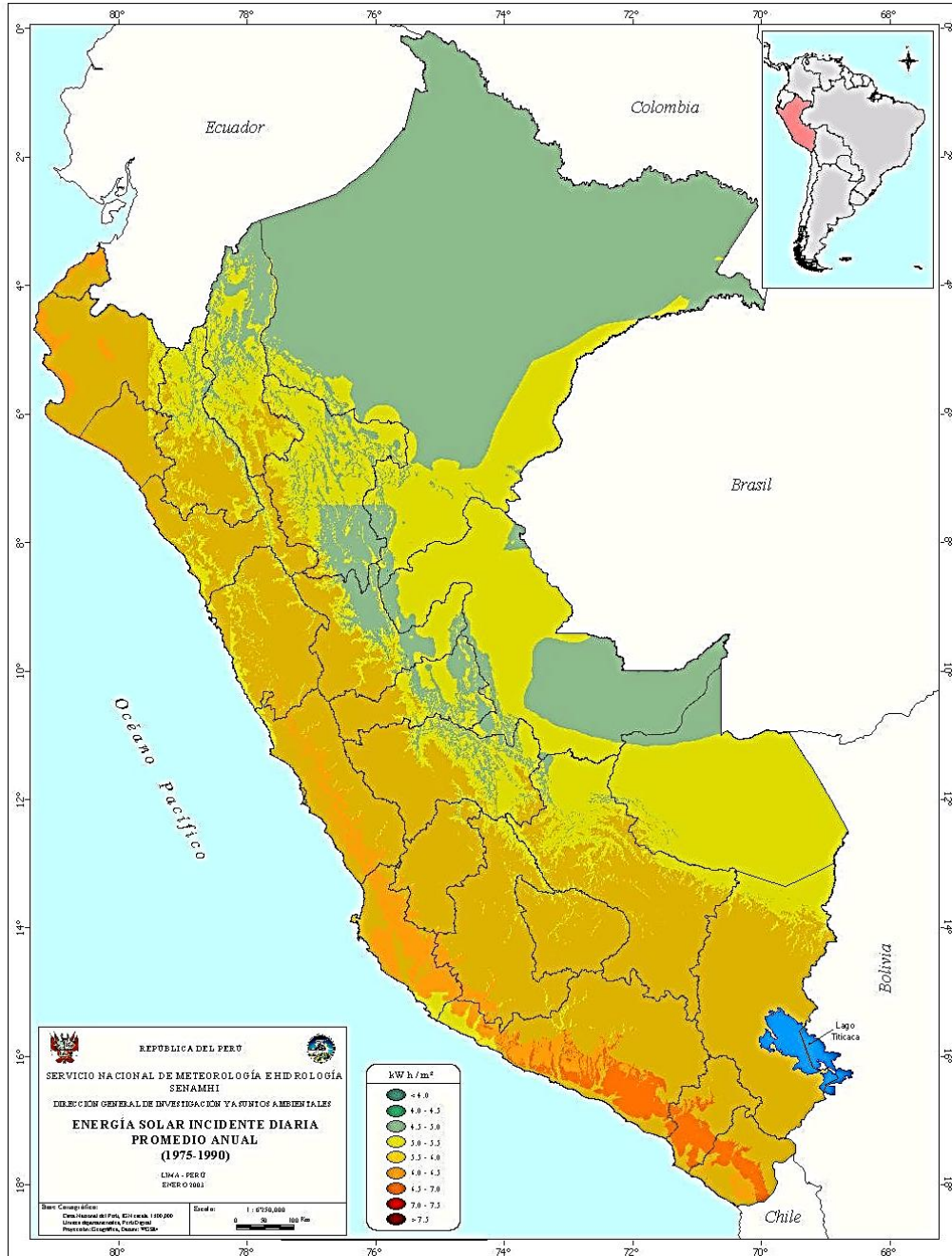


Figura Nº02 : Mapa de radiación solar incidente diaria promedio anual del Perú
 Fuente : Senamhi (2003)

2.1.2 Energía de la biomasa

La biomasa, definida como la materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, es una fuente muy variada de energía. Entre los métodos de aprovechamiento existentes destacan la combustión directa de la biomasa y la utilización de residuos orgánicos y cultivos para la producción de biogás y biocombustibles a través de procesos bioquímicos, que son usados como sustitutos de compuestos petroquímicos.

La bioenergía se define como la energía obtenida a partir de la biomasa y sus derivados, ya sea eléctrica, mecánico o térmica. La conversión energética de la materia prima se puede realizar mediante procesos termoquímicos, donde se produce la descomposición de la biomasa por medio de calor, o procesos bioquímicos que ocurren en presencia de microorganismos o medios de reacción para actuar como catalizadores. La forma más tradicional de aprovechamiento energético, la combustión, es un proceso considerado carbono neutral, puesto que las emisiones del proceso son equilibradas con el CO₂ absorbido previamente por las plantas y árboles durante su crecimiento.

El potencial de la biomasa en el Perú aún no ha sido plenamente estudiado, básicamente los proyectos actuales han surgido de la identificación por parte principalmente de la industria, de las potencialidades de la biomasa derivada de sus procesos productivos, sobre todo para la producción de calor y/o electricidad. Su desarrollo más difundido es mediante el uso de biodigestores logrando alcanzar 27 MW de potencia, tal como se puede ver en la Figura N°03. (MINEM, 2010)

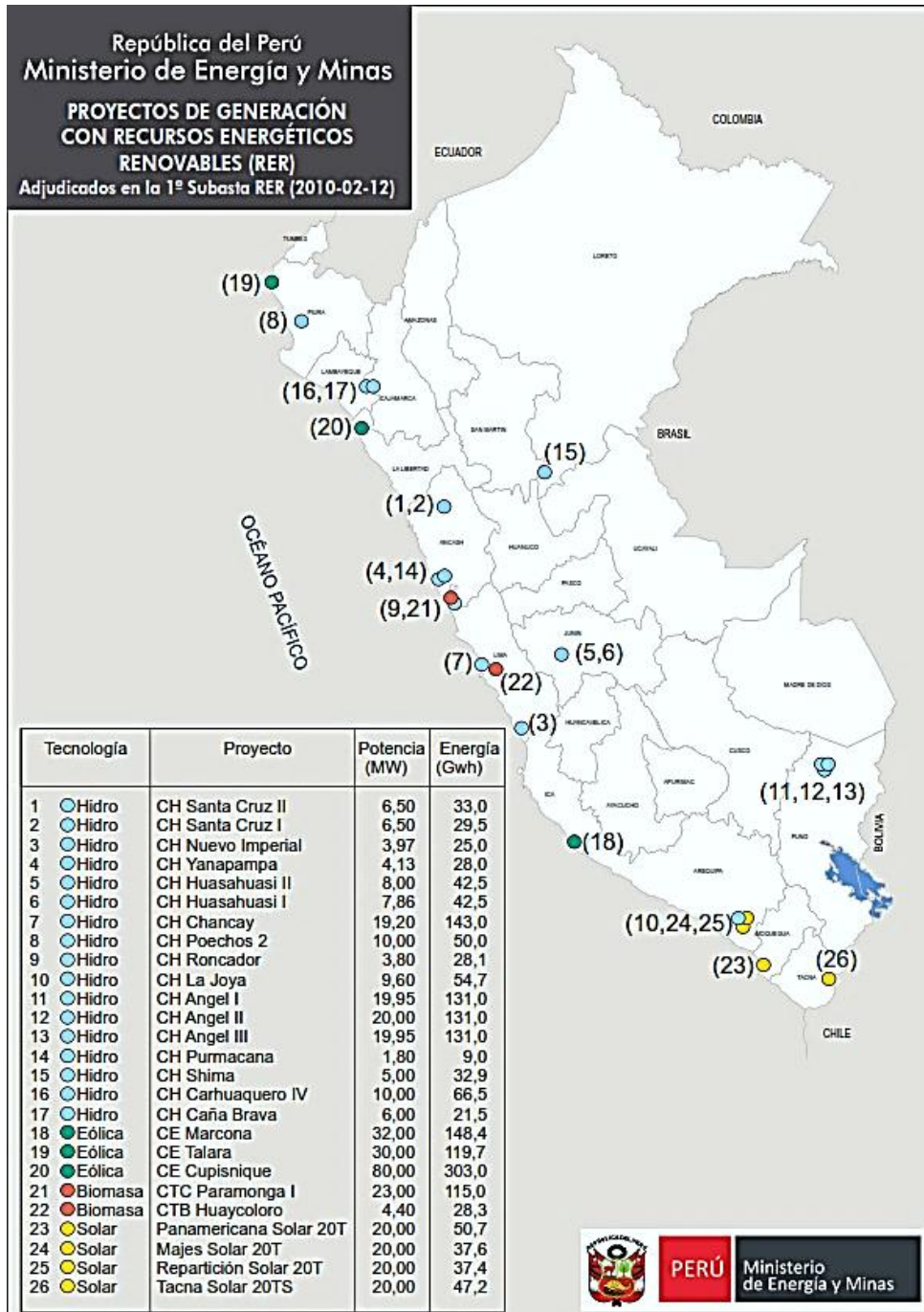


Figura N°03 : Mapa de generación de recursos energéticos renovables en el Perú

Fuente : MINEM (2010)

2.2 Antecedentes

En el año de 1939 la India inaugura una unidad experimental para el estudio y diseño de sistemas de equipos que requiere la utilización del biogás, comúnmente conocida como biodigestor, es en este país y en especial en China, donde esta tecnología se ha difundido en forma masiva en el sector campesino, existiendo más de 7.5 millones de biodigestores construidos. (TAYLHARDAT, 1986)

Sin embargo la biodigestión anaeróbica que inicialmente se había empleado para satisfacer la demanda de energía (requerimiento de combustible), en los últimos años ha venido demostrando su potencialidad para el tratamiento de los residuos y excretas de origen domésticos y agropecuario, principales contaminantes del ambiente. Países como China, India, Australia, Inglaterra, etc. han encontrado en la fermentación anaeróbica una técnica aliada en la lucha contra la contaminación ambiental, especialmente en el área rural en donde los efluentes urbanos y agropecuarios son transformados en sustancias inofensivas al ecosistema circundante, mejorando la calidad de vida de sus habitantes. (FAO, 1986)

En América se han desarrollado algunas experiencias en países como Colombia, Perú, Bolivia, Costa Rica, Honduras; la Organización para la Agricultura y la Alimentación (F.A.O) está dando un apoyo decidido; asimismo algunos países industrializados como Alemania, concibió el programa especial de energías renovables (PEER), este proyecto fomento la investigación sobre el uso de energéticos renovables, entre ellos la tecnología del biogás, teniendo como objetivo la reducción de cargas contaminantes y la sustitución de abonos químicos mediante el uso de los efluentes tratados y de buena calidad fertilizante. (Guevara Vera Antonio, 1996)

En Venezuela puede pensarse que dada la abundancia de recursos energéticos, tanto hidráulicos como fósiles, no tenga relevancia el uso de formas alternas de energía como la utilización de Biogás, sin embargo, para el área rural y las zonas alejadas donde existe una gran superficie que no tiene acceso a la electrificación por los altos costos de las redes y equipos eléctricos sí tiene mucha importancia y así lo han entendido los organismos oficiales como la Compañía Anónima De Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE), el Instituto de Investigación Científica (IVIC) y la Universidad Central de Venezuela (UCV), quienes han aunado esfuerzos y recursos para realizar investigaciones tendientes a un mejor

conocimiento de la técnica del biogás, así como una mayor difusión técnica para lograr su implementación popular y rápida.(Guevara Vera Antonio, 1996)

Sin embargo la investigación en Venezuela es incipiente, los pocos estudios que se conocen son los realizados en la U.C. V. en su planta piloto generadora de biogás y las pocas tesis de grado realizadas por estudiantes de la Facultad de Agronomía de la UCV, así tenemos trabajos sobre la "Evaluación teórico económica de estanques para Biogás", (Medina, L ,1984); "Evaluación de Producción de Biogás a partir de desechos orgánicos", (Colmenares, 1987); "Diseño y Construcción de un Gasómetro y Formulación de Programas de Computación para diseño de un Biodigestor Chino" (Moreno, 1988)

En el Perú, a finales de los años 70 y principios de los 80 el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial de Normas Técnicas (ITINTEC) empezó con la investigación y promoción de biodigestores familiares de domo fijo basándose principalmente en los modelos chino e hindú, siendo el primero el que mayor difusión tuvo debido a su menor costo. A esta iniciativa se unieron diferentes instituciones y universidades, donde de las cuales destacaron dos proyectos ejecutados por la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC) y la empresa Gloria S.A. en Arequipa. Lamentablemente de todos los biodigestores instalados por la UNC durante esta época, solo uno se encuentra en funcionamiento produciendo 3m³ de biogás por día. Para el caso de Gloria, se instalaron sistemas entre los departamentos de Tacna Moquegua y Arequipa, donde la empresa primero concientizo a los ganaderos, con los cuales trabajaba y después les vendió los biodigestores, la empresa capacito a asesores de campo para la construcción e ideo una forma más sencilla y barata de construirlos. En la actualidad no están en funcionamiento.(SNV, SOLUCIONES PRÁCTICAS, HIVOS, 2012)

En el año 2004, en el Cusco, una colaboración entre el Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) y el Instituto para una Alternativa Agraria (IAA) se realizó un

pequeño proyecto piloto donde se instalan 2 biodigestores de plástico polietileno, los cuales, a pesar de sus limitaciones, funcionaron adecuadamente. En el año 2007 se instalaron 13 biodigestores de en la zona de Yanaoca. Paralelamente, se instaló una planta piloto en el Fundo K'ayra de la Universidad San Antonio Abad de Cuzco (UNSAAC), para la investigación de biodigestores tubulares, todas aquellas llegando producir 1 a 2m³ de biogás por día. Ese mismo año Soluciones Prácticas, tras una pasantía en Bolivia con la GIZ, empezó a instalar biodigestores tubulares de polietileno en Cajamarca. Poco tiempo después los cambio por geomembrana, debido a la mala calidad del polietileno comercializado, lo que hacía que el tiempo de vida de los biodigestores disminuyera. (MINEM, 2010)

Por otro lado, empresas productoras de biodigestores de geomembrana como Coberturas Plásticas S.A. (COPLAST) y Comercial Industria Delta S.A. (CIDELSA) han comercializado alrededor de 360 biodigestores que han sido instalados por diferentes instituciones en diferentes regiones del país. También existen experiencias de instalación de biodigestores de mayor escala, donde destacan las experiencias del Fundo América, en Arequipa, que es una empresa ganadera que se dedica a la producción de leche y tiene instalados dos biodigestores de

geomembrana para el tratamiento del estiércol obtenido en el área de ordeño, el biol es utilizado en diferentes cultivos del fundo. Otra experiencia es la avícola la Calera, en Lima, la cual es una empresa que tiene instalados seis biodigestores de alta tecnología, se espera una capacidad de producción de 7000 m³ de biogás al día, el cual es utilizado en calefacción de pollos bebe y su fábrica de cartón, el biol es utilizado en los campos agrícolas como fertilizante (Flores, 2011).

2.3 Tipos de biodigestores

Existen diferentes tipos de biodigestores, las cuales se clasifican según su frecuencia de carga. En la Figura N°04 se puede observar los diferentes tipos de biodigestores que se usan en la actualidad.

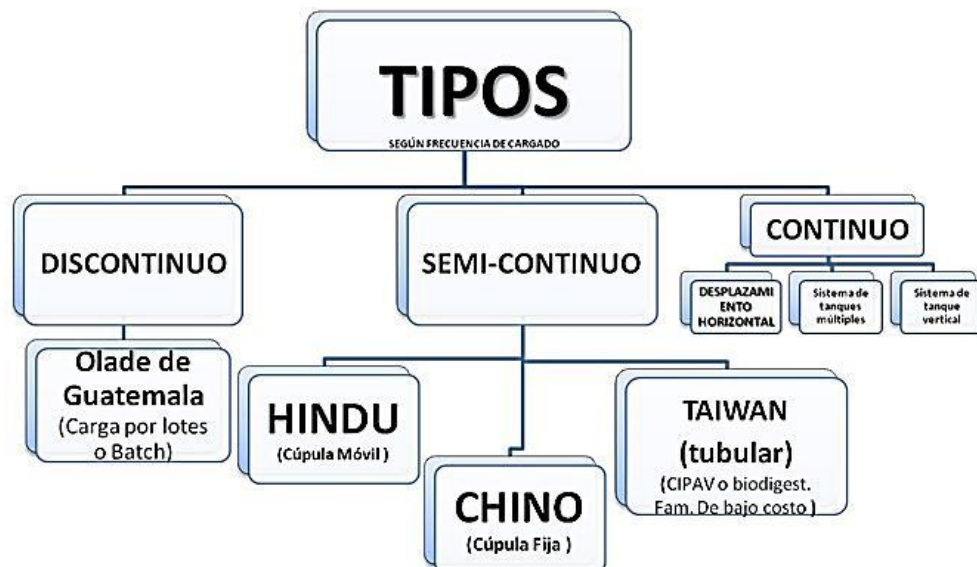


Figura N°04 : Tipos de biodigestores
Fuente : Matton Sebastien(2012)

Los biodigestores que destacan más son de la clasificación discontinuo y semi continuo:

- **Discontinuo** : Se cargan una sola vez y se retira cuando ya se ha dejado de producir biogás, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.

- **Semi-continuo** : Se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día, o cada dos días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante en los días. Los principales, son el hindú, el chino, y el taiwanés.

2.3.1 Biodigestor Olade Guatemala

Esta Tipo de biodigestor es discontinuo, se carga una vez, y se descarga el contenido digerido, una vez que finaliza el proceso de fermentado, ósea, cuando deja de producir biogás. Tiene un solo orificio para la carga y descarga. La duración de la fermentación varía entre 2 a 4 meses, dependiendo del clima.

Como este sistema de biodigestor tiene a la materia de principio a fin confinada, no hay sostenibilidad en la producción de biogás.

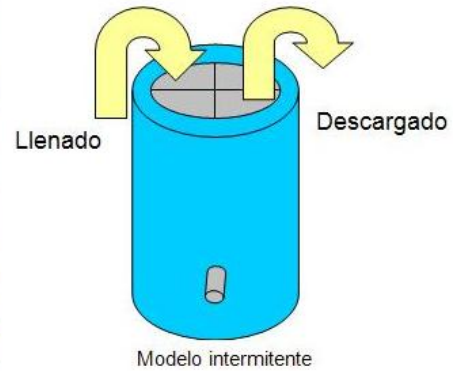


Figura N°05 : Biodigestor Olade Guatemala
Fuente : Matton Sebastien (2012)

2.3.2 Biodigestor tipo chino

De flujo semi – continuo, es el modelo más extendido, debido a su durabilidad, fácil manejo, funcionabilidad y seguridad. Este diseño se originó en China y está ampliamente difundido ahí. Se trata de una cámara cerrada con sus respectivas cámaras de carga y descarga. La estructura puede ser construida de concreto armado, ladrillos, piedra u hormigón y las paredes internas permeabilizadas con diferentes métodos (como aplicación de cemento mezclado con porcelana) para evitar fugas de líquido.

Esta clase de digester de cúpula o campana fija, almacena solamente un pequeño volumen del biogás generado en el interior,

por lo que necesita de un contenedor diferente construido para este biogás producido (gasómetro).

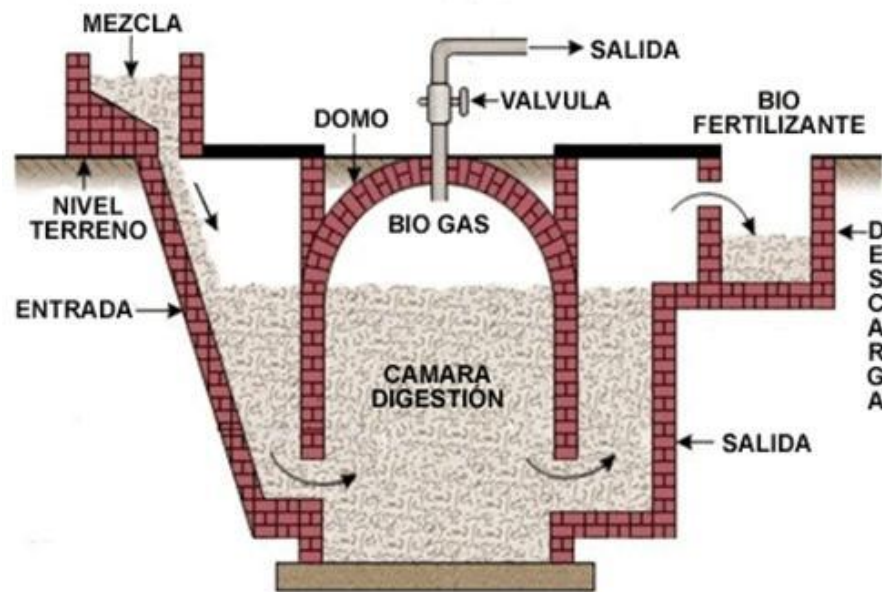


Figura N°06 : Biodigestor tipo chino
Fuente : Matton Sebastien (2012)

2.3.3 Biodigestor tipo hindú

De flujo semi – continuo, consiste en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás. De esta forma, la presión del biogás sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 300 mm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La

campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores.

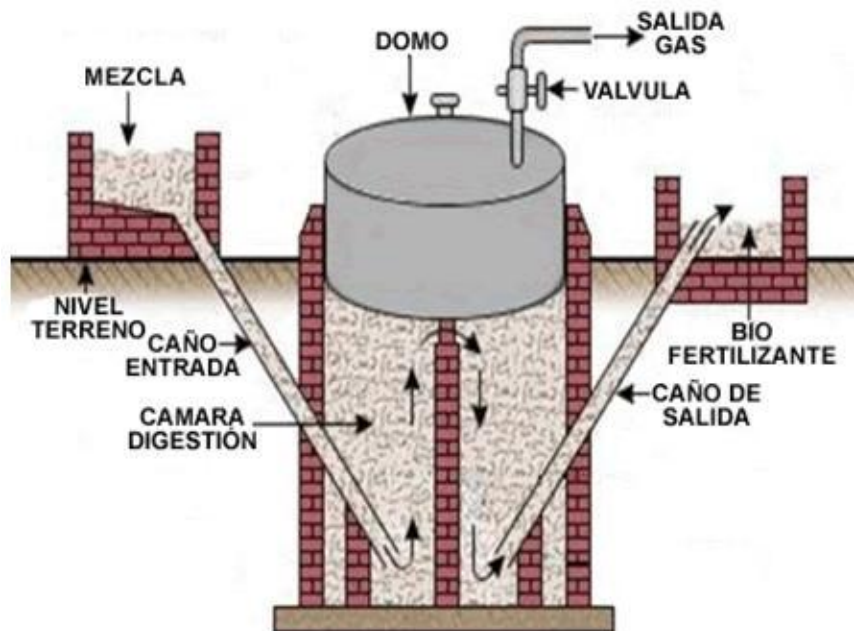
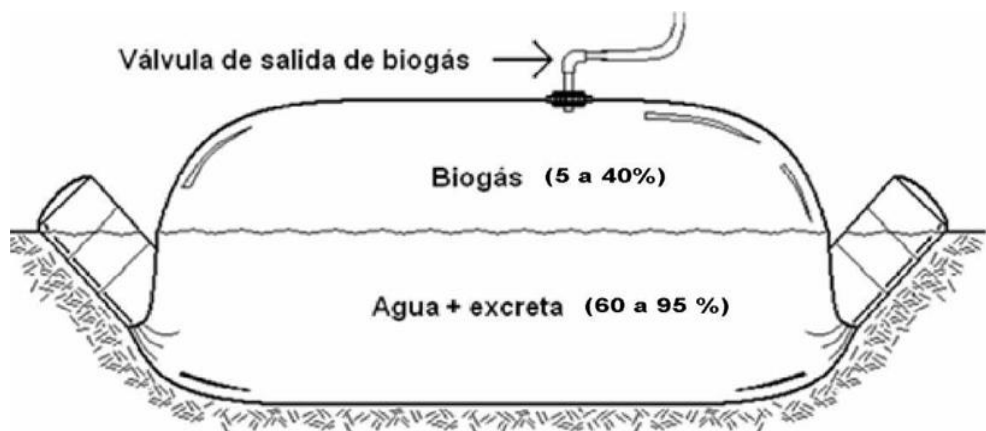


Figura N°07 : Biodigestor tipo hindú
Fuente : Matton Sebastien (2012)

2.3.4 Biodigestor tipo tubular

Biodigestor de flujo semi – continuo de estructura flexible. Tuvo origen por La alta inversión que pedía construir un biodigestor de estructura fija y los bajos ingresos que percibían los granjeros. Los ingenieros taiwaneses en los años sesenta diseñaron biodigestores con materiales flexibles más baratos, de la misma localidad y accesibles. Primero se utilizó nylon y neopreno, sin

embargo; estos demostraron ser algo costosos. Un paso mayor en los setenta era combinar PVC con el residuo de las refinerías de aluminio produciéndose así "el barro rojo PVC", y de ahí fue reemplazado por polietileno más barato y es el que se usa mayormente en América Latina, África y Asia. Desde 1986, el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando biodigestores de plástico económico como la tecnología apropiada por optimizar el uso de excrementos pecuarios, reduciendo con ello presión en otros recursos naturales.



PISO A NIVEL

Figura N°08 : Biodigestor tipo tubular
Fuente : Matton Sebastien (2012)

En este digestor, el biogás se va acumulando en la parte superior de la bolsa-reactor, parcialmente llena con materia

orgánica en fermentación, la bolsa se va inflando lentamente con una presión baja.

2.4 Biodigestor Modelo Chino Mejorado

En la ciudad del Cusco, Provincia de Paruro, Distrito de Yaurisque, a 3300 m.s.n.m. está ubicado CECADE Qosqo Yachay Wasi, una Asociación Civil sin fines de lucro, que además de desarrollar actividades de capacitación e investigación, tiene un parque demostrativo de las múltiples aplicaciones de las energías renovables, entre ellas ha construido un Biodigestor Modelo Chino Mejorada.

El Biodigestor Modelo Chino Mejorado está construido fundamentalmente con ladrillo reforzado con alambón. La base y sus paredes laterales han sido aisladas con polietileno térmico y tecnopor, para mantener el lodo o mezcla en fermentación a una temperatura constante a la que entra.

Se ha diseñado un invernadero para proteger el biodigestor de las bajas temperaturas del ambiente.

A continuación en las Figuras N°09 y N°10 se muestran las partes del Biodigestor Modelo Chino Mejorado:

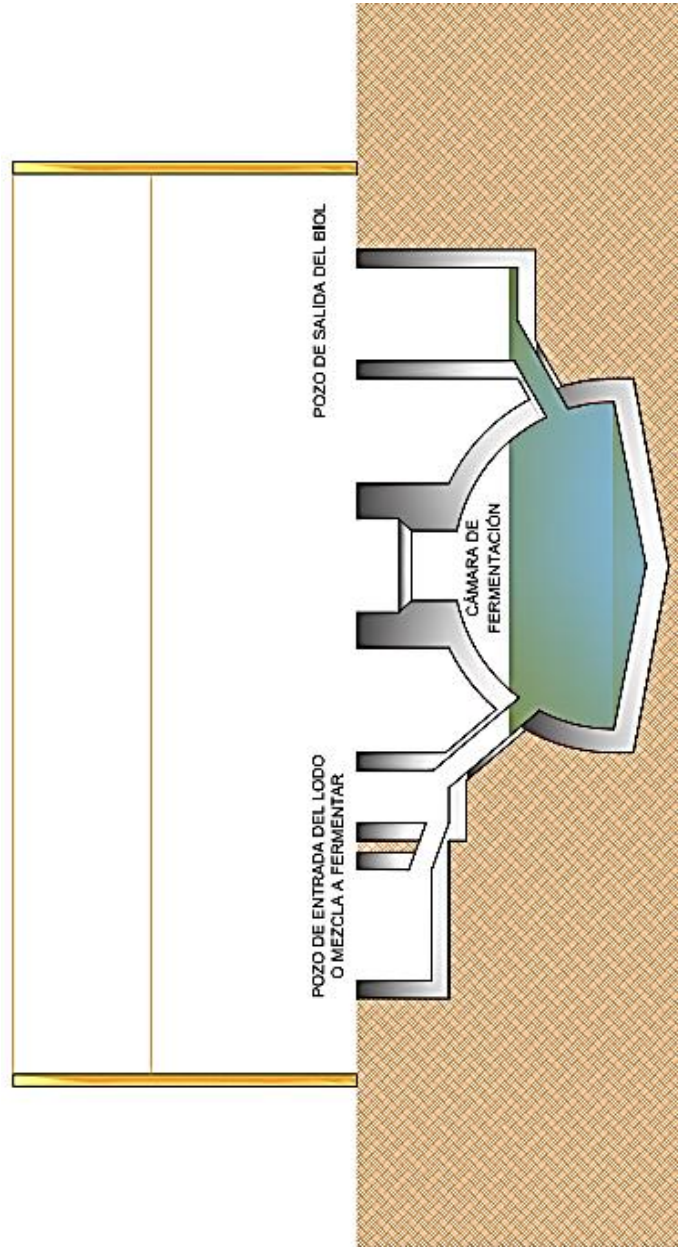


Figura N°09 : Partes del Biodigestor Modelo Chino Mejorado
Fuente : Archivos propios (2013)

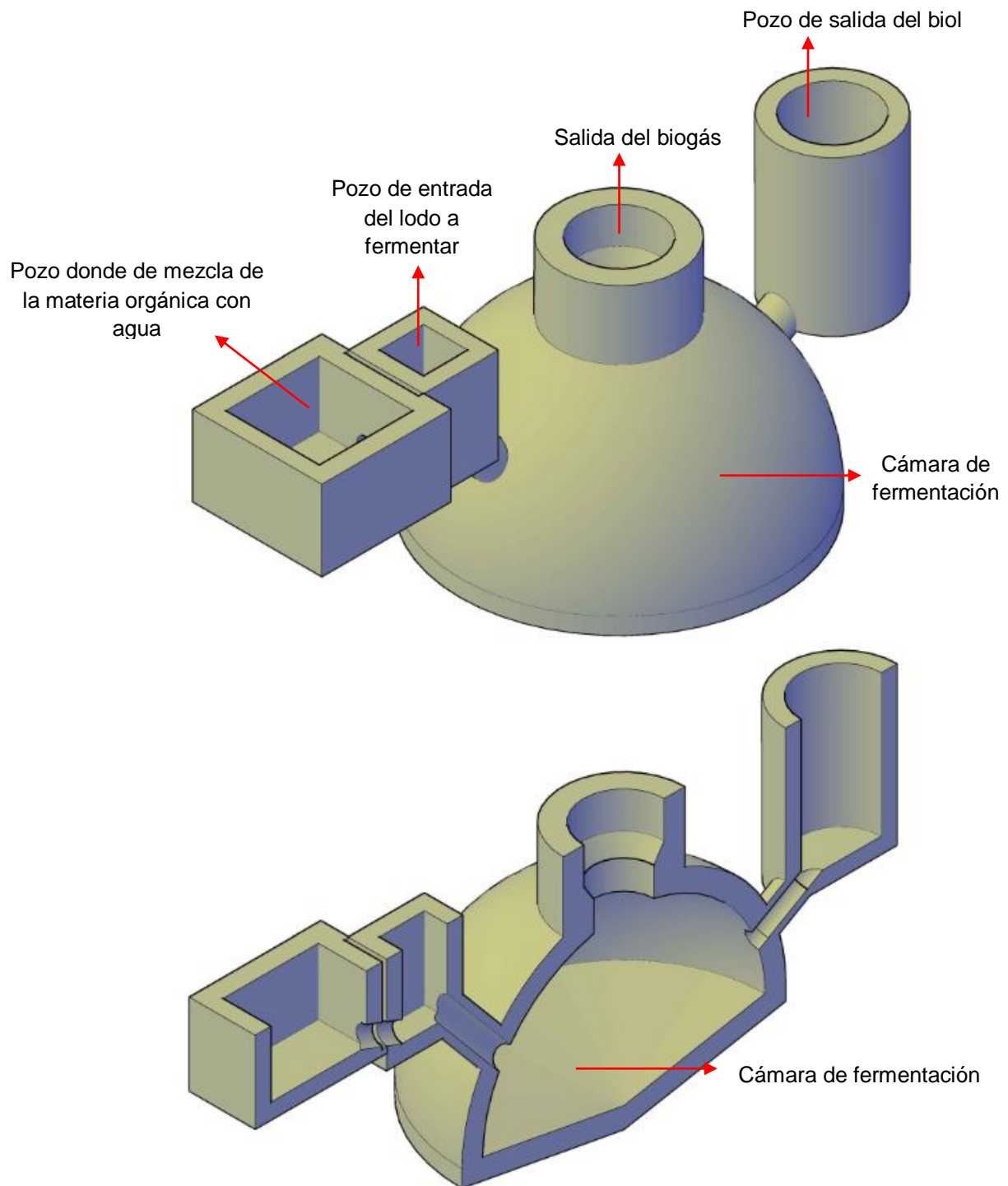


Figura N°10 : Biodigestor Modelo Chino Mejorado
 Fuente : Archivos propios (2013)

2.4.1 Dimensiones del Biodigestor Modelo Chino Mejorado

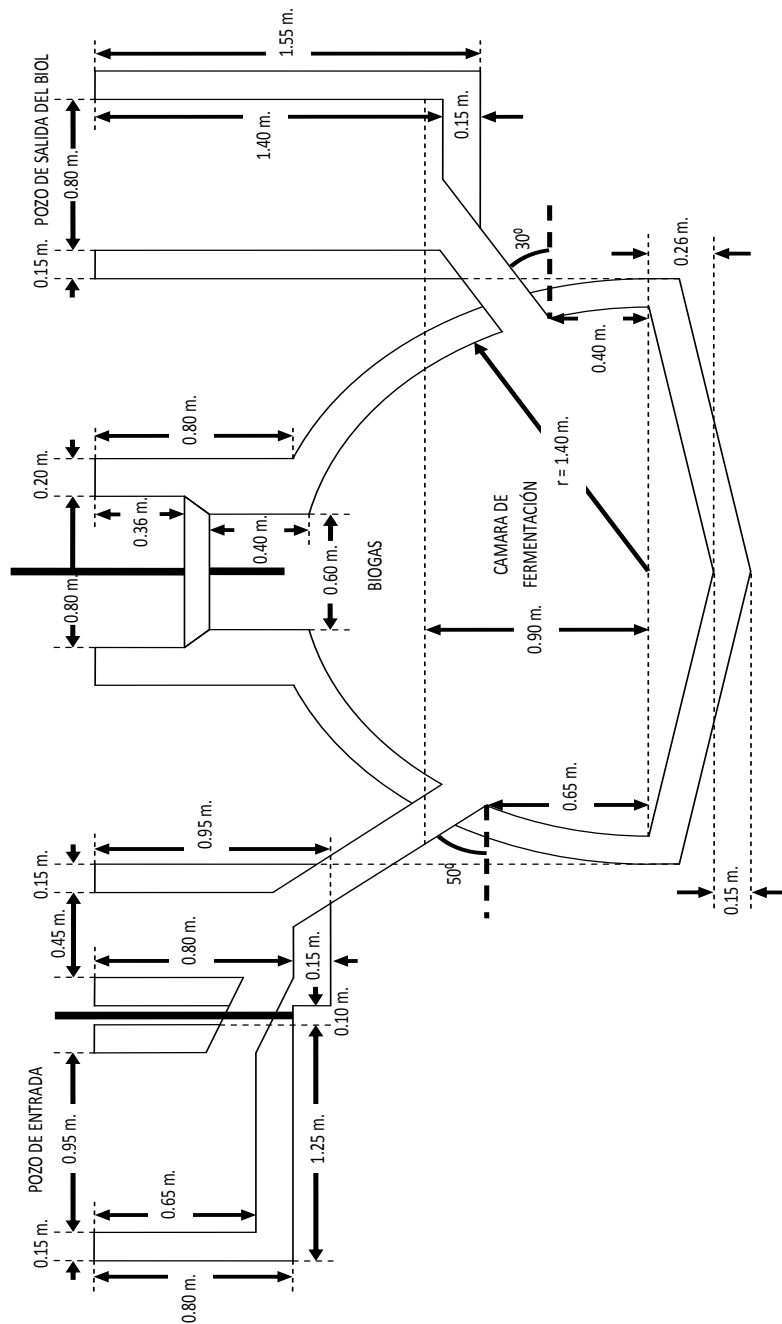


Figura N°11 : Dimensiones del Biodigestor Modelo Chino Mejorado
Fuente : Archivos propios (2013)

La cámara de fermentación donde se realiza todo el proceso de producción de biogás consta de un volumen aproximado de $6,405 \text{ m}^3$ y está dividida en 2 partes:

- Volumen del lodo: $5,335 \text{ m}^3$.
- Volumen del biogás: $1,070 \text{ m}^3$.

Dejando $1,070 \text{ m}^3$ de espacio para la ubicación de biogás.

2.4.2 Sistema de distribución del biogás

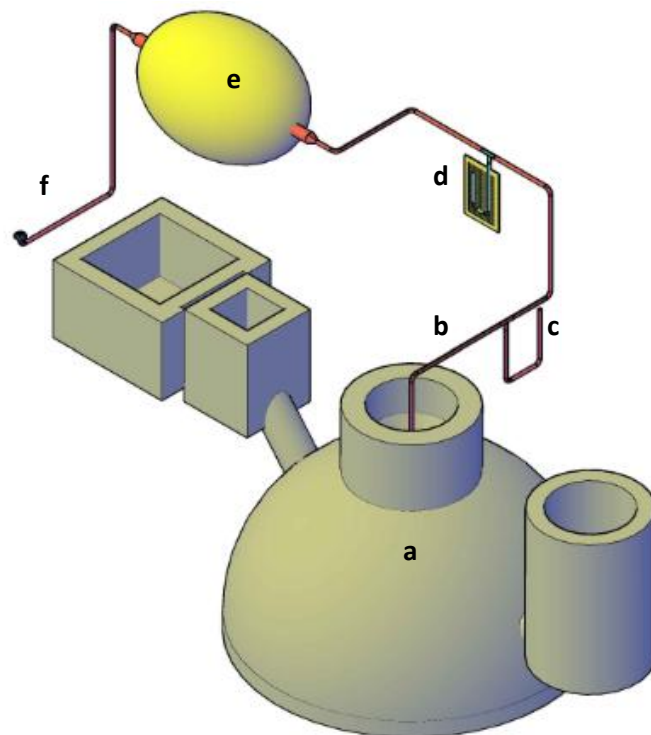


Figura N°12 : Sistema de distribución del biogás
Fuente : Archivos propios (2013)

En la Figura N°12 se observa la distribución de biogás desde el biodigestor hasta el reservorio, para finalmente ser usada para cocción de alimentos, alumbrado y/u otros fines. Los componentes del sistema completo son los siguientes:

- a. Biodigestor, Donde se produce la digestión anaeróbica para obtener biogás.
- b. Tubería de distribución de biogás.
- c. Trampa de vapor de agua, también usada como válvula de seguridad en caso de alta presión.

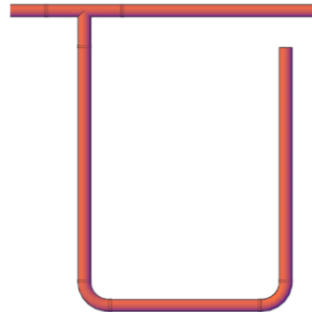


Figura N°13: Trampa de vapor de agua
Fuente : Archivos propios (2013)

- d. Manómetro, para cuantificar la producción de biogás en función del incremento de presión.

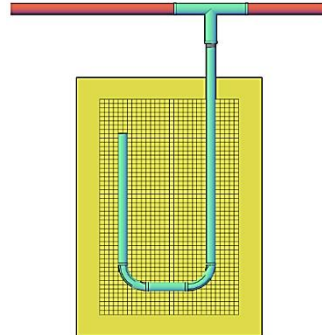


Figura N°14 : Manómetro en forma de U
Fuente : Archivos propios (2013)

- e. Reservorio de biogás
f. Quemador

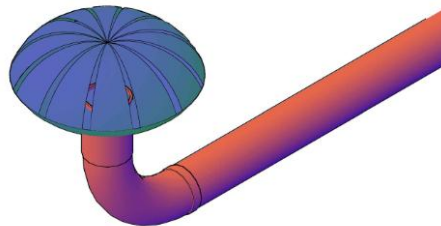


Figura N°15 : Quemador de biogás
Fuente : Archivos propios (2013)

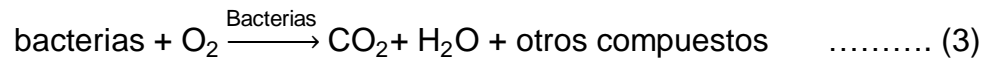
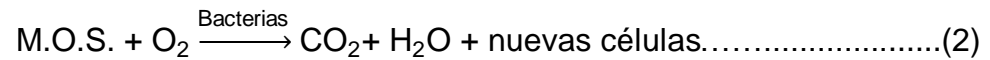
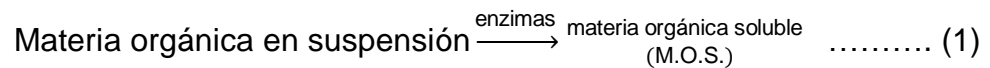
2.5 Proceso de la digestión

2.5.1 Digestión aeróbica

La digestión aeróbica es un proceso mediante el cual los lodos provenientes del sedimentador primario o los lodos de los procesos aeróbicos de tratamiento, o una combinación de ellos, son sometidos a aeración prolongada en un tanque separado y descubierto. En este punto es preciso advertir que no se debe confundir la digestión aeróbica, la cual se realiza en un tanque separado, con la aeración extensiva, la cual tiene lugar en el mismo tanque de aeración. El proceso de digestión aeróbica es generalmente utilizado para estabilizar el exceso de lodos provenientes de los lodos activados, o los lodos combinados producidos en plantas pequeñas de tratamiento que no tengan digestión anaeróbica separada para los lodos primarios.

El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular. El mecanismo mediante el cual se estabilizan los lodos depende del tipo de lodo que se esté tratando. La digestión aeróbica de lodos primarios se sucede en tres etapas. En la primera etapa los sólidos

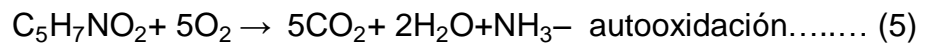
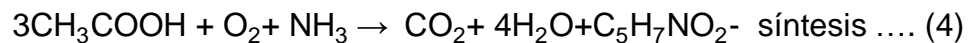
suspendidos orgánicos son solubilizados para que puedan ser asimilados por los microorganismos en la segunda etapa del proceso. La tercera etapa consiste en la autooxidación de la materia celular sintéticamente en la forma siguiente (Valencia Montoya Guillermo, 1996):



En las primeras fases del proceso de digestión aeróbica, cuando una población de microorganismos se pone en contacto con una fuente ilimitada de sustrato, los organismos se reproducen con una tasa de crecimiento poblacional logarítmica que solo está limitada por su propia habilidad de reabsorción y asimilación de materia orgánica para la síntesis de nueva masa protoplasmática.

A medida que progresa la oxidación de la materia orgánica disponible la tasa de crecimiento bacteriano empieza a disminuir pues las fuentes de carbono orgánico disponibles se hacen

limitantes, y por consiguiente, también se presenta una disminución en la tasa de consumo de oxígeno. Cuando la cantidad de materia orgánica disponible es apenas suficiente para garantizar la subsistencia de las distintas especies de microorganismos, estos comienzan a autooxidarse mediante su metabolismo endógeno. Si se acepta representar a la masa celular por $C_5H_7NO_2$ y a la materia orgánica por ácido acético, las anteriores reacciones de oxidación se pueden esquematizar de la siguiente manera (Valencia Montoya Guillermo, 1996):



Las reacciones esquematizadas anteriores nos indican que todo el carbono presente en las aguas residuales es oxidado y removido del sistema adicionalmente dichas reacciones indican que no se requiere suplementar el sistema con nutrientes, pues esto son re circulados entre los microorganismos.

La estabilización aeróbica de los lodos primarios presentan unas características diferentes debido a que se tiene que proveer suficiente tiempo de detención para que la materia orgánica soluble

y en suspensión sea en primer término convertida a masa celular, la cual debe ser autooxidada posteriormente pues de lo contrario la reducción en los sólidos suspendidos volátiles (SSV) sería mínima.

En el caso de los lodos provenientes de los procesos aeróbicos del tratamiento, la digestión aeróbica puede considerarse como una extensión de dichos procesos, pues bien sean los lodos activos o los filtros percoladores cumplen con la tarea de convertir la materia orgánica en una nueva masa celular. Por consiguiente la relación de materia orgánica disponible y microorganismo es baja, por lo cual hay muy poca oportunidad de síntesis celular, y la principal reacción que ocurre en el digestor es la autooxidación de la masa celular. No toda la materia celular, sin embargo se autooxida pues algunas partes de las células (sus membranas especialmente) están compuestas de moléculas de polisacáridos las cuales son de difícil degradación biológica. (Valencia Montoya Guillermo, 1996)

2.5.2 Digestión anaeróbica

La Digestión Anaeróbica es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Este proceso genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes (dependiendo del material degradado). En biodigestores se aprovecha esta liberación de gases para luego ser usados como combustible. La intensidad y duración del proceso anaeróbico varían dependiendo de diversos factores, entre los que se destacan la temperatura, el nivel de pH y la relación carbón/nitrógeno del material biodegradado.

El principio básico de funcionamiento del biodigestor es descomponer las excretas de los ganados en compuestos más simples para su absorción mediante bacterias, en condiciones controladas de humedad, temperatura y niveles de acidez, durante un tiempo no menor a 20 días, para obtener gas metano. En la Figura N°16. Se ve todo el proceso que a continuación se explica (Yáñez Fabián, 1996):

- **La hidrólisis;** es el primer proceso químico que se realiza en la fermentación de la mezcla (agua y excretas), esto consiste en formar sustancias orgánicas e inorgánicas complejas en otras sustancias más sencillas.
- **La acetogénesis;** es el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen ácidos orgánicos de cadena corta, tales como acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), propiónico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) y butílico ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$) a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono).
- **La metanogénesis;** es la formación de metano por microbios. Es una forma de metabolismo microbiano muy importante y extendido. En la mayoría de los entornos, es el paso final de la descomposición de la biomasa.

En esta etapa los microorganismos metanogénicos convierten los ácidos de cadena más larga en: metano, dióxido de carbono y ácidos volátiles de cadenas más cortas. Las moléculas ácidas se rompen repetidamente dando lugar finalmente a ácido acético que se convierte en CO_2 y CH_4 :



Ya que la fermentación metanogénica controla la velocidad del proceso, es importante mantener las condiciones de una fermentación metanogénica eficaz. El tiempo de residencia para organismos metanogénicas debe ser adecuado o si no, son eliminados del sistema.

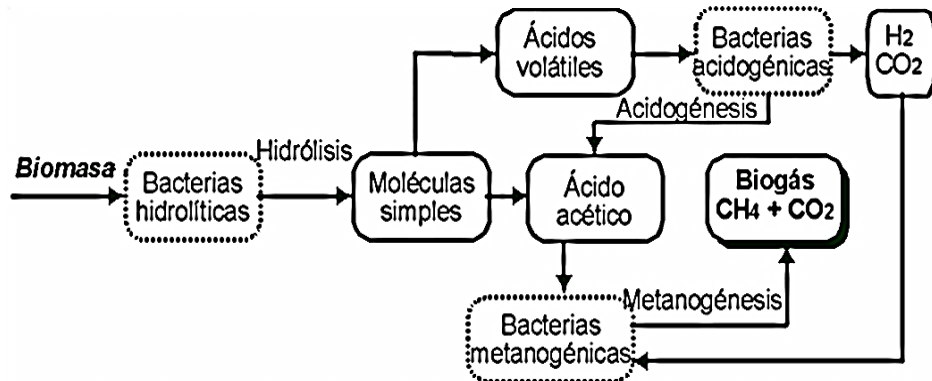


Figura N°16 : Proceso de digestión anaeróbica
Fuente : Yáñez, Fabián. (1996)

2.6 Parámetros de una digestión anaeróbica

2.6.1 Temperatura

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70°C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones que tienen su rango óptimo de trabajo de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural. La actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción se depende de la temperatura ambiente que en muchas regiones es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas

inferiores a 5°C se puede decir que las bacterias quedan ‘dormidas’ y ya no producen biogás.

Por ello es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás.

Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

Tabla N°01: Rangos de temperatura y tiempo de retención

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de retención
Psicrofilico	4-10°C	15-18°C	25-30°C	Arriba de 120 días
Mesofilico	15-20°C	28-33°C	35-45°C	30-70 días
Termofilico	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: GTZ OEKOTOP (1987)

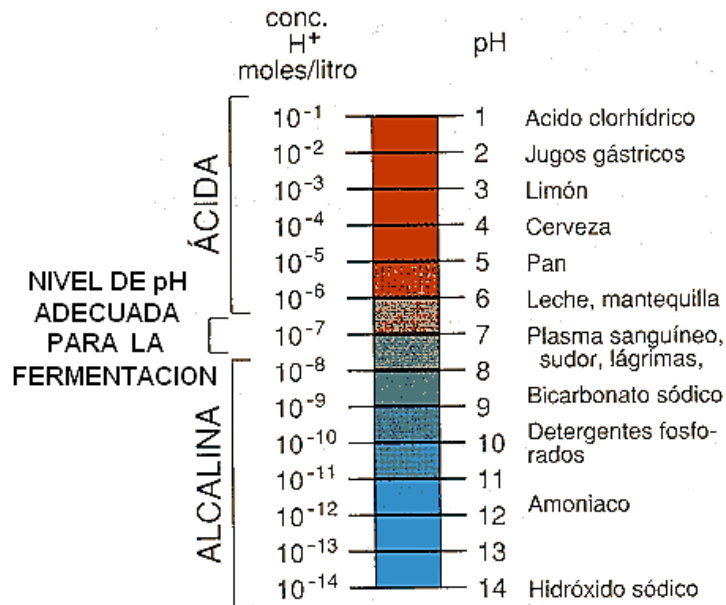
2.6.2 Humedad relativa

La humedad relativa es esencial en el proceso de selección del sustrato (materia orgánica), depende mucho de la cantidad de agua (porcentaje de humedad) y de la cantidad de sólidos (porcentaje de materia no líquida). Los rangos óptimos de los sólidos totales para una buena digestión anaeróbica varían entre 5 a 10% para zonas cálidas y de 10 a 15% para zonas frías (ver Tabla N°02). Es necesaria una mayor cantidad de sólidos totales en zonas frías debido a que el tiempo de retención es mucho mayor a comparación de las zonas cálidas.

2.6.3 Nivel de pH

El nivel de pH indica si el lodo se encuentra ácido, básico o neutro. Para una buena digestión anaeróbica el nivel debe concentrarse entre 6,5 y 7,5.

En la Figura N°17 Podemos observar los diferentes niveles de pH para diversos productos y para el lodo.



Para el agua pura el nivel 7

Figura N°17 : Nivel de pH adecuados para la fermentación.

Fuente : Ángela Chaparro (2002)

2.6.4 Concentración de carbón / nitrógeno

Toda materia en putrefacción se compone en su mayor parte de carbono y de nitrógeno. La mezcla de C/N influye en la producción de biogás, siendo particularmente una buena relación de 20:1 hasta 30:1. El uso de materiales con relaciones más altas implica el riesgo de que el biodigestor no funcione correctamente o de que su producción sea muy baja. Tanto el carbono como el nitrógeno son indispensables para el proceso de fermentación dentro del biodigestor. En caso de sospecha la fermentación sea

interrumpida por otra materia (antibióticos, metales como cobre y cromo, etc.) se debe agregar agua u otra materia prima de buena calidad en el biodigestor, disminuyendo así la concentración de dichas materias perjudiciales.

Tabla N°02. Características de los residuos orgánicos en la fermentación anaeróbica existentes en el medio rural.

Sustrato de	Humedad	Sólidos	Carbono	Nitrógeno	C/N
	%	totales %	%	%	
Vacunos	79	21	32,00	1,50	21
Ovinos	73	27	60,00	3,70	16
Equinos	75	25	47,00	2,40	20
Porcinos	69	31	73,00	2,60	28
Gallinazas	44	56	70,20	5,80	12
Auquénidos	57	43	42,00	3,70	11
Cuyes	32	68	37,.20	2,22	17
Conejos	20	80	47,20	2,02	23
Chala de maíz	15	85	39,00	0,70	56
Paja de arroz	8	92	41,20	0,70	59
Paja de cebada	7	93	42,00	0,88	48
Paja de trigo	8	92	46,00	0,53	87
Totorales	35	65	41,00	0,23	178
Hojas de plátano	89	11	42,00	1,10	38
Pasto	67	33	40,00	2,52	16
Hierbas y hojas secas	50	50	41,00	1,00	41

Fuente: EDAC (1986)

2.7 Producto de una digestión anaeróbica

2.7.1 Biogás

El biogás es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas (sin aire). La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente. Este proceso que genera biogás es una fuente de energía renovable.

El biogás es una mezcla de gases compuesta principalmente de:

- Metano (CH_4) : 40 a 70% del volumen.
- Dióxido de carbono (CO_2) : 30 a 60 % volumen.
- Otros gases : 1-5 %volumen.

Incluyendo:

- Hidrógeno (H_2) : 0 a 1 % volumen.
- Sulfuro de hidrógeno (H_2S) : 0 a 3 % volumen.

Como en cualquier otro gas, algunas de las propiedades características del biogás dependen de la temperatura y la humedad de la materia prima.

Los factores más importantes para caracterizar el biogás son los siguientes:

- Cómo cambia el volumen cuando cambian la temperatura
- Cómo cambia el poder calorífico cuando cambian la temperatura y la presión

El poder calorífico del biogás es cerca de 5kWh por metro cúbico. Es decir que energéticamente un metro cúbico de biogás es equivalente a aproximadamente medio litro de combustible diesel.

2.7.2 Bioabono

EL bioabono es un abono orgánico que surge de la descomposición anaeróbica, se obtiene una vez que el biodigestor deje de producir biogás.

El bioabono mineral contiene sales solubles con elementos nutrientes (N, P, K, Ca, etc.); también puede tener microorganismos como hongos micorrízicos, bacterias fijadoras de nitrógeno y agentes bioquímicos fisiológicamente activos como enzimas, hormonas, ácidos húmicos y aminoácidos entre otros, que pueden acelerar la toma de los nutrientes por las plantas y/o absorberlos para ser metabolizados. El uso de los bioabonos surge como una alternativa para desarrollar una agricultura más sostenida en el largo plazo, en razón al acelerado deterioro de los suelos intervenidos, a la contaminación ambiental con subproductos agropecuarios, y la complementariedad con los sistemas principales de producción, estimulando la generación de agroindustrias auxiliares de bioconversión de heces de animales, desechos agroindustriales, desperdicios orgánicos etc. (Herrera Claudia, 2010)

El bioabono tiene unas propiedades, que ejercen unos determinados efectos sobre el suelo, que hacen aumentar la fertilidad de este. Básicamente, actúan en el suelo sobre tres tipos de propiedades (Herrera Claudia, 2010):

2.7.2.1 Propiedades físicas

- El bioabono por su color oscuro, absorbe más las radiaciones solares, con lo que el suelo adquiere más temperatura y se pueden absorber con mayor facilidad los nutrientes.
- El bioabono mejora la estructura y textura del suelo, haciendo más ligeros a los suelos arcillosos y más compactos a los arenosos.
- Mejoran la permeabilidad del suelo, ya que influyen en el drenaje y aireación de éste.
- Disminuyen la erosión del suelo, tanto de agua como de viento.
- Aumentan la retención de agua en el suelo, por lo que se absorbe más el agua cuando llueve o se riega, y retienen durante mucho tiempo, el agua en el suelo durante el verano.

2.7.2.2 Propiedades químicas

- El bioabono aumentan el poder tampón del suelo, y en consecuencia reducen las oscilaciones de pH de éste.
- Aumentan también la capacidad de intercambio catiónico del suelo, con lo que aumentamos la fertilidad.

2.7.2.3 Propiedades biológicas

- El bioabono favorece la aireación y oxigenación del suelo, por lo que hay mayor actividad radicular y mayor actividad de los microorganismos aerobios.
- El bioabono constituye una fuente de energía para los microorganismos, por lo que se multiplican rápidamente.

2.7.3 Biol

Es un líquido de color verdoso oscuro e inodoro, que es expulsado del biodigestor como producto de la descomposición anaeróbica que contiene: 20% de proteínas, 4% de NPK solubles, 14% de nitrógeno y 20% de potasio. (Saldaña Méndez Jaime Luis, 2006)

2.8 Transferencia de calor en plantas de biogás

A continuación se mostrara los cálculos realizados para determinar el comportamiento térmico del biodigestor relacionado con el sistema de aislamiento e implementación del invernadero, para ello se ubican los sensores de temperatura dentro del biodigestor, dentro del invernadero, en el ambiente y en el suelo, como se puede ver en la Figura N°18.

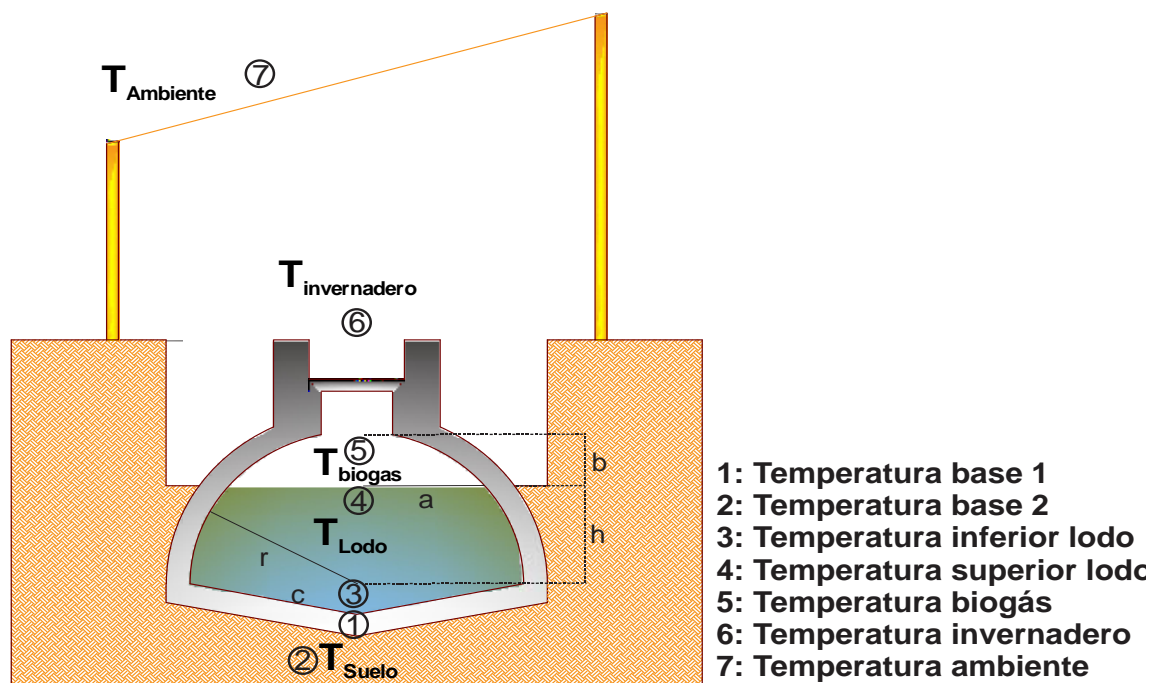


Figura N°18 : Ubicación de los sensores de temperatura
Fuente : Archivos propios (2014)

La transferencia de calor se realiza partir del balance energético, y la distribución de resistencias térmicas para ser más factible su cálculo:

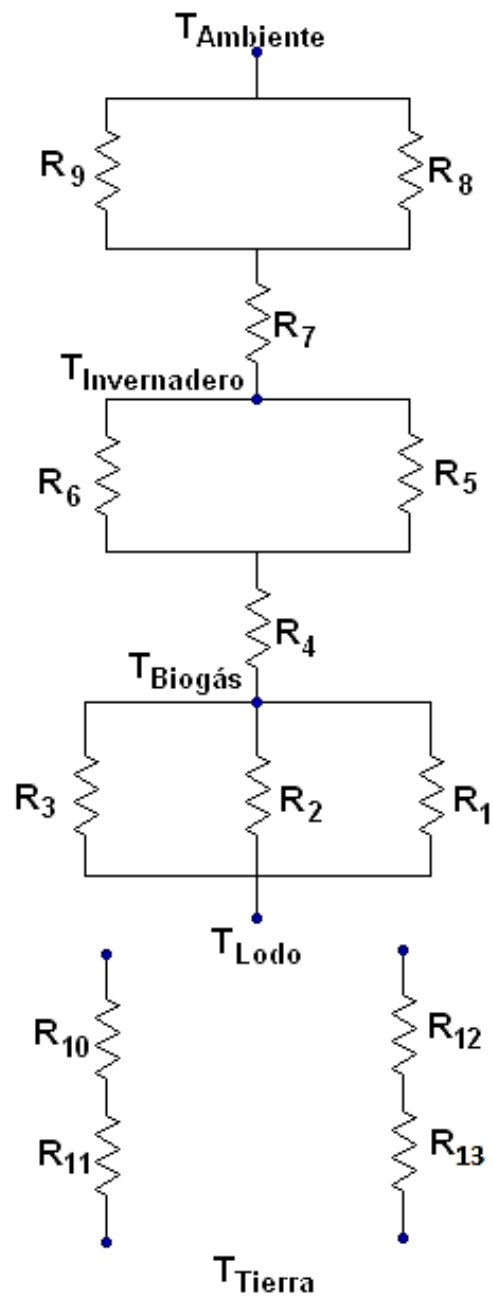


Figura N°19 : Red de resistencias térmicas con aislamiento (perdidas)
Fuente : Archivos propios (2014)

La ecuación general de balance de energía:

$$\underbrace{\rho V C_p \left(\frac{dT_{Lodo}}{dt} \right)}_{\text{Cambio en la energía térmica del sistema}} = \underbrace{\dot{m} C_p (T_{Mezcla} - T_{Lodo})}_{\text{Transferencia de calor por flujo de masa}} - \underbrace{\dot{Q}_{Perdido}}_{\text{Tasa de pérdida totales de calor}} + \underbrace{\dot{Q}_{Externo}}_{\text{Aporte externo de calor}} \quad ..(7)$$

Dónde:

ρ : Densidad del lodo en el interior del biodigestor (kg/m^3)

V : Volumen del lodo en el interior del biodigestor (m^3)

C_p : Calor específico del lodo ($\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$)

\dot{m} : Flujo másico (kg/s)

T_{Lodo} : Temperatura del lodo dentro del biodigestor ($^\circ\text{K}$)

t : Tiempo (s)

T_{Mezcla} : Temperatura de mezcla en la entrada del lodo ($^\circ\text{K}$)

$\dot{Q}_{Perdido}$: Pérdida total de calor del biodigestor (W)

$\dot{Q}_{Externo}$: Aporte externo de calor al biodigestor (W)

R_1 : Resistencia por convección del lodo al biogás

R_2 : Resistencia por radiación del lodo al biogás

R_3 : Resistencia por evaporación del lodo al biogás

R_4 : Resistencia por conducción en el domo

R_5 : Resistencia por convección del domo al invernadero

R_6 : Resistencia por radiación del domo al invernadero

R_7 : Resistencia por conducción en plástico invernadero

- R8 : Resistencia por convección del plástico invernadero al ambiente
- R9 : Resistencia por radiación del plástico invernadero al ambiente
- R10 : Resistencia por conducción del concreto en la base del biodigestor
- R11 : Resistencia por conducción del aislante en la base del biodigestor
- R12 : Resistencia por conducción del ladrillo en la pared del biodigestor
- R13 : Resistencia por conducción del aislante en la pared del biodigestor

El biodigestor tiene un mejor funcionamiento con el sistema de aislamiento e implementación del invernadero, la falta de aquellas produce mayores pérdidas de calor en consecuencia una baja producción de biogás y mayor tiempo de retención. Se analiza las pérdidas de calor sin aislamiento e invernadero y luego con la implementación de las mismas.

2.8.1 Biodigestor sin aislamiento e invernadero

Las pérdidas de calor sin el uso del aislamiento e invernadero en el biodigestor se realizan no considerando las resistencias por aislamiento y las resistencias que ejerce el invernadero.

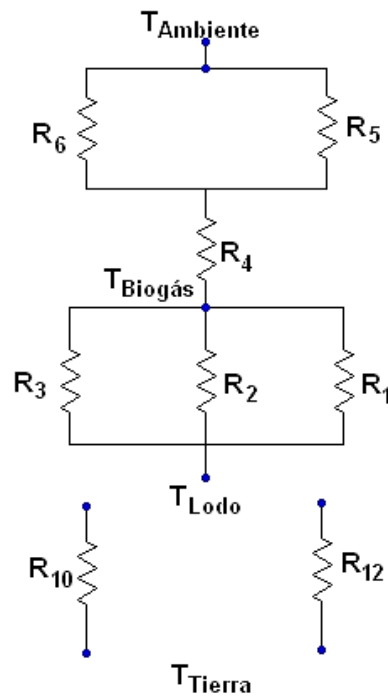


Figura N°20 : Red de resistencias térmicas sin aislamiento (perdidas)
Fuente : Archivos propios (2014)

De la Figura N°20 se tiene:

$$\dot{Q}_{Perdido} = \dot{Q}_{Arriba} + \dot{Q}_{Base} + \dot{Q}_{Pared} \dots\dots\dots(8)$$

Dónde:

\dot{Q}_{Perdido} : Pérdida total de calor del biodigestor (W)

\dot{Q}_{Base} : Pérdidas de calor por la base del biodigestor (W)

\dot{Q}_{Pared} : Pérdidas de calor por la pared del biodigestor (W)

\dot{Q}_{Arriba} : Pérdidas de calor por el domo del biodigestor (W)

$$\dot{Q}_{\text{Arriba}} = \frac{T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Ambiente}}}{R_{eq,1} + R_4 + R_{eq,2}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\dot{Q}_{\text{Base}} = \frac{T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Tierra}}}{R_{10}} \dots\dots\dots (10)$$

$$\dot{Q}_{\text{Pared}} = \frac{T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Tierra}}}{R_{12}} \dots\dots\dots (11)$$

De las cuales tenemos las siguientes resistencias térmicas:

$$R_{eq,1} = 1 / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \dots\dots\dots (12)$$

$$R_{eq,2} = 1 / \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) \dots\dots\dots (13)$$

$$R_1 = \frac{1}{A_1 \cdot h_{Conv,1}} \dots\dots\dots (14)$$

$$R_2 = \frac{1}{A_1 \cdot h_{Rad,1}} \dots\dots\dots (15)$$

$$R_3 = \frac{1}{A_1 \cdot h_{Evap,1}} \dots\dots\dots (16)$$

$$R_4 = \frac{\delta_1}{A_2 \cdot k_1} \dots \dots \dots (17)$$

$$R_5 = \frac{1}{A_2 \cdot h_{Conv,2}} \dots \dots \dots (18)$$

$$R_6 = \frac{1}{A_2 \cdot h_{Rad,2}} \dots \dots \dots (19)$$

$$R_{10} = \frac{\delta_2}{A_3 \cdot k_2} \dots \dots \dots (20)$$

$$R_{12} = \frac{\delta_1}{A_4 \cdot k_1} \dots \dots \dots (21)$$

Siendo:

$$h_{Rad,1} = \varepsilon_1 \sigma (T_{Lodo}^2 + T_{Biogas}^2) (T_{Lodo} + T_{Biogas}) \dots \dots \dots (22)$$

$$h_{Rad,2} = \varepsilon_2 \sigma (T_{Domo}^2 + T_{Ambiente}^2) (T_{Domo} + T_{Ambiente}) \dots \dots (23)$$

$$h_{Evap,1} = u_l H \left[\frac{g(\rho_{Lodo} - \rho_{Biogas})}{\gamma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_p^3 (T_{Lodo} - T_{Biogas})^2}{(CHPr_{Lodo}^{1.7})^3} \right] \dots \dots \dots (24)$$

De donde:

- $h_{\text{Conv},1}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del lodo al biogás. ($\text{W}/\text{m}^2\text{°K}$)
- $h_{\text{Conv},2}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del domo al ambiente. ($\text{W}/\text{m}^2\text{°K}$)
- $h_{\text{Rad},1}$: Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie del lodo al biogás. ($\text{W}/\text{m}^2\text{°K}$)
- $h_{\text{Rad},2}$: Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie del domo al ambiente. ($\text{W}/\text{m}^2\text{°K}$)
- $h_{\text{Evap},1}$: Coeficiente de transferencia de calor por evaporación de la superficie del lodo al biogás. ($\text{W}/\text{m}^2\text{°K}$)
- k_1 : Conductividad térmica del ladrillo. ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$)
- k_2 : Conductividad térmica del concreto. ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$)
- δ_1 : Espesor del domo. (m)
- δ_2 : Espesor del concreto. (m)
- A_1 : Área de la superficie del lodo. (m^2)
- A_2 : Área de la superficie del domo. (m^2)
- A_3 : Área de la superficie de la base. (m^2)
- A_4 : Área de la superficie de la pared. (m^2)
- T_{Lodo} : Temperatura del lodo ($^{\circ}\text{K}$)

T_{Ambiente}	: Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{K}$)
T_{Tierra}	: Temperatura de la tierra ($^{\circ}\text{K}$)
T_{Domo}	: Temperatura domo ($^{\circ}\text{K}$)
T_{Biogas}	: Temperatura del biogas ($^{\circ}\text{K}$)
ϵ_1	: Emisividad del lodo
ϵ_2	: Emisividad de la superficie del domo
σ	: Constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)
u_l	: Viscosidad del Lodo (kg/ms)
H	: Entalpia de vaporación (J/kg)
g	: Aceleracion gravitacional (m/s^2)
ρ_{Lodo}	: Densidad del lodo (kg/m^3)
ρ_{Biogas}	: Densidad del biogás (kg/m^3)
γ	: Tension superficial líquido vapor (N/m)
C_p	: Calor especifico del lodo ($\text{J/kg}^{\circ}\text{K}$)
Pr_{Lodo}	: Número de Prandtl para el lodo
C	: Constante experimental (0,0130)

A partir de la red de resistencias termicas se calcula la tasa de perdidas de calor del biodigestor al ambiente.

$$\dot{Q}_{\text{Perdido}} = U_1 A (T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Ambiente}}) + U_2 A (T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Tierra}}) \dots \dots \dots (25)$$

$$\frac{1}{U_1} = \frac{2r^2}{a^2(h_{Conv,1}+h_{Rad,1}+h_{Evap,1})} + \frac{r \cdot \delta_1}{b \cdot k_1} + \frac{r}{b \cdot (h_{Conv,2}+h_{Rad,2})} \dots (26)$$

$$U_2 = \frac{c \cdot k_2}{2r \cdot \delta_2} + \frac{h \cdot k_1}{r \cdot \delta_1} \dots (27)$$

$$A = 2\pi r^2$$

Dónde:

A : Área de la semi esfera (m²)

U₁ : Coeficiente de pérdidas de la temperatura del lodo al ambiente
(W/m²°K)

U₂ : Coeficiente de pérdidas de la temperatura del lodo a la tierra
(W/m²°K)

La temperatura del lodo dentro el biodigestor se debe mantener constante, por efecto se deduce que la derivada $\frac{dT_{Lodo}}{dt}$ es igual a cero, de la ecuación (7) tenemos:

- Sin calentamiento externo $\dot{Q}_{Externo} = 0$

$$\dot{m}C_p(T_{Mezcla} - T_{Lodo}) = U_1A(T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U_2A(T_{Lodo} - T_{Tierra}) \dots (28)$$

Despejando T_{Lodo} en función de (T_{Mezcla} , $T_{Ambiente}$, T_{Tierra}) de la ecuación (28) se obtiene:

$$T_{Lodo} = xT_{Ambiente} + yT_{Tierra} + zT_{Mezcla} \dots\dots\dots(29)$$

Donde:

$$x = \frac{U_1 A}{(\dot{m} C_p + U_1 A + U_2 A)} \dots\dots\dots(30)$$

$$y = \frac{U_2 A}{(\dot{m} C_p + U_1 A + U_2 A)} \dots\dots\dots(31)$$

$$z = \frac{\dot{m} C_p}{(\dot{m} C_p + U_1 A + U_2 A)} \dots\dots\dots(32)$$

Sustituyendo valores de las Tablas N° 03 y 04, se obtiene:

$$U_1 A = 6,89 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots(33)$$

$$U_2 A = 107,45 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots(34)$$

$$T_{Lodo} = 0,0583T_{Ambiente} + 0,9088T_{Tierra} + 0,0329T_{Mezcla} \dots\dots\dots(35)$$

- Con calentamiento externo

$$\dot{Q}_{Externo} = U_1 A(T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U_2 A(T_{Lodo} - T_{Tierra}) - \dot{m} C_p (T_{Mezcla} - T_{Lodo}) \dots\dots(36)$$

Tabla N°03. Parámetros de los coeficientes de transferencia de calor por conducción, convección y evaporación

Parametros		Valores
k_1	Conductividad térmica del ladrillo. (W/m ⁰ K)	0,490 W/m ⁰ K
k_2	Conductividad térmica del concreto. (W/m ⁰ K)	1,400 W/m ⁰ K
K_3	Conductividad térmica del plastico invernadero. (W/m ⁰ K)	0,027 W/m ⁰ K
K_4	Conductividad térmica del aislante. (W/m ⁰ K)	0,036 W/m ⁰ K
$h_{Conv,1}$	Coficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del lodo al biogás. (W/m ² ⁰ K)	4,500W/m ² ⁰ K
$h_{Conv,2}$	Coficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del domo al ambiente. (W/m ² ⁰ K)	4,500 W/m ² ⁰ K
$h_{Conv,3}$	Coficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del invernadero al ambiente. (W/m ² ⁰ K)	20,000W/m ² ⁰ K
$h_{Rad,1}$	Coficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie del lodo al biogás. (W/m ² ⁰ K)	5,144 W/m ² ⁰ K
$h_{Rad,2}$	Coficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie del domo al ambiente. (W/m ² ⁰ K)	4,84 W/m ² ⁰ K
$h_{Rad,3}$	Coficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie del invernadero al ambiente. (W/m ² ⁰ K)	1,650 W/m ² ⁰ K
$h_{Rad,4}$	Coficiente de transferencia de calor por radiación de la superficie del domo al lodo. (W/m ² ⁰ K)	5,049 W/m ² ⁰ K
$h_{Evap,1}$	Coficiente de transferencia de calor por evaporación de la superficie del lodo al biogás. (W/m ² ⁰ K)	0,256 W/m ² ⁰ K

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°04. Medidas para el cálculo de la transferencia de calor

Parametros		Valores
δ_1	Espesor del domo. (m)	0,20 m
δ_2	Espesor del concreto. (m)	0,10 m
δ_3	Espesor del plastico invernadero. (m)	200um
δ_4	Espesor del aislante. (m)	0,10 m
a	Radio de la superficie del lodo (m)	1,07m
b	Altura de la cúpula donde se ubica el biogas (m)	0,50 m
c	Distancia del punto medio de la base hacia la pared (m)	1,43 m
h	Altura de la pared del biodigestor donde se ubica el lodo (m)	0,90 m
r	Radio del biodigestor, semiesfera (m)	1,40 m

Fuente: Archivos propios (2014)

2.8.2 Biodigestor con aislamiento e invernadero

Con la incorporación del sistema de aislamiento y el invernadero, se debe de reducir las perdidas de calor cuando T_{Ambiente} es menor a T_{Lodo} , y aumentar las ganancias cuando $T_{\text{Invernadero}}$ es mayor a T_{Lodo} .

Una vez instalada el sistema de aislamiento e invernadero, se analiza la transferencia de calor usando las siguientes resistencias termicas, como se puede ver en la Figura N°19:

$$R_{eq,3} = 1 / \left(\frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} \right) \dots \dots \dots (37)$$

$$R_7 = \frac{\delta_3}{A_5 \cdot k_3} \dots \dots \dots (38)$$

$$R_8 = \frac{1}{A_5 \cdot h_{Conv,3}} \dots \dots \dots (39)$$

$$R_9 = \frac{1}{A_5 \cdot h_{Rad,3}} \dots \dots \dots (40)$$

$$R_{11} = \frac{\delta_4}{A_3 \cdot k_4} \dots \dots \dots (41)$$

$$R_{13} = \frac{\delta_4}{A_4 \cdot k_4} \dots \dots \dots (42)$$

$$h_{Rad,3} = \varepsilon_3 \sigma (T_{plas,inv}^2 + T_{Ambiente}^2) (T_{plas,inv} + T_{Ambiente}) \dots \dots (43)$$

Dónde:

δ_3 : Espesor del plástico del invernadero. (m)

δ_4 : Espesor del aislante. (m)

k_3 : Conductividad térmica del plástico del invernadero. (W/m⁰K)

k_4 : Conductividad térmica del aislante. (W/m⁰K)

$h_{Conv,3}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie del invernadero al ambiente.(W/m²0K)

$h_{Rad,3}$: Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la Superficie del invernadero al ambiente.(W/m²0K)

A_5 : Área del plástico invernadero. (m)

ε_3 : Emisividad plástico invernadero

$T_{plas,inv}$: Temperatura de la superficie del plástico invernadero. (°K)

Reemplazando en las ecuaciones (9), (10) y (11) tenemos:

$$\dot{Q}'_{Arriba} = \frac{T_{Lodo} - T_{Ambiente}}{R_{eq,1} + R_4 + R_{eq,2} + R_7 + R_{eq,3}} \dots\dots\dots (44)$$

$$\dot{Q}'_{Base} = \frac{T_{Lodo} - T_{Tierra}}{R_{10} + R_{11}} \dots\dots\dots (45)$$

$$\dot{Q}'_{Pared} = \frac{T_{Lodo} - T_{Tierra}}{R_{12} + R_{13}} \dots\dots\dots (46)$$

La perdida total de calor sera:

$$\dot{Q}'_{Perdido} = U'_1 A (T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2 A (T_{Lodo} - T_{Tierra}) \dots\dots\dots (47)$$

$$\frac{1}{U'_1} = \frac{1}{U_1} + \frac{2\pi r^2 \delta_3}{32 \cdot k_3} + \frac{2\pi r^2}{32 \cdot (h_{Conv,3} + h_{Rad,3})} \dots\dots\dots (48)$$

$$U'_2 = \frac{1}{\frac{2r}{c} \left(\frac{\delta_2}{k_2} + \frac{\delta_4}{k_4} \right)} + \frac{1}{\frac{r}{h} \left(\frac{\delta_1}{k_1} + \frac{\delta_4}{k_4} \right)} \dots\dots\dots (49)$$

Donde:

U'_1 : Coeficiente de pérdidas de la temperatura del lodo al ambiente con invernadero ($W/m^2\text{°K}$)

U'_2 : Coeficiente de pérdidas de la temperatura del lodo a la tierra con sistema de aislamiento ($W/m^2\text{°K}$)

Reemplazando la ecuación (47) en (7):

- Sin calentamiento externo $\dot{Q}_{Externo} = 0$

$$\dot{m}C_p(T_{Mezcla} - T_{Lodo}) = U'_1A(T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2A(T_{Lodo} - T_{Tierra}). \quad (50)$$

Despejando T_{Lodo} en funcion de (T_{Mezcla} , $T_{Ambiente}$, T_{Tierra}) de la ecuacion (50) se obtiene:

$$T_{Lodo} = x'T_{Ambiente} + y'T_{Tierra} + z'T_{Mezcla} \dots\dots\dots(51)$$

Donde:

$$x' = \frac{U'_1A}{(\dot{m}C_p + U'_1A + U'_2A_2)} \dots\dots\dots(52)$$

$$y' = \frac{U'_2A}{(\dot{m}C_p + U'_1A + U'_2A_2)} \dots\dots\dots(53)$$

$$z' = \frac{\dot{m}C_p}{(\dot{m}C_p + U'_1A + U'_2A_2)} \dots\dots\dots(54)$$

Sustituyendo valores de las Tablas N°03 y N°04, se obtiene:

$$U'_1 A = 6,82 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots (55)$$

$$U'_2 A = 4,69 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots (56)$$

$$T_{Lodo} = 0,4429T_{Ambiente} + 0,3045T_{Tierra} + 0,2525T_{Mezcla} \dots\dots\dots (57)$$

- Con calentamiento externo

$$\dot{Q}_{Externo} = U'_1 A (T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2 A (T_{Lodo} - T_{Tierra}) - \dot{m} C_p (T_{Mezcla} - T_{Lodo}) \quad (58)$$

La instalación del invernadero, no solo disminuye las pérdidas de calor hacia el ambiente, sino también aporta calor al lodo, aumentando la temperatura dentro del invernadero y por conducción, convección y radiación llega al lodo.

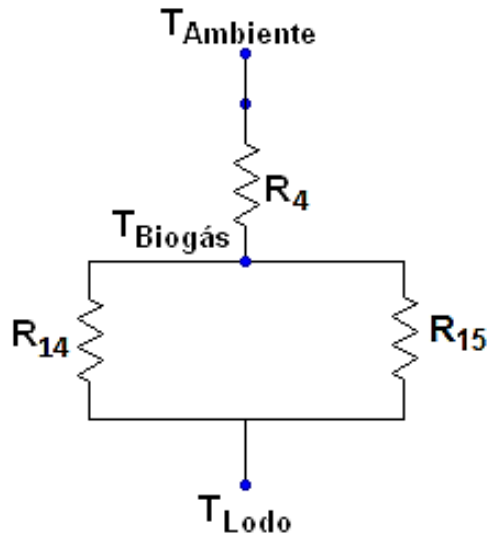


Figura N°21 : Red de resistencias térmicas (ganancia)
 Fuente : Archivos propios (2014)

$$\dot{Q}_{Ganado} = \frac{T_{Invernadero} - T_{Lodo}}{R_4 + R_{eq,4}} \dots\dots\dots (59)$$

Dónde:

\dot{Q}_{Ganado} : Ganancia de calor del biodigestor (W)

De las cuales tenemos las siguientes resistencias térmicas:

$$R_{eq,4} = 1 / \left(\frac{1}{R_{14}} + \frac{1}{R_{15}} \right) \dots\dots\dots (60)$$

$$R_{14} = \frac{1}{A_2 \cdot h_{Conv,1}} \dots\dots\dots (61)$$

$$R_{15} = \frac{1}{A_2 \cdot h_{Rad,4}} \dots\dots\dots (62)$$

$$R_4 = \frac{\delta_1}{A_2 \cdot k_1} \dots\dots\dots (63)$$

$$h_{Rad,4} = \varepsilon_2 \sigma (T_{Domo}^2 + T_{Lodo}^2) (T_{Domo} + T_{Lodo}) \dots\dots\dots (64)$$

Dónde:

$h_{Conv,1}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección del domo al lodo. (W/m²°K)

$h_{Rad,4}$: Coeficiente de transferencia de calor por radiación del domo al lodo. (W/m²°K)

$$\dot{Q}_{Ganado} = U'_3 A (T_{Invernadero} - T_{Lodo}) \dots\dots\dots (65)$$

$$\frac{1}{U'_3} = \frac{r}{b} \left(\frac{\delta_1}{k_1} + \frac{1}{h_{Conv,1} + h_{Rad,4}} \right) \dots\dots\dots (66)$$

Sea $\dot{Q}_{Ganado} = \dot{Q}_{Externo}$, entonces de (65):

$$\dot{m} C_p (T_{Mezcla} - T_{Lodo}) = U'_1 A (T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2 A (T_{Lodo} - T_{Tierra}) - U'_3 A (T_{Invernadero} - T_{Lodo}) \dots (67)$$

Despejando T_{Lodo} en función de (T_{Mezcla} , $T_{Ambiente}$, T_{Tierra} , $T_{Invernadero}$) de la ecuación (67) se obtiene:

$$T_{Lodo} = x'' T_{Ambiente} + y'' T_{Tierra} + z'' T_{Invernadero} + w'' T_{Mezcla} \dots\dots\dots (68)$$

Donde:

$$x'' = \frac{U'_1 A}{(\dot{m} C_p + U'_1 A + U'_2 A + U'_3 A)} \dots\dots\dots (69)$$

$$y'' = \frac{U'_2 A}{(\dot{m} C_p + U'_1 A + U'_2 A + U'_3 A)} \dots\dots\dots (70)$$

$$z'' = \frac{U'_3 A}{(\dot{m} C_p + U'_1 A + U'_2 A + U'_3 A)} \dots\dots\dots (71)$$

$$w'' = \frac{\dot{m} C_p}{(\dot{m} C_p + U'_1 A + U'_2 A + U'_3 A)} \dots\dots\dots (72)$$

Sustituyendo valores de las tablas N° 03 y 04, se obtiene:

$$U'_1 A = 6,82 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots (73)$$

$$U'_2 A = 4,69 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots (74)$$

$$U'_3 A = 8,58 \text{ W}/^\circ\text{K} \dots\dots\dots (75)$$

$$T_{Lodo} = 0,2844 T_{Ambiente} + 0,1956 T_{Tierra} + 0,3578 T_{Invernadero} + 0,1622 T_{Mezcla} \dots\dots\dots (76)$$

También es importante saber la eficiencia de la transferencia de calor ganado por aporte del invernadero:

$$\dot{Q}_{Radiacion} = \frac{b}{r} A \alpha \tau G \dots\dots\dots (77)$$

$$n = \frac{\dot{Q}_{Ganado}}{\dot{Q}_{Radiacion}} \times 100\% \dots\dots\dots (78)$$

Dónde:

$\dot{Q}_{Radiacion}$: Transferencia de calor por radiación (W)

G : Irradiación (W/m^2)

τ : Transmisividad del plástico invernadero a un ángulo 60°

α : Absortividad del domo a un ángulo 60°

n : Eficiencia del aporte térmico del invernadero

2.9 Poder calorífico del biogás.

Para hacer la equivalencia energética del biogás con los demás combustibles, es necesario calcular el poder calorífico Q/m^3 .

Para ello se hace hervir una cierta cantidad en kg. de agua, se mide el ΔT , y se reemplaza a la siguiente ecuación:

$$Q_{Absorvido} = C_p m \Delta T \dots\dots\dots (79)$$

Luego el calor generado en el momento de la combustión es:

$$Q_{Suministrado} = P_{Biogas} V_{Biogas} \dots\dots\dots (80)$$

De todo el calor generado por el biogás, solo una parte es aprovechada, el rendimiento del biogás es:

$$R = \frac{Q_{Absorvido}}{Q_{Suministrado}} = 0,42805 \dots\dots\dots (81)$$

Dónde:

$Q_{Absorvido}$: Calor que absorbe el biogás. (J óWh)

$Q_{Suministrado}$: Calor que suministra el biogás. (J óWh)

P_{biogas} : Poder calorífico del biogás (J/m^3 óWh/ m^3)

V_{Biogas} : Volumen del biogás (m^3)
 C_p : Calor específico del agua ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
 m : Masa del agua (kg)
 ΔT : Aumento de temperatura del agua ($^\circ\text{C}$)
 R : Rendimiento $\sim 0,42805$

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

	Densidad kg/m^3	kcal/kg	PCI kWh/kg	te/kg	MJ/kg	PCS MJ/kg
GLP Propano	506 ⁽¹⁾	11.073	12,88	11,07	46,35	50,45
GLP Butano	580 ⁽¹⁾	10.939	12,72	10,94	45,79	49,68
Queroseno	780	10.368	12,06	10,37	43,40	46,50
Gasóleo C	850	10.099	11,74	10,10	42,28	43,12
Fuelóleo nº 1	944	9.699	11,28	9,70	40,60	42,70

(1) Densidad en estado líquido a 20°C

COMBUSTIBLES GASEOSOS

	Densidad RELATIVA ⁽¹⁾	kcal/ m^3	PCI kWh/m^3	te/ m^3	MJ/ m^3	PCS MJ/m^3
Gas natural	0,63 ⁽²⁾	9.228	10,73	9,23	38,63	42,92
Gas ciudad	0,65	4.037	4,69	4,04	16,90	18,20
Propano	1,85 ⁽³⁾	20.484	23,8	20,5	85,7	93,3
Butano	2,41 ⁽³⁾	26.253	30,5	26,3	109,9	119,2

Figura N°22 : Poder calorífico de combustibles
 Fuente : Instituto para la diversidad y ahorro de energía (2014)

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y RECURSOS EMPLEADOS

3.1 Tipo de investigación

Según el propósito de la investigación es aplicada, ya que obtiene su información directamente con la práctica, según la profundidad de la investigación esta es explicativa ya que muestra preocupación en determinar los orígenes o las causas de los fenómenos que suceden, según como se codifica la información es cuantitativa ya que permite analizar la información codificada de manera numérica sin que intervengan juicios de valor.

3.2 Diseño de la investigación

Este trabajo es experimental, pues se pretende aumentar la producción de biogás, bioabono y biol con la incorporación del sistema de aislamiento en el biodigestor y la construcción de un invernadero sobre la misma y, con la toma y análisis de datos confirmar cuantitativamente el resultado.

3.3 Población

Está definida por la materia orgánica generada en las adyacentes de la comunidad de Yaurisque, distrito de Yaurisque, provincia de Paruro, departamento de Cusco; y consta por todos las excretas del vacuno, del ovino, del porcino, del cuy, etc. es decir un universo de 4 m³ en un mes.

3.3.1 Muestra

Corresponde a una porción de población tomada de manera adecuada por la relación de carbono y nitrógeno, la humedad relativa y el nivel de pH, con un muestreo no probabilístico, equivalente a 0.90 m³ y 1.78 m³ de residuos orgánicos, para las dos evaluaciones con una duración de 3 meses para cada una.

3.4 Descripción del trabajo realizado

3.3.2 Proceso de carga al biodigestor

El biodigestor se carga con una mezcla de residuos orgánicos (excreta de conejo, excreta cuy y paja de trigo) y agua, con una relación de mezcla de 1:5 respectivamente, para la primera evaluación.

Para la segunda evaluación se usaron las excretas del ovino, equino y bobino, con una relación de mezcla de 1:2 con el agua.

El procedimiento de cargado del lodo al biodigestor es el siguiente:

- Realizar la mezcla de los sólidos con el agua (solo el necesario), por 3 días para que se vayan disolviendo.
- Una vez disueltos incorporar el agua (caliente) restante, para empezar a cargar el biodigestor.
- Sellar herméticamente el biodigestor, y esperar la producción del biogás.

3.3.3 Evaluación del Biodigestor Chino Mejorado

Se evalúa el comportamiento térmico del biodigestor relacionado al calentamiento de la mezcla del lodo, al sistema de aislamiento y la incorporación del invernadero. Como también la evolución de temperatura para los dos tipos de carga y la cuantificación en la producción de biogás, biol y bioabono.

3.5 Asignación de recursos

3.3.1 Recursos humanos

- Investigador responsable
- Asesor
- Otros profesionales de consulta

3.3.2 Recursos materiales

- Sensores de temperatura: termocupla tipo T (cobre constantan) y termoresistencia Pt₁₀₀.
- Multímetro digital Prasek pr-301.
- Medidor de humedad relativa (HR) y temperatura Hygro-Thermometer.
- Medidor de nivel de pH y temperatura pH-metro.
- Termómetro digital de -50°C a +150°C Digital Pocket Thermometer.
- Estación meteorológica de CECADE para medir la radiación solar.

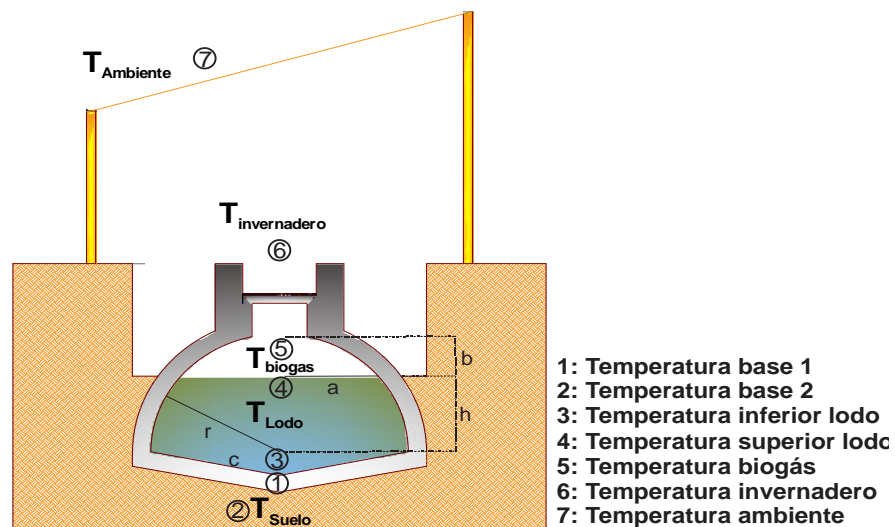


Figura N°23 : Ubicación de los sensores de temperatura
Fuente : Archivos propios(2014)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Proceso de carga de lodo al biodigestor

A. Primera carga

Se realiza una mezcla de excretas de conejos, excretas cuy, paja de trigo y agua con una relación de 1:5 respectivamente, de la tabla N°02 se calcula la relación carbón/nitrógeno y la cantidad de sólidos totales (con relación a la humedad relativa de la mezcla).

Tabla N°05. Valores para la primera carga

Mezcla		Porcentaje %	Volumen (m ³)		Relación carbón/nitrógeno	Sólidos totales %	Humedad relativa %
Residuos orgánicos	Excreta de conejo	45	0,40	0,90	25,40	75,60	24,40
	Excreta de cuy	45	0,40				
	Paja de trigo	10	0,10				
Agua		100	4,43		0	0	100
Total de la mezcla 1:5		100	5,33		25,40	12,60	87,40

Fuente: Archivos propios (2014)

B. Segunda carga

Para la segunda carga se realiza una mezcla de excretas de ovino, excretas equino, excretas de bovino y agua con una relación de 1:2 respectivamente, de la Tabla N°02 se calcula la relación carbón/nitrógeno y la cantidad de sólidos totales (con relación a la humedad relativa de la mezcla).

TablaN°06. Valores para la segunda carga

Mezcla		Porcentaje %	Volumen (m ³)		Relación carbón/nitrógeno	Sólidos totales %	Humedad relativa %
Residuos orgánicos	Excreta de ovino	10	0,18	1,78	20,10	23,40	76,60
	Excreta de equino	45	0,80				
	Excreta de bobino	45	0,80				
Agua		100	3,55		0	0	100
Total de la mezcla 1:2		100	5,33		20,10	7,80	92,20

Fuente: Archivos propios (2014)

4.2 Análisis de transferencia de calor

Para conocer el funcionamiento térmico del biodigestor relacionado al calentamiento de la mezcla de entrada, al sistema de aislamiento y del aporte térmico del invernadero, aplicaremos las fórmulas de transferencia de calor desarrolladas en el capítulo 2.

4.2.1 Evaluación del calentamiento del lodo

De las ecuaciones (35) y (57), analizaremos efecto del calentamiento de la mezcla, para $T_{Tierra} = 12^\circ\text{C}$ y haciendo $T_a = 10, 15$ y 20°C se tiene:

- Sin aislamiento:

$$T_{Mezcla} = 30,3951T_{Lodo} - 1,7220T_{Ambiente} - 331,4772^\circ\text{C}$$

$$T_{Mezcla} = \begin{cases} 30,3951T_{Lodo} - 348,6972^\circ\text{C}, & \text{para } T_a = 10^\circ\text{C} \\ 30,3951T_{Lodo} - 357,3072^\circ\text{C}, & \text{para } T_a = 15^\circ\text{C} \\ 30,3951T_{Lodo} - 365,9172^\circ\text{C}, & \text{para } T_a = 20^\circ\text{C} \end{cases}$$

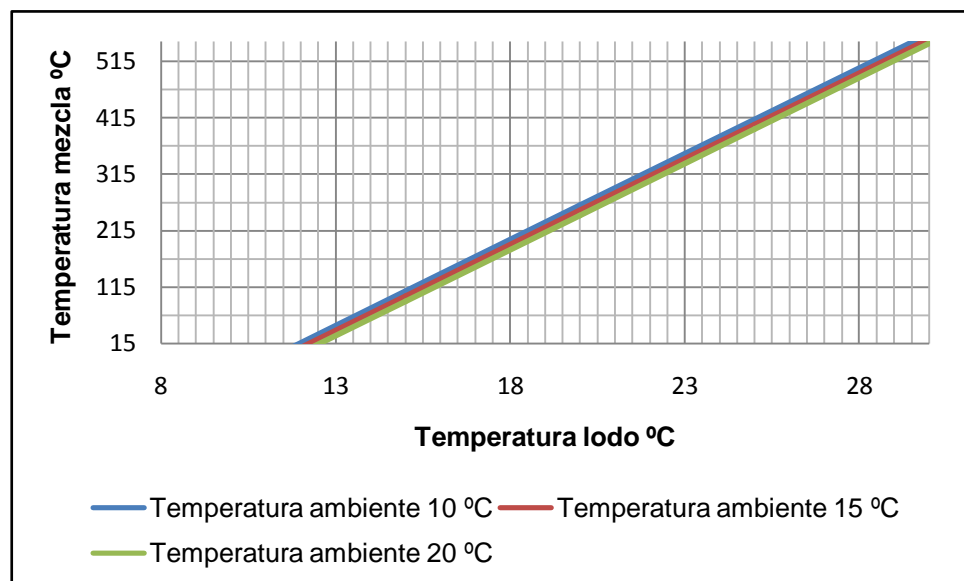


Figura N°24 : Variación de la temperatura de mezcla respecto a la temperatura del lodo (sin aislamiento)

Fuente : Archivos propios (2014)

La Figura N°24 nos muestra la variación de la temperatura de mezcla en función de la temperatura del lodo, para diferentes temperaturas ambientes. Observemos que para poder mantener la temperatura del lodo constante es necesario grandes temperaturas de la mezcla, para un sistema sin aislamiento.

- Con aislamiento:

$$T_{Mezcla} = 3,9604T_{Lodo} - 1,7541T_{Ambiente} - 14,4723^{\circ}C$$

$$T_{Mezcla} = \begin{cases} 3,9604T_{Lodo} - 32,0133^{\circ}C, & \text{para } T_a = 10^{\circ}C \\ 3,9604T_{Lodo} - 40,7838^{\circ}C, & \text{para } T_a = 15^{\circ}C \\ 3,9604T_{Lodo} - 49,5543^{\circ}C, & \text{para } T_a = 20^{\circ}C \end{cases}$$

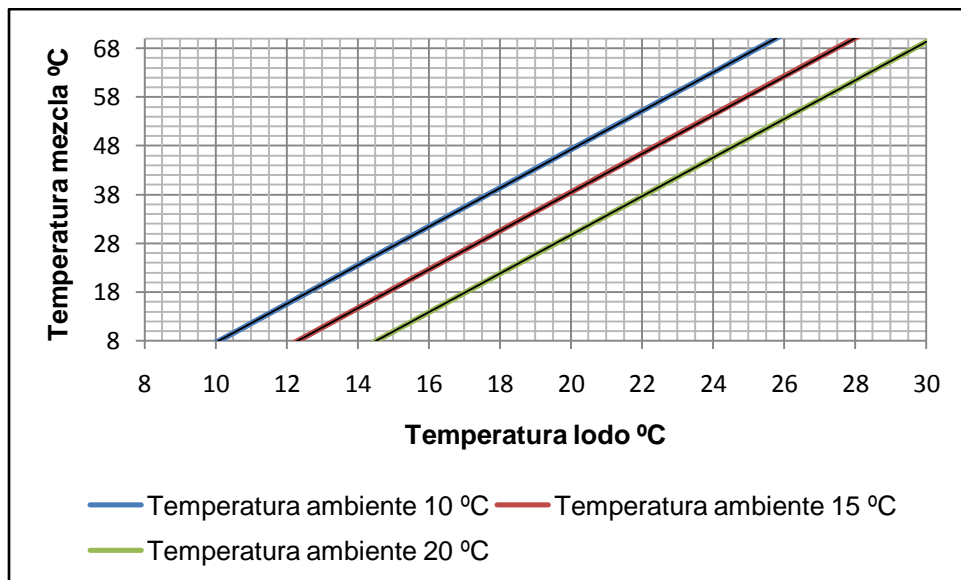


Figura N°25 : Variación de la temperatura de mezcla respecto a la temperatura del lodo (con aislamiento)

Fuente : Archivos propios (2014)

La Figura N°25 nos muestra la variación de la temperatura de mezcla en función de la temperatura del lodo, para diferentes temperaturas ambientes. Supongamos que queremos mantener la temperatura del lodo a 20°C, siendo la temperatura ambiente de 15°C, analizando obtendremos una temperatura de mezcla de 38°C.

4.2.2 Evaluación del sistema de aislamiento

El aislamiento en el fondo y en la pared del biodigestor, como también el uso del invernadero cuando $T_{\text{Invernadero}}$ es menor a la T_{Lodo} , disminuye las pérdidas de calor.

Para temperaturas promedios $T_{\text{Ambiente}}=14^\circ\text{C}$, $T_{\text{Lodo}}=18^\circ\text{C}$,
 $T_{\text{Tierra}}=12^\circ\text{C}$

- Sin aislamiento:

De la ecuación (25) en conjunto con (33) y (34) tenemos:

$$\dot{Q}_{\text{Perdido}} = U_1 A (T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Ambiente}}) + U_2 A (T_{\text{Lodo}} - T_{\text{Tierra}})$$

$$\dot{Q}_{\text{Perdido}} = 6,89 \frac{W}{^\circ\text{C}} (19^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C}) + 107,45 \frac{W}{^\circ\text{C}} (18^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{\text{Perdido}} = 679,15 \text{ W}$$

- Con aislamiento:

De la ecuación (47) en conjunto con (55) y (56) tenemos:

$$\dot{Q}'_{Perdido} = U'_1 A (T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2 A (T_{Lodo} - T_{Tierra})$$

$$\dot{Q}'_{Perdido} = 6,82 \frac{W}{^{\circ}C} (19^{\circ}C - 14^{\circ}C) + 4,69 \frac{W}{^{\circ}C} (18^{\circ}C - 12^{\circ}C)$$

$$\dot{Q}'_{Perdido} = 62,24 W$$

Comparando $\dot{Q}_{Perdido}$ con $\dot{Q}'_{Perdido}$, podemos apreciar el sistema de aislamiento y la implementación del invernadero disminuyen aproximadamente 616,91 W.

4.2.3 Evaluación del aporte térmico del invernadero al biodigestor

La implementación del invernadero se realizó para aumentar la temperatura del lodo, de la ecuación (76) tenemos:

$$T_{Lodo} = 0,2844 T_{Ambiente} + 0,3578 T_{Invernadero} + 5,5912^{\circ}C$$

$$T_{Lodo} = \begin{cases} 0,3578 T_{Invernadero} + 8,4352^{\circ}C, & \text{para } T_a = 10^{\circ}C \\ 0,3578 T_{Invernadero} + 9,8572^{\circ}C, & \text{para } T_a = 15^{\circ}C \\ 0,3578 T_{Invernadero} + 11,2792^{\circ}C, & \text{para } T_a = 20^{\circ}C \end{cases}$$

Para $T_{Tierra} = 12^{\circ}C$, $T_{Mezcla} = 20^{\circ}C$

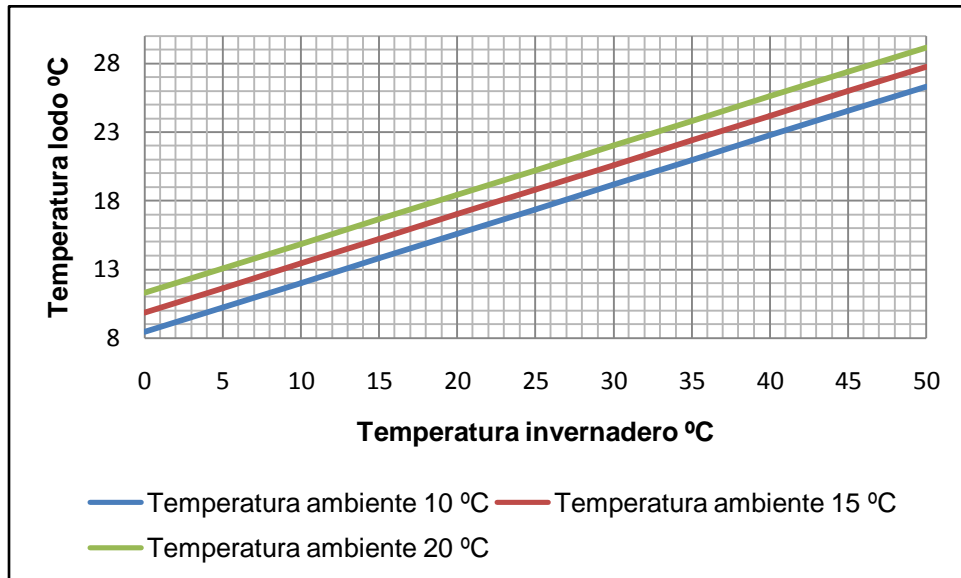


Figura N°26 : Variación de la temperatura del lodo respecto a la temperatura del invernadero

Fuente : Archivos propios (2014)

En la Figura N°26 se observa la variación de la temperatura del lodo con respecto a la temperatura del invernadero, aquel incremento es aproximadamente de 5°C.

El aporte térmico que genera el invernadero es calculado mediante su eficiencia térmica, de la ecuación (65), (75), (77) y (78) se obtiene:

$$\dot{Q}_{Ganado} = U'_3 A (T_{Invernadero} - T_{Lodo})$$

$$\dot{Q}_{Radiacion} = \frac{b}{r} A \propto \tau G$$

Para $U_3' A = 8,58 \text{ W}/^\circ\text{K}$, $T_{\text{Invernadero}} = 22^\circ\text{C}$, $T_{\text{Lodo}} = 18^\circ\text{C}$,
 $G = 431,47 \text{ W}/\text{m}^2$, $\tau = 0,60$, $\alpha = 0,60$

Entonces se tiene:

$$\dot{Q}_{\text{Ganado}} = 34,32 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Radiacion}} = 683,17 \text{ W}$$

$$n = \frac{\dot{Q}_{\text{Ganado}}}{\dot{Q}_{\text{Radiacion}}} \times 100\% = \frac{34,32 \text{ W}}{683,17 \text{ W}} = 5,02\%$$

De todo el calor que absorbe el invernadero solo el 5,02 % es aprovechado, el resto es dispersado hacia la tierra y las paredes laterales, y perdidos también hacia el ambiente.

4.2.4 Evaluación de la eficiencia térmica del biodigestor

A. Calor suministrado hacia el biodigestor

- Aporte del invernadero

De la ecuación (65)

$$\dot{Q}_{Ganado} = U'_3 A (T_{Invernadero} - T_{Lodo}) = 34,32 W$$

- Aporte del calentamiento de la mezcla de entrada

De la ecuación (58)

$$\dot{Q}_{Externo} = U'_1 A (T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2 A (T_{Lodo} - T_{Tierra}) - \dot{m} C_p (T_{Mezcla} - T_{Lodo})$$

$$\dot{Q}_{Externo} = 54,46 W$$

$$\dot{Q}_{suministrado} = \dot{Q}_{Ganado} + \dot{Q}_{Externo} = 88,78 W$$

B. Perdidas de calor del biodigestor

$$\dot{Q}'_{Perdido} = U'_1 A (T_{Lodo} - T_{Ambiente}) + U'_2 A (T_{Lodo} - T_{Tierra})$$

$$\dot{Q}'_{Perdido} = 62,24 W$$

C. Flujo de calor útil

$$\dot{Q}_{\text{Útil}} = \dot{Q}_{Ganado} + \dot{Q}_{Externo} - \dot{Q}'_{Perdido} = 26,54 W$$

D. Eficiencia térmica

$$n = \frac{\dot{Q}_{\text{Útil}}}{\dot{Q}_{suministrado}} \times 100\% = \frac{26,54 W}{88,78 W} = 29,89\%$$

4.3 Evolución de la temperatura durante la evaluación del biodigestor

4.3.1. Primera carga

Para la primera carga se utilizó materia orgánica de excretas de conejo, excretas de cuy y paja de trigo (seco), haciendo la mezcla con agua caliente a 70°C de temperatura, obteniéndose finalmente una temperatura de mezcla de 25°C, con una relación de 1:5 respectivamente.

Tabla N°07. Parámetros ambientales para la primera carga

Semanas	Temperatura ambiente °C	Temperatura en el invernadero °C	HR ambiente %	HR en el invernadero %
1	16,66	23,53	55,26	84,71
2	16,36	25,07	57,72	88,39
3	15,34	23,45	57,93	88,21
4	16,80	22,29	52,41	81,04
5	16,25	22,13	53,55	81,78
6	16,04	21,66	56,90	84,68
7	15,51	20,27	58,89	83,57
8	14,86	20,24	58,43	83,43
9	15,28	20,19	56,26	82,03
10	15,02	20,39	51,14	78,41
PROMEDIO TOTAL	15,81	21,92	55,85	83,62

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°08. Parámetros en el biodigestor para la primera carga

Semanas	Temperatura del biogás	Temperatura inferior del lodo °C	Temperatura superior del lodo °C	Temperatura base2	Temperatura base1
1	24,23	22,67	23,56	12,76	17,46
2	23,02	20,00	20,16	13,01	15,79
3	22,79	18,99	19,25	12,46	14,86
4	22,24	18,38	18,51	12,33	14,72
5	22,63	18,13	18,40	12,20	14,25
6	22,83	17,96	18,07	11,44	13,20
7	22,39	18,06	18,68	12,86	14,61
8	22,29	18,21	18,83	13,61	15,33
9	21,71	17,99	18,58	13,63	14,49
10	20,85	17,82	18,34	13,72	15,03
Promedio Total	22,50	18,82	19,24	12,80	14,97

Fuente: Archivos propios (2014)

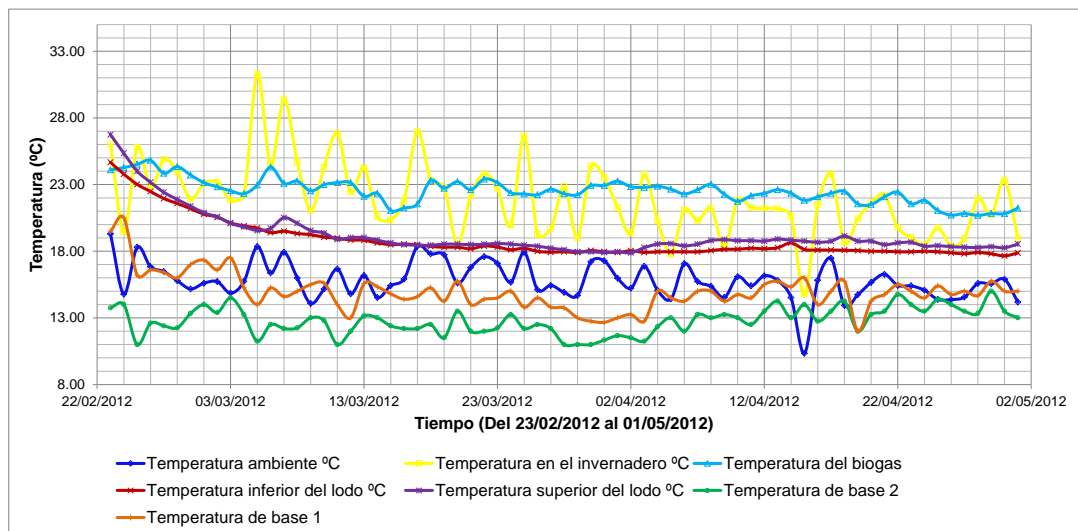


Figura N°27 : Evolución de temperaturas promedios diarios 1 carga

Fuente : Archivos propios (2014)

En la Figura N°27 se observa la evolución de las temperaturas diarias, donde la temperatura del lodo se mantiene casi constante durante la evaluación y también la temperatura del biogás muestra poca variación comparado con las demás temperaturas.

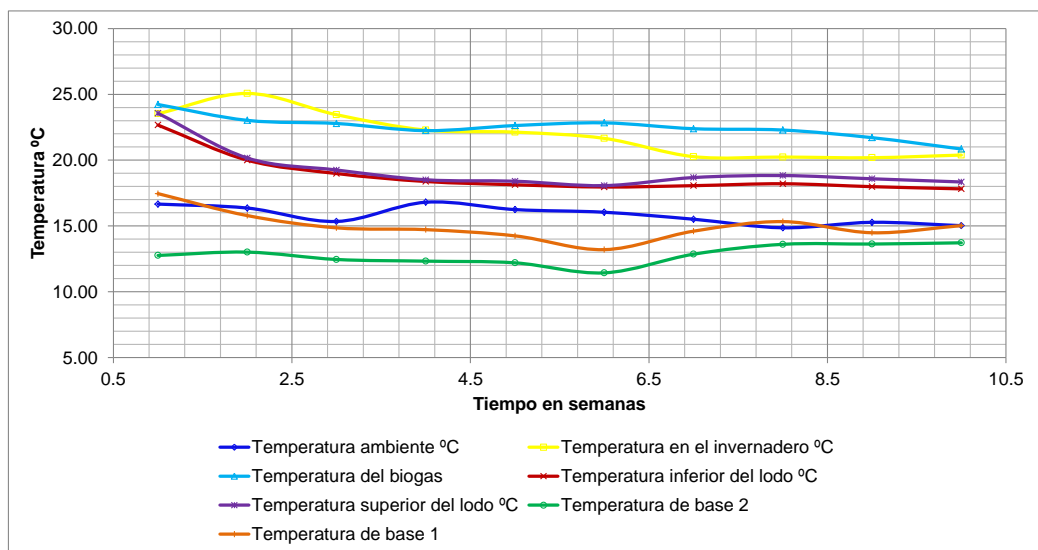


Figura N°28 : Evolución de temperaturas promedios semanales 1 carga
Fuente : Archivos propios (2014)

En la Figura N°28 se muestra la evolución de las temperaturas en promedios semanales, en donde se corrobora que la temperatura del lodo se mantiene constante aproximadamente entre 18°C y 19°C, mientras que la temperatura del biogás está entre 22°C. En la Figura N°29 se muestran los promedios para cada temperatura:

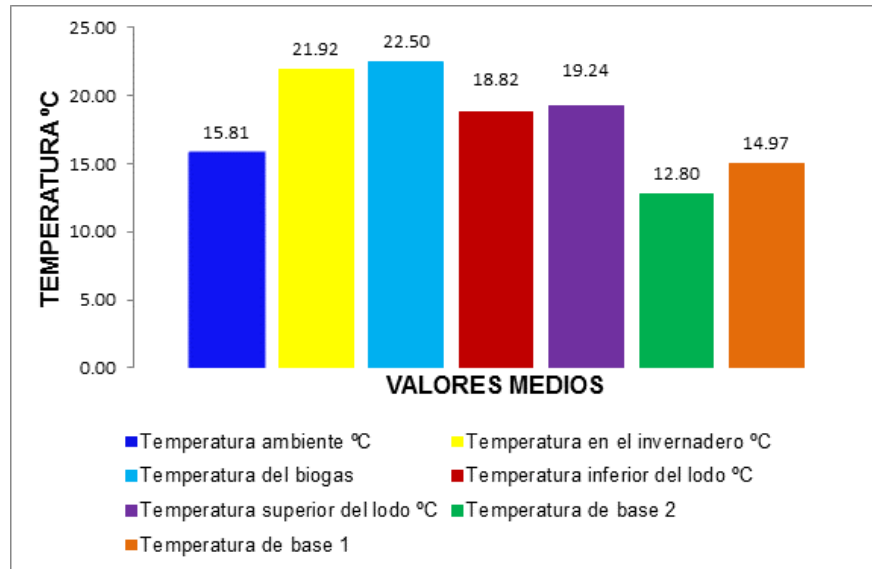


Figura N°29 : Promedios de temperaturas 1 carga
Fuente : Archivos propios (2014)

Tabla N°09. Parámetros ambientales en un día para la primera carga

Horas	Temperatura ambiente °C	Temperatura en el invernadero °C	HR ambiente %	HR en el invernadero %
06:00	9,98	12,26	66,27	77,62
08:00	12,55	15,63	67,84	80,90
10:00	16,03	22,54	59,01	86,82
12:00	19,00	27,96	48,97	88,28
14:00	19,14	28,12	46,97	86,89
16:00	17,68	24,56	49,06	83,76
18:00	14,13	16,93	57,36	78,04

Fuente: Archivos Propios (2014)

TablaNº10. Parámetros en el biodigestor en un día para la primera carga

Horas	Temperatura inferior del lodo °C	Temperatura superior del lodo °C	Temperatura base2	Temperatura base1
06:00	18,66	19,12	14,50	17,50
08:00	18,73	19,16	13,00	16,50
10:00	18,85	19,22	12,79	15,00
12:00	18,82	19,23	12,09	13,95
14:00	18,90	19,30	12,81	15,00
16:00	18,90	19,36	13,30	15,72
18:00	18,87	19,32	14,43	16,71

Fuente: Archivos propios (2014)

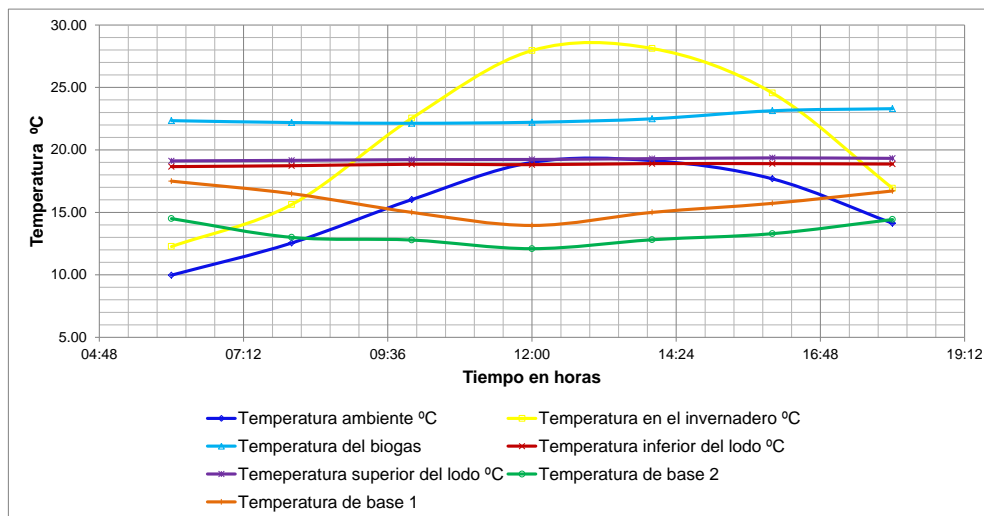


Figura N°30 : Evolución de temperaturas para un día 1 carga

Fuente : Archivos propios (2014)

La Figura N°30 nos muestra la evolución de la temperatura durante un día, en donde la temperatura del lodo y del biogás se mantienen constante, mientras que la temperatura del invernadero cambia proporcionalmente a la temperatura ambiente, en cambio la temperatura del suelo se mantiene baja.

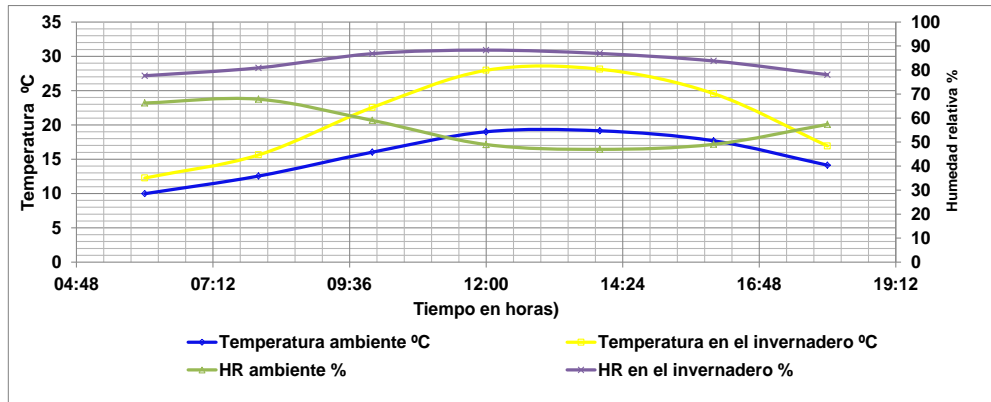


Figura N°31: Evolución de temperaturas y humedad relativa para un día 1 carga
Fuente : Archivos propios (2014)

En la Figura N°31 observamos la variación de la humedad relativa del ambiente y del invernadero relacionado con la temperatura ambiente y del invernadero respectivamente. Se deduce que la humedad relativa del invernadero crece al aumentar su temperatura por estar en un sistema cerrado, en cambio la humedad relativa del ambiente decrece al aumentar su temperatura.

4.3.2. Segunda carga

Para la segunda carga se utilizó materia orgánica de excretas de ovino, excretas de equino y excretas bobino, haciendo la mezcla con agua caliente a 70°C de temperatura, obteniéndose finalmente una temperatura de mezcla de 25 °C, con una relación de 1:2 respectivamente.

Tabla N°11. Parámetros ambientales para la segunda carga

Semanas	Temperatura ambiente °C	Temperatura en el invernadero °C	HR ambiente %	HR en el invernadero %
1	13,54	17,63	39,03	66,34
2	12,74	16,84	43,06	69,29
3	15,08	20,33	30,28	64,50
4	13,47	18,12	23,50	56,69
5	14,37	18,66	37,50	64,36
6	12,34	17,36	29,63	57,15
7	14,34	19,92	24,29	51,63
8	13,11	18,43	36,56	60,60
9	16,01	22,39	36,02	62,08
10	14,82	22,07	22,57	54,34
11	15,04	21,39	32,19	57,20
12	16,03	23,32	32,22	61,84
Promedio total	14,24	19,70	32,24	60,50

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°12. Parámetros en el biodigestor para la segunda carga

Semanas	Temperatura del biogás	Temperatura inferior del lodo °C	Temperatura superior del lodo °C	Temperatura base 2	Temperatura base 1
1	18,66	17,57	19,52	12,53	14,99
2	16,26	16,44	17,09	11,80	14,12
3	15,79	15,17	15,07	10,26	12,60
4	15,73	14,68	14,76	9,39	12,00
5	15,18	14,40	14,53	9,43	12,21
6	15,30	14,05	14,08	9,42	11,85
7	16,08	13,97	14,05	8,33	10,71
8	16,58	14,05	14,17	7,76	10,76
9	17,82	14,23	14,69	9,31	12,13
10	18,88	14,63	15,20	10,17	12,38
11	19,31	14,96	15,51	10,13	12,26
12	19,11	15,35	15,80	10,57	12,77
Promedio total	17,06	14,96	15,37	9,92	12,40

Fuente: Archivos propios (2014)

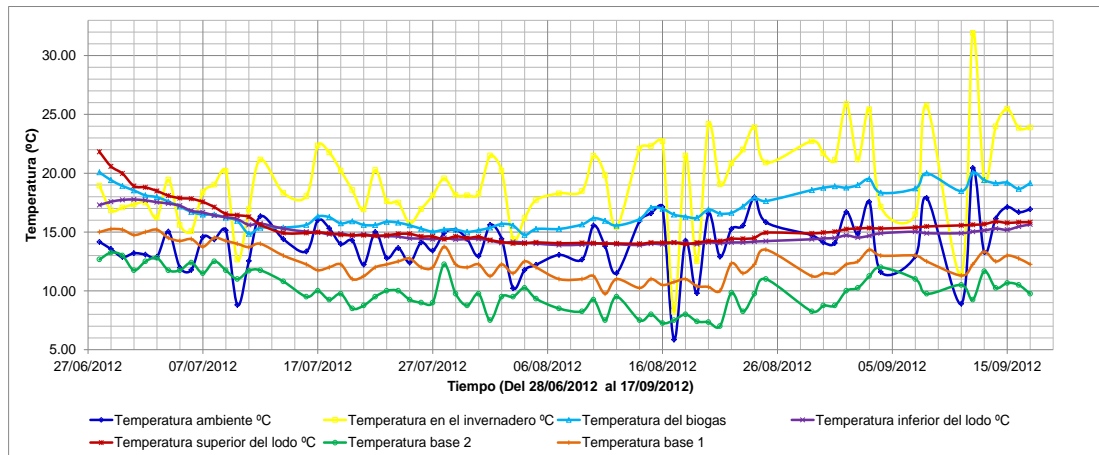


Figura N°32 : Evolución de temperaturas promedios diarios 2 carga

Fuente : Archivos propios (2014)

En comparación a la Figura N°27, para esta evaluación existió bajones de temperatura ambientales, que llegaron alcanzar en promedio día alrededor de 6°C, pero eso no hizo variar en gran cantidad la temperatura del lodo y del biogás, las cuales llegan mantenerse en 15°C y 17°C respectivamente.

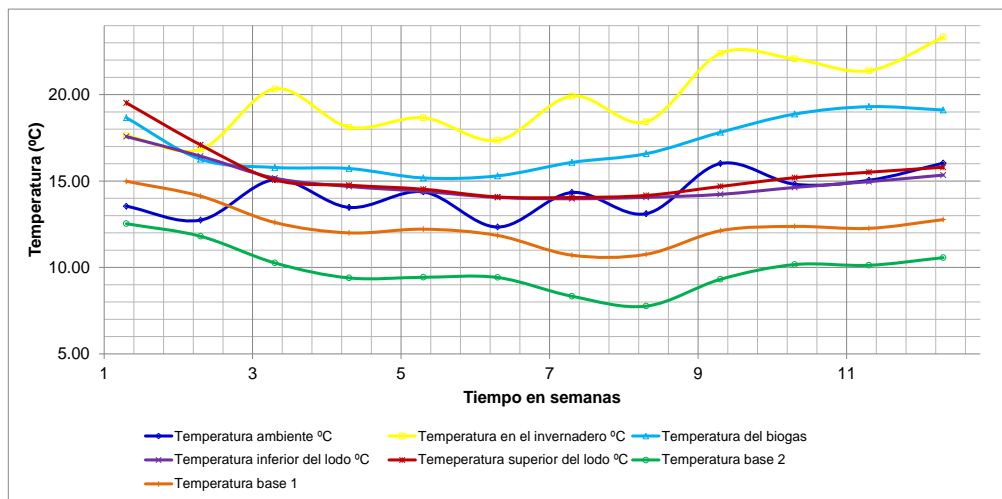


Figura N°33 : Evolución de temperaturas promedios semanales 2 carga
Fuente : Archivos propios (2014)

En la Figura N°33 se muestra la evolución de las temperaturas en promedios semanales, en donde la temperatura del lodo se mantiene constante a 15°C, mientras que la temperatura del biogás está entre 17°C.

Es el mismo caso que la Figura N°30, no existe una mayor variación de la temperatura del lodo y del biogás, en comparación a la variación de las demás temperaturas.

En la Figura N°34 se muestran los promedios para cada temperatura:

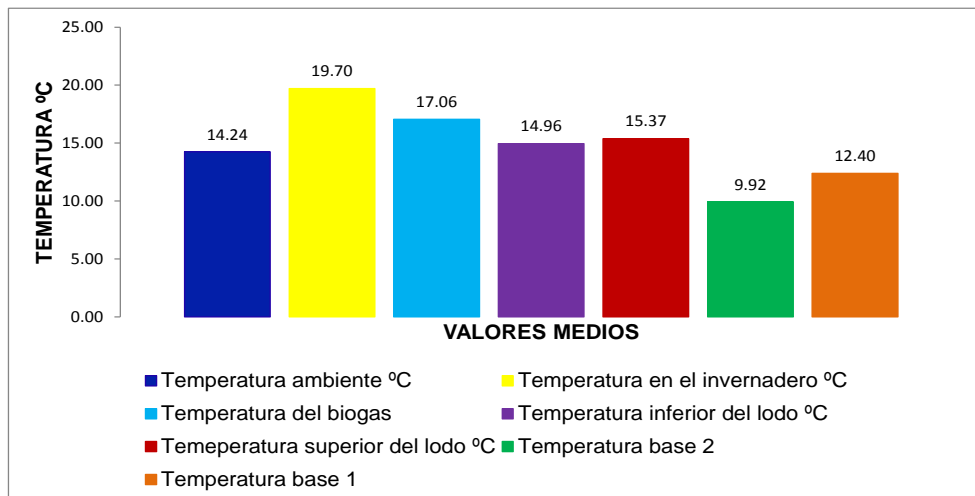


Figura N°34: Promedios de temperaturas 2 carga

Fuente : Archivos propios (2014)

Tabla N°13. Parámetros ambientales en un día para la segunda carga

Horas	Temperatura ambiente °C	Temperatura en el invernadero °C	HR ambiente %	HR en el invernadero %
06:00	4,10	6,78	39,73	51,51
08:00	6,80	9,19	43,70	56,33
10:00	14,29	18,97	35,94	67,99
12:00	18,70	26,93	27,31	66,11
14:00	20,49	30,51	23,63	64,98
16:00	19,59	26,19	23,82	59,81
18:00	13,16	14,78	28,83	52,26

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°14. Parámetros en el biodigestor en un día para la segunda carga

Horas	Temperatura del biogás	Temperatura inferior del lodo °C	Temperatura superior del lodo °C	Temperatura base 2	Temperatura base 1
06:00	16,71	15,00	15,46	11,67	13,33
08:00	16,43	14,97	15,42	12,00	14,00
10:00	16,31	15,01	15,43	10,71	13,29
12:00	16,37	15,08	15,57	9,20	11,54
14:00	17,14	15,15	15,64	9,05	11,88
16:00	17,84	15,20	15,68	10,75	13,32
18:00	18,02	15,23	15,68	14,00	14,33

Fuente: Archivos propios (2014)

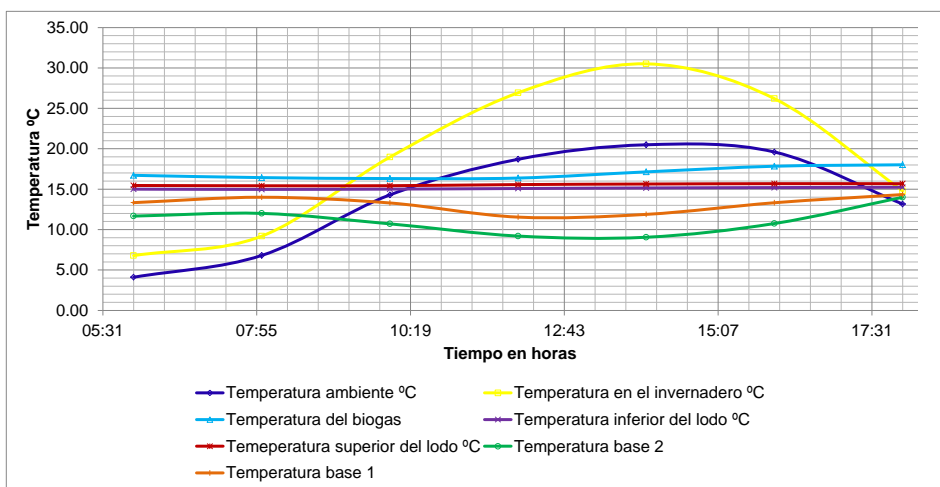


Figura N°35: Evolución de temperaturas para un día 2 carga

Fuente : Archivos propios (2014)

La Figura N°35 nos muestra la evolución de la temperatura durante un día, en donde la temperatura del lodo y del biogás se mantienen constante, mientras que la temperatura del invernadero cambia proporcionalmente a la temperatura ambiente, iniciando

esta última a 5°C para las 6:00 a.m. llegando 20°C para el medio día, y finalmente para el atardecer llegando a 10°C.

En la Figura N°36 se observa la variación de la humedad relativa del ambiente y del invernadero, en función de la temperatura durante un día determinado, del mismo modo que la primera evaluación, en esta oportunidad también el invernadero produce un micro clima interno con una humedad relativa que aumenta proporcionalmente a la temperatura del invernadero.

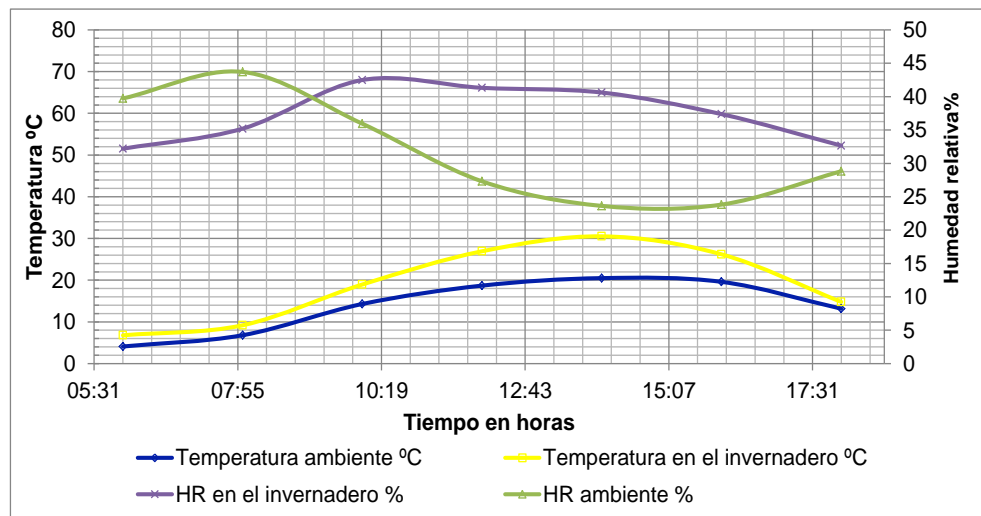


Figura N°36: Evolución de temperaturas y humedad relativa para un día 2 carga
Fuente : Archivos propios (2014)

4.4 Evolución de la radiación solar

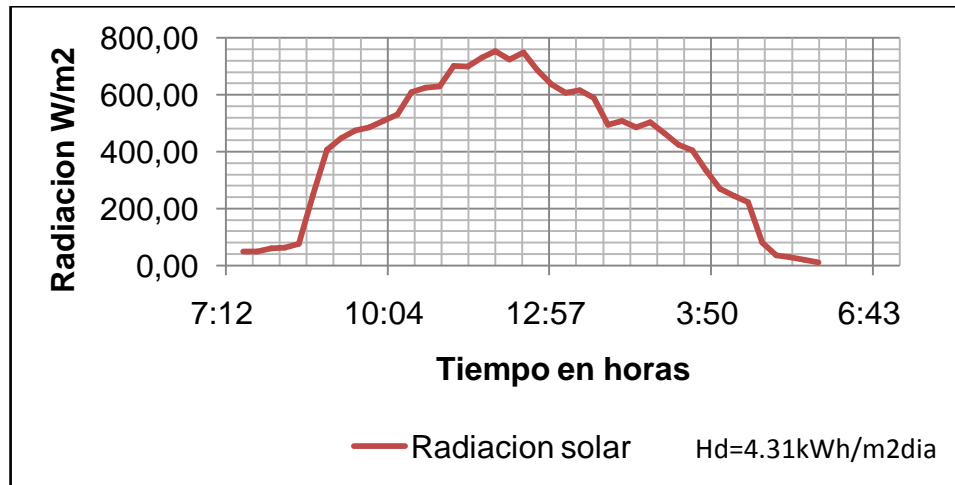


Figura N°37 : Evolución de la radiación solar

Fuente : Archivos propios (2014)

Tabla N°15. Radiación solar diaria

Horario	Temperatura ambiente	Radiación solar
07:30 a.m.	4,16	50,50
08:30 a.m.	5,02	75,46
09:30 a.m.	9,16	475,00
10:30 a.m.	11,43	609,88
11:30 a.m.	13,38	699,81
12:30 p.m.	15,02	748,62
01:30 p.m.	15,95	616,62
02:30 p.m.	16,20	484,69
03:30 p.m.	16,85	403,81
04:30 p.m.	16,04	223,41
05:30 p.m.	12,76	19,70
05:45 p.m.	12,24	10,70

Fuente: Archivos propios (2014)

De la Figura N°37 se obtiene la radiación solar diaria, la cual es de 4,31kWh/m² día, y en la figura 38 se observa el efecto que genera la radiación solar en las diferentes temperaturas de la evaluación del biodigestor.

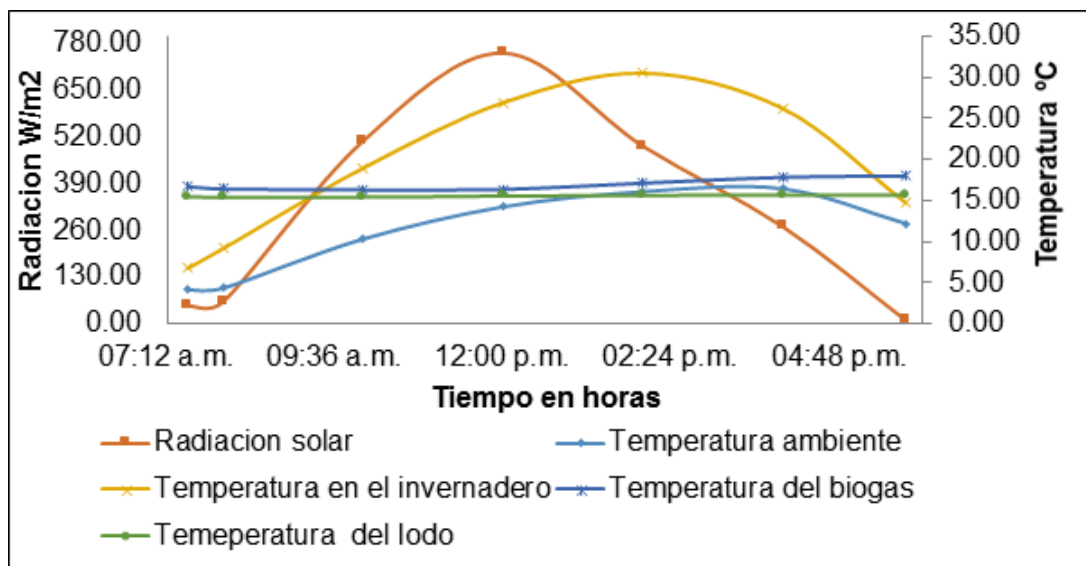


Figura N°38 : Evolución de la radiación solar en comparación a las temperaturas

Fuente : Archivos propios (2014)

4.5 Producción de biogás,biol y bioabono

4.4.1 Producción de biogás

Después de unos 15 a 25 días, de haber realizado la carga de lodo al biodigestor, empieza a producir biogás.

La primera bolsa de biogás normalmente contiene poco porcentaje de metano, el cual no prende con intensidad. Luego las siguientes bolsas contienen una buena cantidad de metano.

Tabla N°16. Producción de biogás 1 carga

Semana	Presión del biogás (mmH ₂ O)/día	Volumen (m ³ /día)
3	16,00	0,14
4	13,00	0,11
5	12,00	0,11
6	14,00	0,12
7	16,00	0,14
8	17,00	0,15
9	15,00	0,13
10	16,00	0,14
Promedio	14,88	0,13

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°17. Producción de biogás 2 carga

Semana	Presión del biogás (mmH ₂ O)/día	Volumen (m ³ /día)
3	60,00	0,53
4	55,00	0,48
5	40,00	0,35
6	35,00	0,31
7	40,00	0,35
8	35,00	0,31
9	25,00	0,22
10	25,00	0,22
Promedio	39,38	0,35

Fuente: Archivos propios (2014)

Se calcula también el poder calorífico del biogás, calculando el calor absorbido por el agua en el momento de quemarse el biogás, de la ecuación (79), (80) y (81) se tiene:

Tabla N°18. Poder calorífico del biogás

ΔT (°C)	Masa del agua (kg)	Volumen biogás (m ³)	Poder calorífico (kWh/m ³)
75	1	0,10	2,15
73	1	0,09	2,21
72	1	0,09	2,31
76	1	0,10	2,07
75	1	0,09	2,20
74	1	0,10	2,12
75	1	0,10	2,09
76	1	0,10	2,14
Promedio			2,16

Fuente: Archivos propios (2014)

El poder calorífico del biogás es de 2,16 kWh/m³, su bajo valor corresponde a la presencia de vapor de agua y dióxido de carbono.

Un metro cúbico de biogás equivale a 200 litros de gas natural, y a 80 litros de gas propano.

4.4.2 Producción de biol

La producción de biol, empieza en el momento de realizar las cargas diarias o semanales, luego de unos 30 días.

El buen uso de biol, nutre a las plantas, alimenta los terrenos con nitrógeno, fosforo y potasio.

Tabla N°19. Producción de biol para la primera carga

Semana	Producción de biol (litros)	Nivel de pH
5	126	7,27
6	126	7,45
7	120	7,49
8	130	7,20
9	135	7,50
10	150	7,65

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°20. Producción de biol para la segunda carga

Semana	Producción de biol (litros)	Nivel de pH
5	70	7,21
6	70	7,04
7	80	7,30
8	70	7,00
9	80	6,70
10	100	7,00

Fuente: Archivos propios (2014)

Tabla N°21. Análisis del biol

Análisis Físicoquímico	
pH	7,75
C.E. mmhos/cm	4,70
Materia orgánica %	0,77
Nitrógeno %	0,028
Fosforo ppm P ₂ O ₂	222,00
Potasio ppm K ₂ O	396,00
Hierro ppm	5,80
Calcio ppm	27,20
Magnesio ppm	112,90
N Amoniacal %	0,004
N Nitratos	0,0024

Fuente: Archivos propios (2014)

4.4.3 Producción de bioabono

La obtención se da después de cada carga, aproximadamente 2m³, este bioabono es rico en amoniaco; y, su uso y empleo es directamente sobre el terreno. A continuación se muestra un análisis fisicoquímico del bioabono.

Tabla N°22. Análisis del bioabono

Análisis Fisicoquímico	
pH	7,120
C.E. mmhos/cm	1,160
Materia orgánica %	26,530
Nitrógeno %	1,050
Fosforo % P ₂ O ₂	2,200
Potasio % K ₂ O	1,160
Hierro %	0,044
Calcio %	0,076
Magnesio %	0,133
N Amoniacal %	0,250
N Nitratos	0,800

Fuente: Archivos propios (2014)

4.4.4 Análisis económico

Tabla N°23. Inversión para el primer año

INVERSIÓN INICIAL		
Descripción	Cantidad	Costo S/.
Construcción del biodigestor	-	3 305,00
Sustrato de residuos orgánicos	1,7m ³	50,00
Calentamiento del agua a 70 °C (mediante terma solar)	3,5m ³	35,00
Personal para realizar la carga	3	60,00
Total		3 450,00
CARGAS DIARIAS		
Mezcla del lodo a 20°C	0,089m ³ por día	3,00
Personal 3 horas por día	1	10,00
Total		13,00
PARA UN AÑO DE FUNCIONAMIENTO		
Mezcla del lodo a 20°C	0,089m ³ por día	1 095,00
Personal 3 horas por día	1	3 650,00
3 cargas completas		435,00
Total		5 180,00
TOTAL		8 630,00

Fuente: Archivos propios (2014)

TablaN°24. Beneficio económico por año

BENEFICIOS				
Descripción	Producción	Valor unitario S/.	Valor por semana S/.	Valor por año S/.
Biol	100 litros por semana	1,00	100,00	5 200,00
Biogás	0,35 m ³ diarios	1,90	4,69	243,88
Bioabono	2m ³ por carga	100,00	-	800,00
TOTAL				6 243,88

Fuente: Archivos propios (2014)

Los beneficios económicos totales para el biodigestor es de S/.6243.88 nuevos soles por año, el costo de inversión en la construcción y el funcionamiento es de S/.8 630.00 nuevos soles, siendo recuperables a plazo de 4 año, debido a que el costo de inversión total por año seria de S/.5 325.00 sin considerar la inversión de la construcción del biodigestor para los siguientes años de su funcionamiento. Obteniendo una ganancia neta de S/.918.88 nuevos soles al año.

4.6 Discusión de los resultados

- Con la implementación del sistema de aislamiento y la instalación del invernadero, se disminuyó en mayor parte las pérdidas de calor del lodo dentro el biodigestor, como también se generó ganancia en días soleados. Lo que mantuvo la temperatura del lodo constante entre 18°C y 19°C para la primera carga; y, entre 15°C y 17°C para la segunda carga (ver Figura N°30 y N°35). Al realizar la mezcla de la materia orgánica con agua caliente, se logró temperaturas inicial es de 28°C y 23°C (ver Figura N°27 y N°32), acelerando la producción de biogás a los primeros 20 días, como también reduciendo el tiempo de retención del lodo de 120 días a 90 días en ambos casos. En comparación con el trabajo realizado por (Almanza Mamani, Fredy, 2011) quien obtuvo temperaturas entre 15°C y 17°C, y un tiempo de retención de 120 días, los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son congruentes.
- Se empleó como sustrato las excretas de cuy, excretas conejo y paja de trigo para la primera carga, con una relación de carbón/nitrógeno de 25,4 y humedad relativa del 87,40%; para la segunda carga se empleó excretas de ovino, excretas de equino y excretas de bobino con una relación carbón/nitrógeno del 20,10 y humedad relativa del

92,20%. Lográndose producir de 0,13m³de biogás por día para la primera carga y 0,35m³de biogás por día para la segunda carga, podemos decir que las excretas del, ovino, equino y bobino, tienen mayor producción de biogás, esto debido al no uso de materia orgánica vegetal, por el mismo hecho que es difícil su descomposición en comparación a los residuos orgánicos del animal.

- De todo esto se obtuvo un poder calorífico del 2,16kWh/m³. Este bajo poder calorífico comparado a los 5kWh/m³ (OEKOTOP, 1987) es debido a un aumento de vapor de agua por el incremento de temperatura dentro el invernadero ver Figura N°38, para lo cual sería recomendado reubicar el almacén de biogás en un lugar frío y seguro.
- Con el sistema de aislamiento e implementación del invernadero se reducen las pérdidas por transferencia de calor de 679,15 W a 62.24 W (al no poder reducir las pérdidas sería necesario agua caliente a 100°C para la mezcla). y se aumentan las ganancias por aporte del invernadero de 32,34 W y por aporte del agua caliente durante la mezcla de 54,46 W (correspondiente a 25°C), obteniéndose una eficiencia térmica del biodigestor de 29.89%.

- La producción de biol radica entre los 100 litros a 150 litros por semana, con un nivel de pH de 6,9 a 7,5 y finalmente consiguiendo 2 m³ de bioabono por carga, los cuales son usados para el cultivo de plantas, fertilización de terrenos pobres en nitrógeno potación y fosforo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

- Se concluye que es factible una buena digestión anaeróbica para obtener bioenergía al emplear los insumos orgánicos en las condiciones óptimas en relación de carbón y nitrógeno (25,4 y 20,10), humedad relativa (87,4 y 92,20) y niveles de pH (6,9 a 7,5).
- Con el sistema de aislamiento e implementación del invernadero se reducen las pérdidas de transferencia de calor de 679,15W a 62,24W, con una eficiencia térmica del 29.89%, en conclusión se logra reducir el aporte externo por calentamiento del lodo de carga de 100°C a 25°C.
- Se concluye, aunque varíen la temperatura ambiente y la temperatura dentro del invernadero (ver Figura N°27 y N°32), la temperatura del lodo tanto en la parte superior e inferior dentro del biodigestor se mantiene constante para las dos cargas realizadas, por lo que se realiza una fermentación del lodo en forma adecuada para producir biogás, bioabono y biol.

- Se llega a producir 100 a 150 litros de biol, 2 m³ de bioabono y 0,13 m³ y 0,35 m³ día de biogás por carga. Se determinó que influye mucho el insumo o materia orgánica que se emplea para la producción de biogás, ya que en la primera carga se utilizó materia orgánica vegetal (paja de trigo), mientras para la segunda carga se usó pura materia orgánica animal.
- Se ha evaluado la producción de biogás, biol y bioabono en un Biodigestor Chino Mejorado en zonas andinas, y se concluye que con todas las implementaciones hechas se redujo el tiempo de retención del lodo de 120 a 90 días, así acelerando la producción de biogás a los primeros 20 días para el suministrarlo en la cocción de alimentos y alumbrado; con la producción del biol y bioabono utilizarlo para el sembrado de las chacras disminuyendo el impacto de la contaminación ambiental.

5.2 Recomendaciones

- Disolver los sólidos de la materia orgánica días antes de la preparación de la mezcla, para disminuir el tiempo en producir biogás y el tiempo de retención de la carga dentro del biodigestor.
- Cubrir con un manta de plástico el domo del biodigestor por las noches para disminuir las pérdidas de calor.
- Usar agua caliente para preparar la mezcla de carga para aumentar la temperatura dentro el biodigestor.
- Para disminuir los problemas de vapor de agua en el uso del biogás, conservar el reservorio en un lugar frío y protegido.
- Es necesario en un futuro la construcción de un filtro de ácido sulfúrico H_2S del biogás, así mantener las tuberías en buen estado, para la cocción de alimento y/o alumbrado.
- Debido a que es necesario una mayor cantidad de suministro de energía para poder mantener el biodigestor a una temperatura constante y producir biogás de menor poder calorífico, se recomienda el uso de biodigestores en zonas andinas exclusivamente para la producción bioabono y biol en futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Referencias bibliográficas

- Almanza Mamani Fredy. (2011). Construcción y evaluación de un biodigestor modelo chino mejorado para zona andinas. Tesis de grado. Cusco-Perú. Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cusco.
- Colmenares, j. (1987). Evaluación de la producción de biogás y aislamientos de colonias bacterianas anaeróbicas en digestores batch o por lote, a partir de la utilización de desechos orgánicos. Tesis de grado. Maracay. Facultad de Agronomía. UCV
- Energía desarrollo y vida EDEVI. (2002). Como construir un biodigestor. Lima-Perú. EDEVI. Primera edición.
- Enriquez, Rosa. Manual de propiedades termo físicas de fluidos y sólidos en ingeniería. Arequipa -Perú. Universidad de San Agustín. Facultad de Ingeniería de Procesos.
- FLORES, MAURICIO (2011), Biodigestores la Calera. Seminario “Biodigestores, promoción y aportes para mejorar la competitividad rural en el Perú. MINAG. Lima, Perú

- Guardado Chacón José Antonio. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. La Habana-Cuba. Editorial Cuba Solar. Primera edición.
- Guerrero Figueroa Luis B. (1986). Plantas de biogás construcción y operación. Cajamarca-Perú. EDAC. Primera edición.
- Guevara Vera, Antonio. (1996). Fundamentos Básicos Para El Diseño De Biodigestores Anaeróbicos Rurales. Lima – Perú: CEPIS. 1ª Edición
- Hernandez- Sampieri, (1997). Metodología de la investigación científica. Colombia. Segunda edición.
- Horn Manfred (2007). Panorama de las energías renovables en el Perú. Cusco-Perú. Universidad nacional de ingeniería.
- ITDG. (2009). Biodigestores. Promoción y aporte para mejorar la competitividad rural en el Perú. Perú. Red nacional de biodigestores.
- Kern Donald, (1990). Proceso de transferencia de calor. México. Editorial continental, S.A. de C.V.

- Medina, I. (1984). Evaluación técnico-económica del uso de estanques prefabricados de asbesto-cemento; modificados para producir biogás. Tesis de grado. Maracay. Facultad de agronomía. UCV
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (2012), Balance Nacional de Energía 2010; Dirección General de Eficiencia Energética, Lima, Perú.
- Moreno, j. (1988). Diseño y construcción de un almacenador de biogás en concreto armado y formulación del programa de computación para el cálculo geométrico de digestores chinos. Tesis de grado. Maracay. Facultad de agronomía. UCV
- Moran M. J. y S. H. Shapiro, (1993). Fundamentos de termodinámica técnica. Barcelona.
- OEKOTOP. (1987). Difusión de la tecnología de biogás en Colombia. Cali-Colombia. Ultra textos Ltda. Primera edición.
- Robert E. Treybal. (1995). Operaciones de transferencia de masa. Estados Unidos de America. Editorial MacGRAW-HILL. Segunda edición.
- Rodríguez O. (1993), Energías Renovables. Madrid-España. Editorial Paraninfo

- Saldaña Méndez, Jaime Luis. (2006). Cartera de proyectos de energías renovables y proyectos MDL potenciales. Monterrey-México. Tecnológico de Monterrey.
- SASSE, LUDWING (1984); La Planta de Biogás: Bosquejo y detalle de plantas sencillas, GTZ- GmbH. Alemania.
- SAVRAN, V. (2005). Una solución energético – ambiental para reducción de contaminantes agropecuarios, como contribución al manejo integrado de la cuenca Zaza. Tesis presentada en opción al título académico de Master en Gestión Ambiental y Protección de los Recursos Naturales. Matanzas-Cuba. Universidad Camilo Cienfuegos.
- SNV, SOLUCIONES PRÁCTICAS, HIVOS (2012); Estudio de Factibilidad para un Programa Nacional de Biogás Doméstico en Perú. Lima, Perú.
- Urbaéz Méndez, Carlos Luis. (2007). Biomasa: Alternativa sustentable para la producción de biogás. Cuba. Universidad de Pinar del Rio.
- Valencia Montoya, Guillermo. (1996). Digestión Aeróbica. Lima – Perú. CEPIS.1ª Edición
- Yáñez, Fabián. (1996). Digestión anaeróbica de lodos. Lima – Perú. CEPIS.1ª Edición.

- Yunus A. Gengel. (2004).Transferencia de calor. México. Editorial McGrawhill/interamericana ediciones S.A. de CV. Segunda edición.

2. Referencias electrónicas

- Chaparro Ángela. (2002). Fisiología vegetal. Recuperado el 2012 de:http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000051/lecciones/cap01/06_13.htm
- Chávez, Pablo Infantes. (2006). Diseño de biodigestor. Recuperado el 2012 de: <http://www.engormix.com/MA-porcicultura/>
- Escobar Herrera, Iván. (2010). Aprovechamiento De Residuos Orgánicos. Recuperado el 2013 de: <http://tecnologoambientalsena.blogspot.com/2010/11/biodigestion.html>
- Herrera, Claudia. (2010) el bioabono. Recuperado el 2013 de: <http://cphnormasambientales.blogspot.com/2010/02/que-es-bioabono.html>
- Instituto para la diversidad y ahorro de energía IDEA (2014). Poder calorífico de combustibles. Recuperado el 2014 de: <http://www.idae.es/>

- Matton Sebastien (2012). Tipo de biodigestores. Recuperado el 2012 de: <http://bio-digestores.blogspot.com/2012/06/tipos-de-biodigestores.html>
- Ministerio de Energía y Minas (2001). Atlas eólico del Perú. Recuperado el 2014 de: http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/2001_potenc_disponibl_ener_eolica.pdf
- Ministerio de Energía y Minas (2001). Mapa de energía geotérmica. Recuperado el 2014 de: http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/2001_potenc_disponibl_ener_geotermic.pdf
- Ministerio de Energía y Minas (2010). mapa de generación de recursos energéticos. Recuperado el 2014 de: <http://www.minem.gob.pe/descripcion.php?idSector=6&idTitular=2085>
- Peralta Dónate, José (2006). Digestión Aerobia: Diseño De Procesos En Ingeniería Ambiental. Recuperado el 2013 de http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema6.pdf.

- Senamhi. (2003). Mapa de la energía solar. Recuperado el 2014 de:
http://www.senamhi.gob.pe/pdf/atlas_solar.pdf
- Ré Luciano & Morales Vladimir (2011). El biodigestor familiar tubular.
Recuperado el 2013 de:
http://www.minag.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/cusco_cedepac/presentacion_biogas_tubular-vladimir_morales.pdf

ANEXOS

1. Conductividad térmica de diversos materiales

<i>Material</i>	Conductividad térmica <i>k</i>	
	<i>W/m °C</i>	<i>Btu/h·pie· °F</i>
Metales:		
Plata (pura)	420	237
Cobre (puro)	385	223
Aluminio (puro)	202	117
Niquel (puro)	93	54
Hierro (puro)	73	42
Acero al carbón, 1% C	43	25
Plomo (puro)	35	20.3
Acero cromo-niquel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
Sólidos no metálicos:		
Cuarzo, paralelo al eje	41.6	24
Magnesita	4.15	2.4
Mármol	2.08-2.94	1.2-1.7
Arena	1.83	1.06
Vidrio de ventana	0.78	0.45
Arce o roble	0.17	0.096
Aserrín	0.059	0.034
Fibra de vidrio	0.038	0.022
Líquidos:		
Mercurio	8.21	4.74
Agua	0.556	0.327
Amoniaco	0.540	0.312
Aceite lubricante, SAE 50	0.147	0.085
Freón 12, CCl_2F_2	0.073	0.042
Gases:		
Hidrógeno	0.175	0.101
Helio	0.141	0.081
Aire	0.024	0.0139
Vapor de agua (saturado)	0.0206	0.0119
Bióxido de carbono	0.0146	0.00844

Figura N° 39 : Conductividad térmica de los materiales

Fuente : Yunus A. Gengel (2004)

2. Coeficiente de transferencia de calor por convección

Modo	<i>h</i>	
	W/m ² °C	Btu/h · pie ² · °F
Convección libre, $AT = 30$ °C		
Placa vertical 0.9 m [1 pie] de altura en el aire	4.5	0.79
Cilindro horizontal, 5 cm de diámetro. en el aire	6.5	1.14
Cilindro horizontal, 2 cm de diámetro. en agua	890	157,
Convección forzada		
Flujo de aire a 2 m/s sobre placa cuadrada de 0.2 m	12	2.1
Flujo de aire a 35 m/s sobre placa cuadrada a 0.75 m	75	13.2
Aire a 2 atm soplando en tubo de 2.5 cm de diámetro a 10 m/s	65	11.4
Agua a 0.5 kg/s fluyendo en tubo de 2.5 cm de diámetro	3500	616
Flujo de aire a través de un cilindro de 5 cm de diámetro con velocidad de 50 m/s	180	32
Agua hirviendo		
En una piscina \emptyset recipiente	2500-35 000	440-6200
Fluyendo en un tubo	5000-100000	880-17600
Condensación de vapor de agua, 1 atm		
Superficies verticales	4000- 11300	700-2000
Tubos horizontales al exterior	9500-25 000	1700-4400

Figura N° 40 : Coeficiente de transferencia de calor por convección

Fuente : Yunus A. Gengel (2014)

3. Presión atmosférica

TABLA DE EQUIVALENCIAS DE LAS UNIDADES MAS USUALES EN PRESION

	$\text{kp/cm}^2 =$ $\text{kfg/cm}^2 =$ Atm	kp/m^2	Torr = mmHg	N/m^2	MN/m^2	Bar	mBar	mmWS = mmH2O	mWS = mmH2O	Atm	$\text{lb/in}^2 =$ psi = psig }
$\text{kp/cm}^2 =$ $\text{kfg/cm}^2 =$ Atm	1	1×10^4	735.56	98,066.50	0.09807	0.980692	980.7	10,000	10	0.96784	14.2233
kp/m^2	1×10^{-4}	1	0.75356×10^{-1}	9.80665	9.807×10^{-6}	0.9807×10^{-4}	980.7×10^{-4}	1	0.001	0.96784×10^{-4}	0.1422×10^{-2}
Torr = mmHg	0.001359	13.5951	1	133.322	0.1333×10^{-3}	0.00133	1.3332	13.5951	0.01359	0.00132	0.01934
N/m^2	1.0197×10^{-5}	0.101972	0.750×10^{-2}	1	1×10^{-6}	1×10^{-5}	0.01	0.10197	0.000102	0.987×10^{-5}	0.145×10^{-3}
MN/m^2	10.1972	101,972	7,501.87	1×10^6	1	10	1×10^4	101,972	101.972	9.869	145.038
Bar	1.01972	10,197.20	750.062	1×10^5	0.1	1	1000	10,197.16	10.1972	0.98692	14.5038
mBar	1.01972×10^{-3}	10.197	0.7501	100	1×10^{-4}	0.001	1	10.1972	0.010197	0.98692×10^{-3}	0.0145
mmWS = mmH2O	0.0001	1	0.07355	9.807	9.807×10^{-6}	0.000098	0.098	1	0.001	0.000097	0.00142
mWS = mH2O	0.1	1,000	73.556	9,807	0.009807	0.09806	98.0665	1,000	1	0.09678	1.4223
Atm	1.03323	10,332	760	1.0133×10^5	0.10133	1.01325	1,013.25	10,332	10.332	1	14.696
$\text{lb/in}^2 =$ psi = psig }	0.07031	703.07	51.715	6,894.76	0.006895	0.06895	68.95	703.07	0.70307	0.6805	1

Figura N° 41 : Equivalencias de la presión atmosférica
Fuente : IDEA (2014)

4. Propiedades del agua liquido saturado

°C	$c_p,$ kJ/kg·°C	$\rho,$ kg/m ³	$\mu,$ kg/m·s	$k,$ W/m °C	Pr	$\frac{g\beta\rho^2c_p}{\mu k},$ 1/m ³ °C
0	4.225	999.8	1.79×10^{-3}	0.566	13.25	1.91×10^9
4.44	4.208	999.8	1.55	0.575	11.35	6.34×10^9
10	4.195	999.2	1.31	0.585	9.40	1.08×10^{10}
15.56	4.186	998.6	1.12	0.595	7.88	1.46×10^{10}
21.11	4.179	997.4	9.8×10^{-4}	0.604	6.78	1.91×10^{10}
26.67	4.179	995.8	8.6	0.614	5.85	2.48×10^{10}
32.22	4.174	994.9	7.65	0.623	5.12	3.3×10^{10}
37.78	4.174	993.0	6.82	0.630	4.53	4.19×10^{10}
43.33	4.174	990.6	6.16	0.637	4.04	4.89×10^{10}
48.89	4.174	988.8	5.62	0.644	3.64	5.66×10^{10}
54.44	4.179	985.7	5.13	0.649	3.30	6.48×10^{10}
60	4.179	983.3	4.71	0.654	3.01	7.62×10^{10}
65.55	4.183	980.3	4.3	0.659	2.73	8.84×10^{10}
71.11	4.186	977.3	4.01	0.665	2.53	9.85×10^{10}
76.67	4.191	973.7	3.72	0.668	2.33	1.09×10^{11}
82.22	4.195	970.2	3.47	0.673	2.16	
87.78	4.199	966.7	3.27	0.675	2.03	
93.33	4.204	963.2	3.06	0.678	1.90	
104.4	4.216	955.1	2.67	0.684	1.66	
115.6	4.229	946.7	2.44	0.685	1.51	
126.7	4.250	937.2	2.19	0.685	1.36	
137.8	4.271	928.1	1.98	0.685	1.24	
148.9	4.296	918.0	1.86	0.684	1.17	
176.7	4.371	890.4	1.57	0.677	1.02	
204.4	4.467	859.4	1.36	0.665	1.00	
232.2	4.585	825.7	1.20	0.646	0.85	
260	4.731	785.2	1.07	0.616	0.83	
287.7	5.024	735.5	9.51×10^{-3}			
315.6	5.703	678.7	8.68			

Figura N° 42 : Propiedades del agua liquido saturado

Fuente : Yunus A. Gengel (2004)

5. Emisividad de diversos materiales

Aluminio, pulido	0,05	Hierro, forjado, pulido	0,28
Aluminio, superficie rugosa	0,07	Bamiz, Bakelite	0,93
Aluminio, muy oxidado	0,25	Bamiz, negro, mate	0,97
Placa de amianto	0,96	Bamiz, negro, brillante	0,87
Tela de amianto	0,78	Bamiz, blanco	0,87
Papel de amianto	0,94	Hollín	0,96
Pizarra de amianto	0,96	Pomo, gris	0,28
Latón, mate, deslustrado	0,22	Pomo, oxidado	0,63
Latón, pulido	0,03	Pomo, rojo, en polvo	0,93
Ladrillo, común	0,85	Pomo, brillante	0,08
Ladrillo, vidriado, basto	0,85	Mercurio, puro	0,1
Ladrillo, refractario, basto	0,94	Níquel, en hierro fundido	0,05
Bronce, poroso, basto	0,55	Níquel, puro pulido	0,05
Bronce, pulido	0,1	Pintura, acabado en plata**	0,31
Carbono, purificado	0,8	Pintura, óleo, media	0,94
Hierro fundido, fundición esbozada	0,81	Papel, negro, brillante	0,9
Hierro fundido, pulido	0,21	Papel, negro, mate	0,94
Carbón, en polvo	0,96	Papel, blanco	0,9
Cromo, pulido	0,1	Platino, puro, pulido	0,08
Arcilla, cocida	0,91	Porcelana, vidriada	0,92
Hormigón	0,54	Cuarzo	0,93
Cobre, pulido,	0,01	Goma	0,93
Cobre, bruñido comercial	0,07	Laca, negra, mate	0,91
Cobre, oxidado	0,65	Laca, negra, brillante	0,82
Cobre, negro oxidado	0,88	Nieve	0,8
Cinta aislante, plástico negro	0,95	Acero, galvanizado	0,28
Esmalte**	0,9	Acero, muy oxidado	0,88
Formica	0,93	Acero, recién laminado	0,24
Terreno congelado	0,93	Acero, superficie rugosa	0,96
Vidrio	0,92	Acero, rojo oxidado	0,69
Vidrio, escarchado	0,96	Acero, chapa, niquelado	0,11
Oro, pulido	0,02	Acero, chapa, laminado	0,56
Hielo	0,97	Papel de alquitrán	0,92
Hierro, laminado en caliente	0,77	Estañó, bruñido	0,05
Hierro, oxidado	0,74	Tungsteno	0,05
Hierro, chapa galvanizada, bruñido	0,23	Agua	0,98
Hierro, chapa, galvanizado, oxidado	0,28	Cinc, chapa	0,2
Hierro, brillante, grabado	0,16		

Figura N° 43 : Emisividad de diversos materiales

Fuente : Robert E. Treybal (2000)

6. Análisis de bioabono y biol



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831

**UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA
INFORME DE ANALISIS**

NONRO865-12-LAQ



SOLICITANTE: CECADE - PEDRO ZANABRIA

MUESTRA : BIOL

FECHA : C/17/09/2012

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO

±=====

pH	7.75
C.E. mmmhos/cm	4.70
Materia Orgánica %	0.77
Nitrógeno %	0.028
Fósforo ppm P_2O_5	222.00
Potasio ppm K_2O	396.00
Hierro ppm Fe_2O_3	5.80
Calcio ppm	27.20
Magnesio ppm	112.90
N Amoniacal %	0.004
N Nitratos %	0.024

=====

*
Cusco, 15 de Octubre 2012

Maquides Ferrer Arisboa
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO

Figura N° 44 : Análisis del biol
Fuente : Archivos propios (2014)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 722
 Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
 Teléfono - fax - modem: 224831

UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA
INFORME DE ANALISIS

Nº0864-12-LAQ



SOLICITANTE: CECADE - PEDRO ZANABRIA

MUESTRA : BIO ABONO

FECHA : C/17/09/2012

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

pH	7.12
C.E. mmhos/cm	1.16
Materia Orgánica %	26.53
Nitrógeno %	1.05
Fósforo % P_2O_5	2.20
Potasio % K_2O	1.16
Hierro %	0.044
Calcio %	0.076
Magnesio %	0.133
N Amoniacal %	0.25
N Nitratos %	0.80

Cusco, 15 de Octubre 2012

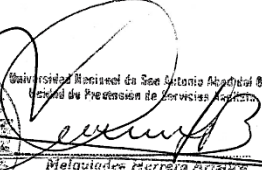

 Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestación de Servicios Académicos
 Melquiades Herrera Arriaga
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO
 DE ANALISIS QUIMICO

Figura Nº 45 : Análisis del bioabono
 Fuente : Archivos propios (2014)

7. Vista superior de las dimensiones del biodigestor

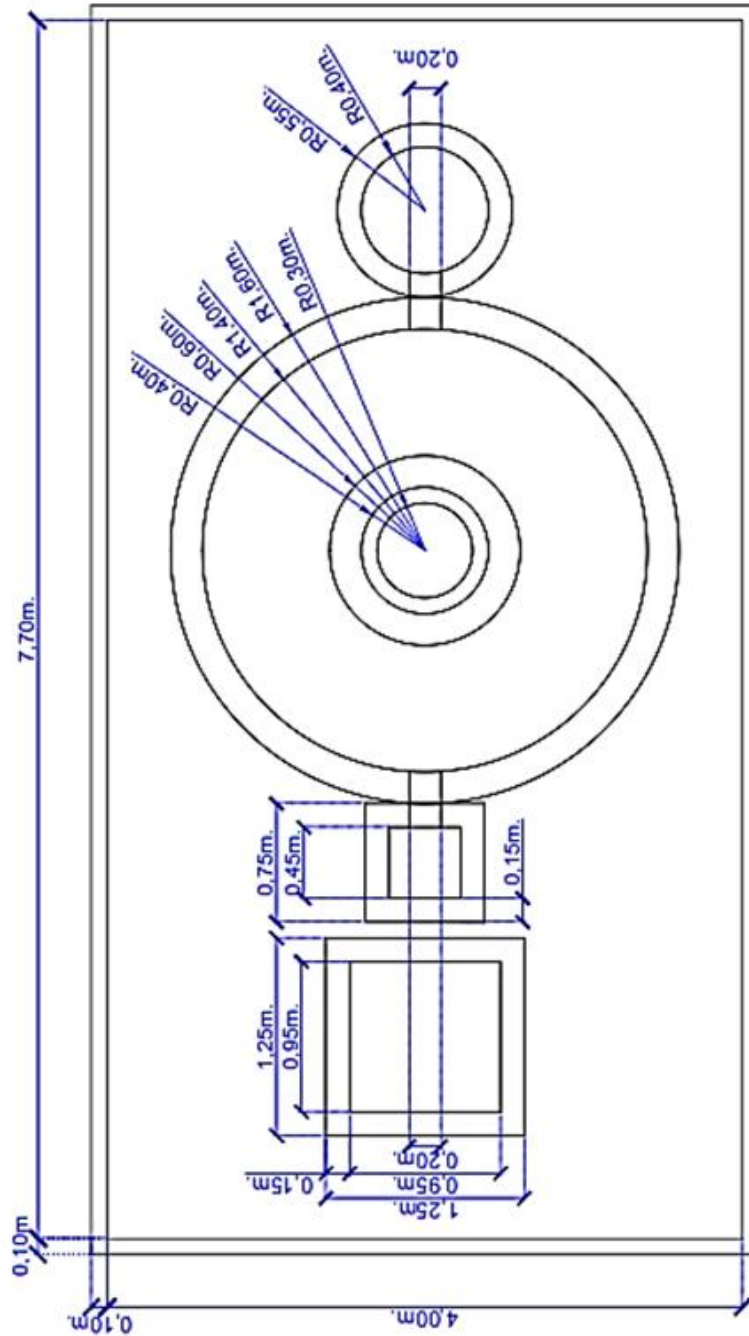


Figura N° 46 : Dimensiones del biodigestor - vista superior
Fuente : Archivos propios (2014)

8. FOTOS



Figura N°47 : Vista del biodigestor
Fuente : Archivos propios (2012)



Figura N°48 : Producción de biogás
Fuente : Archivos propios (2012)



Figura N°49 : Quemado del biogás
Fuente : Archivos propios (2012)



Figura N°50 : biol y bioabono
Fuente : Archivos propios (2012)